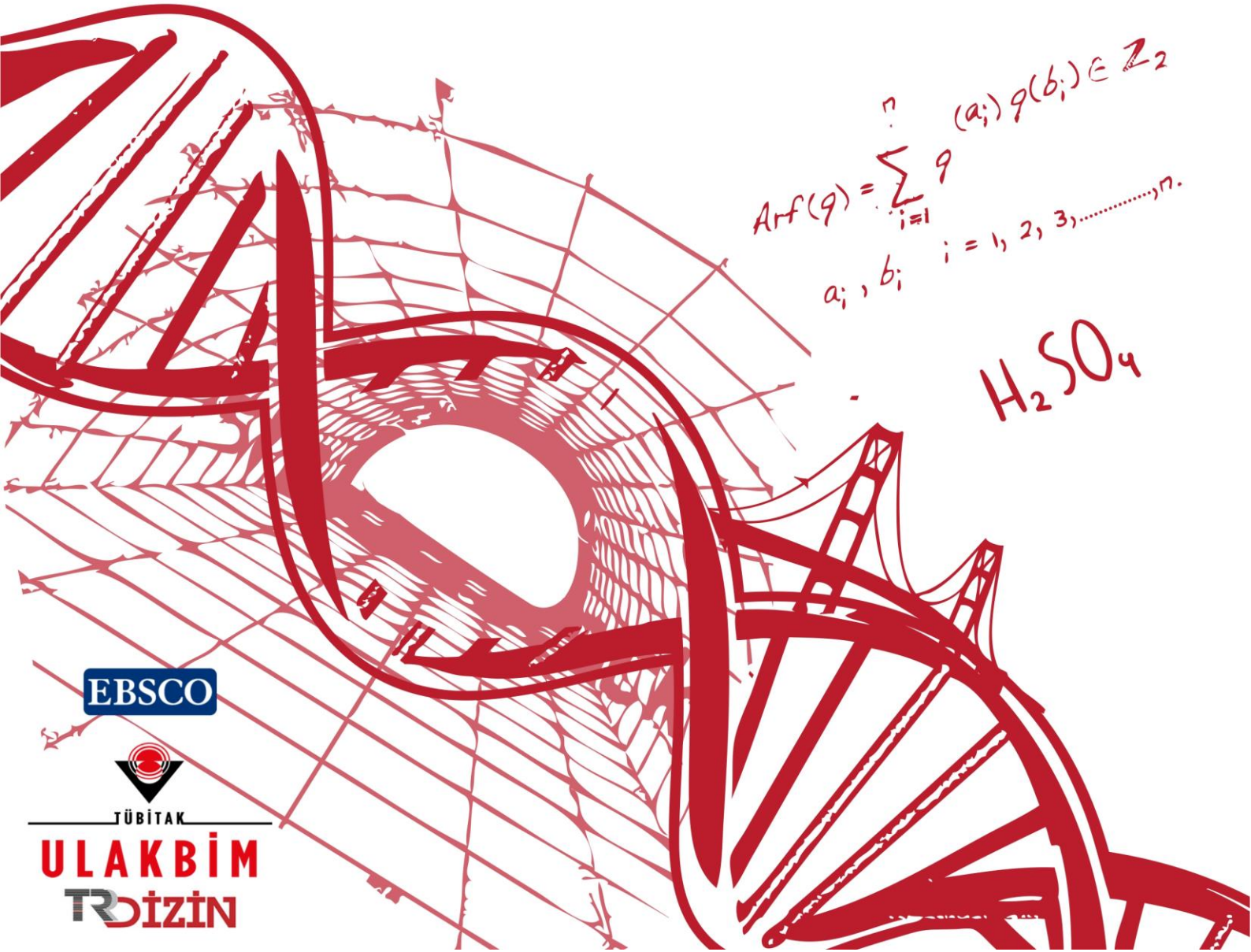
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Gümüşhane University Journal of Science

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ YAYINI

PUBLISHED BY GÜMÜŞHANE UNIVERSITY

ISSN 2146 - 538X CİLT/VOLUME: 15 SAYI/NUMBER : 1 YIL/YEAR : 2025



EBSCO

TÜBİTAK ULAKBİM TR DİZİN

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ
GÜMÜŞHANE UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE
ISSN 2146-538X CİLT / *VOLUME*: 15 SAYI / *ISSUE*: 1 YIL / *YEAR*: 2025

Sahibi / *Owner*
Prof. Dr. Halil İbrahim ZEYBEK
Gümüşhane Üniversitesi Adına / *On the behalf of Gümüşhane University*

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / *Managing Editor*
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin BOSTANCI

Baş Editörler / *Editors-in-Chief*
Doç. Dr. Mehmet Ali GÜCER
Öğr. Gör. Salih TÜRK

Editörler / *Editors*

Prof. Dr. Duygu ÖZDEŞ	Doç. Dr. Onur ARAZ
Prof. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU	Doç. Dr. Osman KOMUT
Prof. Dr. Enver AKARYALI	Doç. Dr. Recep ÇAKMAK
Prof. Dr. Fatih DÖNER	Dr. Öğr. Üyesi Bülent AKAR
Prof. Dr. Halil YOLCU	Dr. Öğr. Üyesi Berna GENÇ
Prof. Dr. İbrahim TURAN	Dr. Öğr. Üyesi İlker ERKAN
Prof. Dr. Mehmet MERDAN	Dr. Öğr. Üyesi M. Tuğçe TUNÇ ODABAŞ
Prof. Dr. Necati ÇELİK	Dr. Öğr. Üyesi Samet TONYALI
Prof. Dr. Selçuk ALEMDAĞ	Dr. Öğr. Üyesi Şener ALİYAZICIOĞLU
Prof. Dr. Serkan ÖZTÜRK	Dr. Öğr. Üyesi Şeyda Merve KARATAŞ
Doç. Dr. Fevzi TOPAL	Dr. Öğr. Üyesi Yasin OĞUZ
Doç. Dr. Lale CONA	Dr. Serdar KESKİN
Doç. Dr. Nihan GÜNGÖR	

Yayın Türü / *Publication Type*
Yaygın süreli ve hakemli/ *Common term and refereed*

Yayın Tarihi / *Publication Date*
15 / 03 / 2025

Hakemli bir dergi olan Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi üç ayda bir çevrimiçi olarak yayımlanmaktadır. Akademik usullere uygun atıf yapmak suretiyle dergide yapılan çalışmalardan yararlanılabilir. Yayımlanan çalışmaların tüm sorumluluğu yazarlara aittir.

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ
GÜMÜŞHANE UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE
ISSN 2146-538X CİLT / VOLUME: 15 SAYI / ISSUE: 1 YIL / YEAR: 2025

Yayın Danışma Kurulu / *Editorial Advisory Board*

Abdelhai ELAZZOUZI-Sidi Mohamed Ben Abdellah U.
Abdon ATANGANA-Free State University
Abdullah KAYGUSUZ-Gümüşhane Üniversitesi
Abdulveli SİRAT-Gümüşhane Üniversitesi
Abdurrahman DOKUZ-Gümüşhane Üniversitesi
Abdurrahman LERMİ-N. Ömer Halisdemir Üni.
Abedallah RABABAH-Jordan Uni. Sci. and Tech.
Adem DOĞANGÜN-Uludağ Üniversitesi
Afşin Ahmet KAYA-Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Ahmet TUTUŞ-Kahramanmaraş Sütçü İmam Üni.
Alaaddin VURAL-Ankara Üniversitesi
Ali Osman YILMAZ-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Ayberk KAYA- Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Ayhan TOZLUOĞLU-Düzce Üniversitesi
Bahri BAYRAM-Atatürk Üniversitesi
Bilge BAHAR-Gümüşhane Üniversitesi
Birgül KURAL-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Birol ŞAHİN- Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Cahit HELVACI-Dokuz Eylül Üniversitesi
Candan GÖKÇEOĞLU-Hacettepe Üniversitesi
Cem YÜCEL-Gümüşhane Üniversitesi
Cemal KÖSE-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Cemalettin BALTACI-Gümüşhane Üniversitesi
Charyyar Ashyralyyev- Bahçeşehir Üniversitesi
Chokka RAVICHANDRAN-Bharathiar University
Coşkun GÜLSER-Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Çetin CÖMERT- Karadeniz Teknik Üniversitesi
Çiğdem SAYDAM EKER-Gümüşhane Üniversitesi
Eda Feyza AKYÜREK-Atatürk Üni.
Elif Çelenk KAYA-Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Emel ABDİOĞLU YAZAR-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Emine TANIR KAYIKÇI-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Emre AYDINÇAKIR-Gümüşhane Üniversitesi
Emre ÖZKOP-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Ertan GÖKALP-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Ferkan SİPAHİ-Gümüşhane Üniversitesi
Fetullah ARIK-Konya Teknik Üniversitesi
Fikri BULUT-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Gökhan APAYDIN- Karadeniz Teknik Üniversitesi
Günay ÇAKIR-Gümüşhane Üniversitesi
Hacı Alim BARAN-Batman Üniversitesi
Hakan KARSLI-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Halim MUTLU-Ankara Üniversitesi
Hasan BALTAŞ-Recep Tayyip Erdoğan Üni.
Hazan ALKAN AKINCI-Artvin Çoruh Üniversitesi
Hilal YILDIZ-Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üni.
Hüseyin DEMİR-Samsun Üniversitesi
Ilyas KHAN- Majmaah University
İbrahim ÇAVUŞOĞLU-Gümüşhane Üni.
İbrahim DÜZGÜN-Gümüşhane Üniversitesi
İlhan ÇELİK-Samsun Üniversitesi
İsmail Hakkı ALTAŞ-Karadeniz Teknik Üni.
İsmet SEZER-Gümüşhane Üniversitesi
Jose Francisco Gomez Aguilar-Cenidet
Kamil COŞKUNÇELEBİ-Karadeniz Teknik Üni
Keewook YI-Korea Basic Science Institute
Kemal ÇELİK-Gümüşhane Üniversitesi
Kemal KUVVET- Recep Tayyip Erdoğan Üni
Kolade M. OWOLABİ-Federal Uni. of Technology
Levent GÜMÜŞEL-Karadeniz Teknik Üniversitesi
M. Burhan SADIKLAR-Karadeniz Teknik Üni.
Mehmet ARSLAN-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Mehmet BAŞOĞLU-Gümüşhane Üniversitesi
Mehmet Tevfik SEFEROĞLU-Gümüşhane Üniversitesi
Melih OKÇU-Atatürk Üniversitesi
Mualla YALÇINKAYA-Karadeniz Teknik Üni.
Muazzez ÇELİK KARAKAYA-Konya Teknik Üniversitesi
Muhammet M. KAHRAMAN-İstanbul Teknik Üni.
Murat EKİNCİ-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Murat KÜÇÜK-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Mustafa KUMRAL-İstanbul Teknik Üniversitesi
Mustafa Nuri URAL-Gümüşhane Üniversitesi
Müdahir ÖZGÜL-Atatürk Üniversitesi
Nafiz MADEN-Gümüşhane Üniversitesi
Necati KARAKAYA-Selçuk Üni.
Nurçin KÜÇÜK KENT-Gümüşhane Üni.
Oğuz GÜNGÖR-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Okay ÇİMEN-Munzur Üniversitesi
Osman ÜÇÜNCÜ-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Özcan YİĞİT-Çanakkale 18Mart Üniversitesi
Özlem ÇAVDAR-Gümüşhane Üniversitesi
Ramazan LİVAOĞLU-Uludağ Üniversitesi
Rizwan Ul HAQ-Bahria University
S. Beyza Ö. SARIKAYA-Gümüşhane Üniversitesi
Saffet ERDOĞAN-Harran Üniversitesi
Salim Serkan NAS-Gümüşhane Üniversitesi
Sefa YALVAÇ-Gümüşhane Üniversitesi
Selami KESLER-Pamukkale Üniversitesi
Selim KAYA-Gümüşhane Üniversitesi
Selim ŞEN-Gümüşhane Üniversitesi
Sultan ÖZTÜRK-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Sunil PROHİT- Rajasthan Technical University
Şükrü YETGİN-Gümüşhane Üniversitesi
Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU-Karadeniz Teknik Üni.
Tufan ÇAKIR-Gümüşhane Üniversitesi
Uğur ŞİMŞEK-Iğdır Üniversitesi
Vecihi AKSAKAL-Bayburt Üniversitesi
Yener EYÜBOĞLU-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Yener TOP-Gümüşhane Üniversitesi
Yong WANG- University of Manchester
Yusuf AŞIK-Gümüşhane Üniversitesi
Zafer ASLAN-Balıkesir Üniversitesi
Zafer ÇAKIR-Alaaddin Keykubat Üniversitesi
Zakia HAMMOUCH-Moulay Ismail University
Zehra ŞAHİN- Karadeniz Teknik Üni.
Zuhal OKCU-Atatürk Üniversitesi
Zülfü GÜROCAK-Fırat Üniversitesi

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ
GÜMÜŞHANE UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE
ISSN 2146-538X CİLT / VOLUME: 15 SAYI / ISSUE: 1 YIL / YEAR: 2025

İÇİNDEKİLER / *CONTENTS*

Araştırma Makalesi / *Research Article*

Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU	**Maksimum yer ivmesinin eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranış analizleri üzerindeki etkisi** *The influence of peak ground acceleration on equivalent linear and nonlinear soil response analyses*	**1**
Çiğdem KÜÇÜK Meryem DEMİR	**Yosun gübresi ve mikoriza uygulanmasının mercimek bitkisi rizosfer bölgesinin biyolojik aktivitesine etkileri** *Effects of seaweed fertilizer and mycorrhiza application on the biological activity of lentil rhizosphere soil*	**11**
Yester ÖZMERİNOĞLU Orhan DESTANOĞLU Salih CENGİZ	**Adli delil olarak kullanılan cam malzemelerin analitik yöntemlerle incelenmesi** *Examination of glass materials used as forensic evidence with analytical methods*	**21**
Elif ÇELİK Selma AKÇAY	**Sinüzoidal dalgalı bir kanalda akış ve ısı transferi üzerinde dalga genliğinin ve dairesel engellerin etkisinin incelenmesi** *Investigation of the effect of wave amplitude and circular obstacles on flow and heat transfer in a sinusoidal wave channel*	**36**
İbrahim ÇETİNER	**AppleCNN: A new CNN-based deep learning model for classification of apple leaf diseases** *AppleCNN: Elma yaprak hastalıklarının sınıflandırılabilmesi için CNN tabanlı yeni bir derin öğrenme modeli*	**51**
Bekir Cihad BAL Nasır NARLIOĞLU	**Geri dönüştürülmüş plastik ve cam tozu ile üretilen kompozit malzemenin seçili özellikleri üzerine dolgu oranının etkisi** *Effect of filler ratio on selected properties of composite material produced with recycled plastic and glass powder*	**64**
Nazmiye BOZOK Emre AKARSLAN Said Mahmut ÇINAR	**Kısa dönem güneş ışınım tahmininde farklı hibrit yöntem oluşturma stratejilerinin başarılarının karşılaştırılması** *Comparison of successes of different hybrid method formation strategies in short-term solar radiation prediction*	**75**
Rahim Aytug OZER Merve DEMIRCI	**Determination of optimum tilt angle for solar panels: case study for Eastern Anatolia Region of Turkey** *Güneş panelleri için optimum eğim açısının belirlenmesi: Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi örneği*	**93**
Uğur KAFKAS Gökhan GÜÇLÜ	**Investigation of buckling behavior of carbon nanotube reinforced nanobeams according to nonlocal elasticity and elastic foundation effects** *Karbon nanotüp takviyeli nanokirişlerin burkulma davranışının yerel olmayan elastisite ve elastik zemin etkileriyle incelenmesi*	**105**
Zübeyde KANKAN Baran TOPRAK	**Standart penetrasyon ve presiyometre deneylerine göre yüzeysel temellerde taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması** *Comparison of bearing capacity in shallow foundations according to standard penetration and pressuremeter tests*	**122**
Özgür BİLİCİ	**Kırdağ ofiyoliti (Erzurum, KD Türkiye) manto bölümü içerisindeki ortopiroksenitlerin petrografisi, mineral kimyası ve tüm kaya jeokimyasal özellikleri** *Petrography, mineral chemistry and whole-rock geochemical properties of orthopyroxenites in the mantle section of the Kırdağ ophiolite (Erzurum, NE Turkey)*	**140**
Serdar DİZMAN Kübra CAMGÖZ	**Bebek pudralarında doğal radyoaktivite ve radyolojik risklerin değerlendirilmesi** *Evaluation of natural radioactivity and radiological risks in baby powders*	**161**
Kemal ÇELİK Ahmet KAYA	**Elipsoidin düzleme lambert konform konik tasvirinde, coğrafi ve düzlem koordinatlar arasında dönüşüm, jeodezik temel problem çözümü** *Transformation of plane coordinates with geographic in plane lambert conform conic mapping of ellipsoid and solution of geodesic basic problem in this mapping*	**170**

G. Gülşen GÜNEYSU, Umut KENDÜZ, Soner KIZIL, Sevil ATASOY — **Göz kozmetiği ürünlerinin spektroskopik yöntemlerle adli kanıt olarak incelenmesi** — **184**
Examination of eye cosmetics products as forensic evidence by spectroscopic methods

Fatih GÜRCAN, Cemal KÖSE — **Next-generation software development competencies: Identification of technical and non-technical skills needed by modern industry** — **197**
Yeni nesil yazılım geliştirme yetkinlikleri: Modern endüstrinin ihtiyaç duyduğu teknik ve teknik olmayan becerilerin belirlenmesi

Ali KAYA — **Gümüşhane ili içme suyunun spektrofotometrik analizi** — **210**
Spectrophotometric analysis of Gümüşhane province drinking water

Muhammet KARABULUT — **Impact of wind loads on the structural integrity of reinforced concrete (RC) minarets** — **221**
Rüzgar yüklerinin betonarme minarelerin yapısal bütünlüğüne etkisi

Fatma CEBECİ, Samet VERGİLİ, Mustafa KARAMAN — **Karpuz atıkları ve karpuz suyu ile zenginleştirilmiş tam buğday ekmeği üretimi ve duyusal özelliklerinin değerlendirilmesi** — **234**
Production of bread enriched with watermelon waste and juice and evaluation of its sensory properties

Hatice MUTİ, Gaye Yeşim TAFLAN — **Analytical and numerical solutions of some differential equations: a comparative study using Natural transform and Runge-Kutta method** — **245**
Bazı diferansiyel denklemlerin analitik ve numerik çözümleri: Natural dönüşüm ile Runge-Kutta yöntemi kullanılarak karşılaştırmalı bir çalışma

Abdulkadir ELMAS — **Actionable targets in breast cancer: a multi-omics approach to uncover tumor-specific vulnerabilities** — **260**
Meme kanserinde uygulanabilir hedefler: tümör-spesifik hassasiyetleri ortaya çıkarmak için multi-omik bir yaklaşım

Aslı ALKAN, Hasan BULUT, Tolga AKTÜRK — **The novel numerical solutions of conformable fractional Cahn-Hilliard equation in the presence of advection and reaction terms via the novel hybrid method** — **274**
Adveksiyon ve reaksiyon terimlerinin varlığında uyumlu kesirli Cahn-Hilliard denkleminin yeni hibrit yöntemle yeni sayısal çözümleri

Emine KAPLAN, İbrahim ÇAVUŞOĞLU, Yasemin TATLI — **Samsun otomotiv sektöründe İSG farkındalığı: kesitsel bir araştırma** — **286**
OHS awareness in Samsun automotive sector: A cross-sectional study

Derleme Makalesi / *Review Article*

Hacer KAYA — **Hayvan yemlerine yeşil sentez metalik nanopartikül ilavelerinin etkileri** — **298**
Effects of green synthesized metallic nanoparticle additions to animal feeds

Yasemin AKDAĞ, Hüseyin GÜVEN, Mustafa Evren ERŞAHİN, Hale ÖZGÜN — **Biyoetanol üretiminde mikroalglerin rolü** — **321**
The role of microalgae in bioethanol production

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 1-10 doi: 10.17714/gumusfenbil.1542060 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Maksimum yer ivmesinin eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranış analizleri üzerindeki etkisi

The influence of peak ground acceleration on equivalent linear and nonlinear site response analyses

Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU*

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa

• Geliş tarihi / *Received*: 02.09.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 17.12.2024

Öz

Zemin davranış analizleri yapının maruz kalacağı etkileri anlamak için önemli bir araç olmasının yanı sıra yapı-zemin etkileşimi analizlerinin önemli bir aşamasını temsil etmektedir. Öte yandan zeminin doğrusal olmayan davranışını temsil etmek için önerilen eşdeğer doğrusal yöntem literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem doğrusal olmayan zemin davranışını ardışık doğrusal analizler yardımıyla temsil etmeye çalışan pratik bir yaklaşımdır. Bu çalışmada maksimum yer ivmesinin eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz üzerindeki etkinliği 1-boyutlu zemin davranış analizleri üzerinden araştırılmaktadır. Bu vesileyle oluşturulan 30m derinliğinde homojen killi zemin tabakası farklı genliklere ölçeklenerek elde edilen kayıtlara maruz bırakılarak eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde model tabanı rijit kabul edilmiştir. Zeminin kayma modülü ve sönüm davranışının kayma birim şekildeğiştirmeyle değişimi için literatürde yaygın bir şekilde kullanılan deneysel çalışma dikkate alınmıştır. Bu ilişkiler programda mevcut olan bir eğri uydurma aracı sayesinde kalibre edilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda eşdeğer doğrusal analizlerin doğrusal olmayan davranışı belirli yer ivmesi değerine kadar temsil edebildiği, 0.25-0.50g aralığında eşdeğer doğrusal davranışın doğrusal olmayan davranıştan sapmaya başladığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca büyük yer ivmesi genliklerinde eşdeğer doğrusal analizlerde elde edilen kayma gerilmesi değerinde doğrusal olmayan analizlere göre daha büyük tepkiler gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bir boyutlu analiz, Doğrusal olmayan analiz, Sayısal modelleme, Zemin davranış analizi

Abstract

Site response analyses are not only a crucial tool for understanding the effects that a structure will be subjected to but also represent a significant stage in the analysis of soil-structure interaction. On the other hand, the proposed equivalent linear method for representing the nonlinear behavior of soil is frequently utilized in literature. This method offers a practical approach that attempts to represent nonlinear soil behavior through successive linear analyses. In this study, the effectiveness of peak ground acceleration on equivalent linear and nonlinear analyses is investigated through one-dimensional site response analyses. A homogeneous clay layer, 30 meters deep, was subjected to scaled records of varying amplitudes to perform both equivalent linear and nonlinear analyses. In these analyses, the model base was assumed to be rigid. The variation of the soil's shear modulus and damping behavior with shear strain was considered based on widely used experimental studies in the literature. These relationships were calibrated using a curve-fitting tool available in the program. The results of the analyses revealed that equivalent linear analyses could represent nonlinear behavior up to a certain ground acceleration value, with deviations from nonlinear behavior beginning to emerge within the 0.25-0.50g range. Additionally, at higher ground acceleration amplitudes, it was observed that the shear stress values obtained from equivalent linear analyses were greater compared to those from nonlinear analyses.

Keywords*: One-dimensional analysis, Nonlinear analysis, Numerical modeling, Site response analysis*

*Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU; omertao@uludag.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Anakayadan yayılan sismik dalgaların genlik ve frekans özellikleri, zemin yüzeyine ulaşana kadar geçtikleri zemin tabakalarının özelliklerine bağlı olarak değişime uğrarlar. Titreşim özellikleri ise deprem büyüklüğü, merkez üssüne olan uzaklık, süre ve saha özellikleri gibi çeşitli nedenlerden etkilenir. Deprem dalgalarının kaynaktan zemin yüzeyine gelene kadar geçirdiği karmaşık davranış kapsamlı araştırmalara konu olmuştur. Zemin yüzeyinde meydana gelen tepkiyi etkileyen üç temel parametre kaynak etkisi, güzergâh etkisi ve yerel zemin koşulları etkisi olarak ifade edilmektedir. Yerel zemin koşulları mühendislik taban kayasından başlayarak zemin tabakalanmasından geçen ve yüzeye kadar olan zemini belirtmektedir. Zemin davranış analizleri (ZDA) baştaki iki parametrenin yapının hemen altındaki yerel zemin üzerindeki etkisinin incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Deprem dalgaları mühendislik taban kayasından yüzeye yaklaştıkça zemin tabakalarında filtrelenebilir, küçülebilir veya büyüyebilir. Zemin tabakalarındaki bu değişimi kapsamlı bir şekilde inceleyebildiğimiz analizler zemin davranış analizleri (ZDA) olarak bilinmektedir. Böylesi analizler yapı zemin etkileşiminin ilk aşaması olarak değerlendirilmektedir (Wolf, 1985). Bu tür analizlerde üstyapının veya yapısal elemanın yokluğunda zemin tabakalarının dinamik yük altındaki tepkisi incelenmektedir. Bu nedenle, deprem anında zeminde meydana gelen büyütmenin/küçülmenin analiz edildiği ZDA, deprem sonucu yapının karşılaşacağı etkilerin değerlendirilmesinde ilk adım ve önemli bir faktördür. Model oluşturmanın pratik olması ve analizlerde işlem yükünün az olması 1-boyutlu (1B) doğrusal ZDA analizlerinin araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmesine sebep olmuştur (Astroza vd., 2017; Bilotta vd., 2015; Carlton & Tokimatsu, 2016; Civelekler vd., 2021; Han vd., 2018; Kara & Şahin, 2022; Nghiem & Chang, 2019; Rathje vd., 2010; Sun & Yuan, 2021; Timurağaoğlu vd., 2021). 1B analizler zemin tabaka sınırlarının yatay olması, tabakadaki malzeme özelliklerinin sabit olması, zemin tepkisinin esas olarak alttaki kayadan düşey yayılan kayma dalgaları (SH) tarafından oluşması ve yanal sınırların sonsuz olması kabullerine dayanmaktadır (Idriss & Seed, 1968; Kramer, 1996).

Öte yandan zeminin doğrusal olmayan (DO) davranışını temsil etmek için yaklaşık bir yöntem olarak eşdeğer doğrusal (ED) yöntem yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemde zeminin DO davranışı tekrarlı iteratif bir prosedür ile temsil edilmektedir. Başlangıçta doğrusal bir kayma modülü ve sönüm değeri dikkate alınarak gerçekleştirilen dinamik analizler her iterasyonda efektif kayma şekildeğiştirmesine (γ_{eff}) bağlı olarak yeniden hesaplanan sekant kayma modülü ve sönüm değeri üzerinden tekrarlanır. Genellikle iki iterasyon arasındaki fark %5-10 civarında (3-5 iterasyon) olduğunda analizler tamamlanır (Schnabel vd., 1972). Yöntemin pratik olması sebebiyle birçok araştırmacı tarafından kullanılmasına olanak sağlamıştır (Fatahi & Tabatabaiefar, 2014; Stanko vd., 2019; Yoshida vd., 2002). Ancak ED yöntemin yalnızca zemin DO davranışının tahmin eden bir yaklaşım olduğunu kabul etmek gerekir. Yöntemin içindeki doğrusal analiz varsayımı, ZDA için kullanıldığında önemli sonuçlar doğurabilmektedir. Öncelikle, DO analizlere göre ED analiz sonucunda bazı frekanslarda gerçekte olmayan tepkiler elde edilebilmektedir. Ek olarak, ED analizde γ_{eff} değeri uygulamada her ne kadar 0.65 olarak kullanılsa da analiz sonucunu önemli oranda etkilediği bilinmektedir (Yoshida vd., 2002). Ayrıca ED analizlerin hangi kayma şekildeğiştirmesi değerine kadar kullanılması gerektiği önem arz eden bir konudur. Bazı araştırmacılar tipik olarak %1'den büyük şekildeğiştirme değerlerinde ED analizin dikkatli kullanılması gerektiğini vurgularken (Kramer & Paulsen, 2004; Matasovic & Hashash, 2012) bazı çalışmalarda ise DO analizi tercih etmek için daha düşük şekildeğiştirme sınırının (0.1-0.4%) gerekli olduğu vurgulanmaktadır (Bolisetti vd., 2014; Kim vd., 2016; Kim & Hashash, 2013). Kaklamanos vd. (2013) ED ve DO analiz arasında seçim yapmak için maksimum kayma şekildeğiştirmesi ve spektral periyoda bağlı olarak 0.1-0.4% şekildeğiştirme değerini geçiş bölgesi olarak göstermişlerdir.

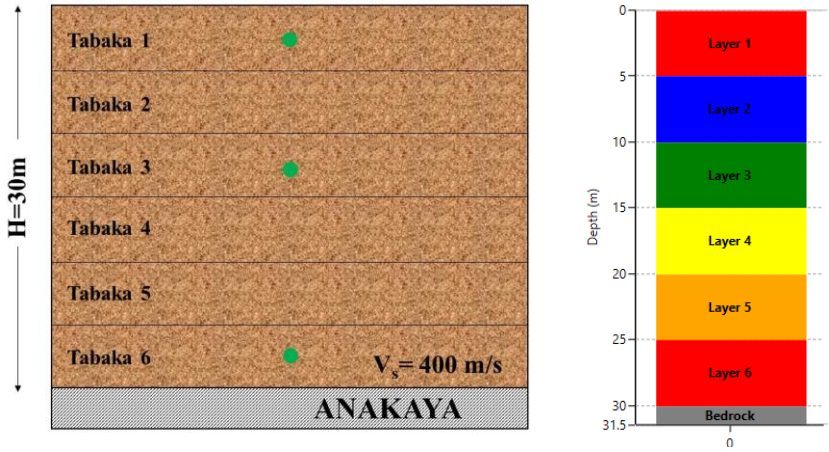
Literatürde maksimum yer ivmesinin limit değeri üzerine yapılan çalışmaların sayısı azdır. ED yöntemin kullanılabileceği maksimum yer ivmesi değerini belirlemek için yapılan çalışmada 1-10 Hz frekans aralığında ve 0.4g genliğe sahip yüklemelerde ED ve DO analizlerin uyumlu sonuçlar verdiği ancak daha büyük değerlerde DO büyütme faktörünün daha büyük olduğu belirtilmiştir (Stewart vd., 2008).

Bu çalışmada maksimum yer ivmesi değerinin ED ve DO 1B ZDA üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Bu kapsamda 30m derinliğinde homojen killi bir zemin tabakasında farklı maksimum yer ivme değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilen 1B ED ve DO analiz sonuçlarına göre zeminin farklı derinliklerinde meydana gelen tepkiler tepki spektrumu, kayma gerilmesi-şekildeğiştirme, ivme-zaman ve deplasman-zaman ilişkileri

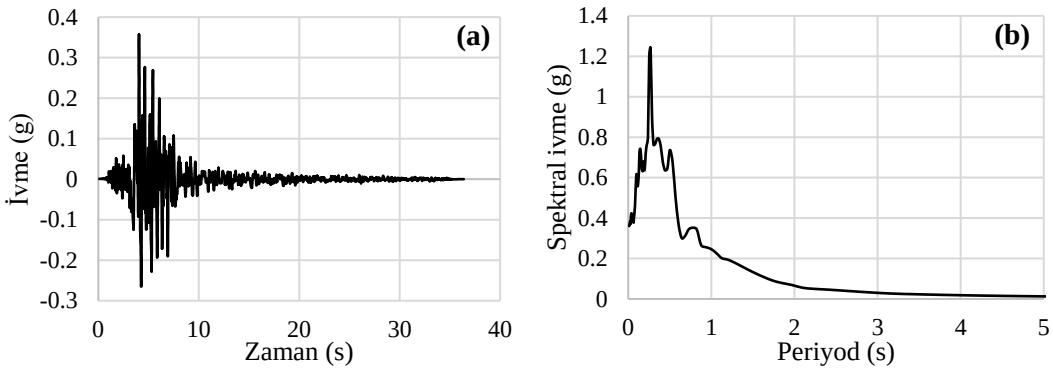
üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı maksimum yer ivmesinin hangi değerde ED ve DO sonuçlarını değiştirmeye başladığını ortaya koymaktır.

2. Materyal ve metot
2. Material and method

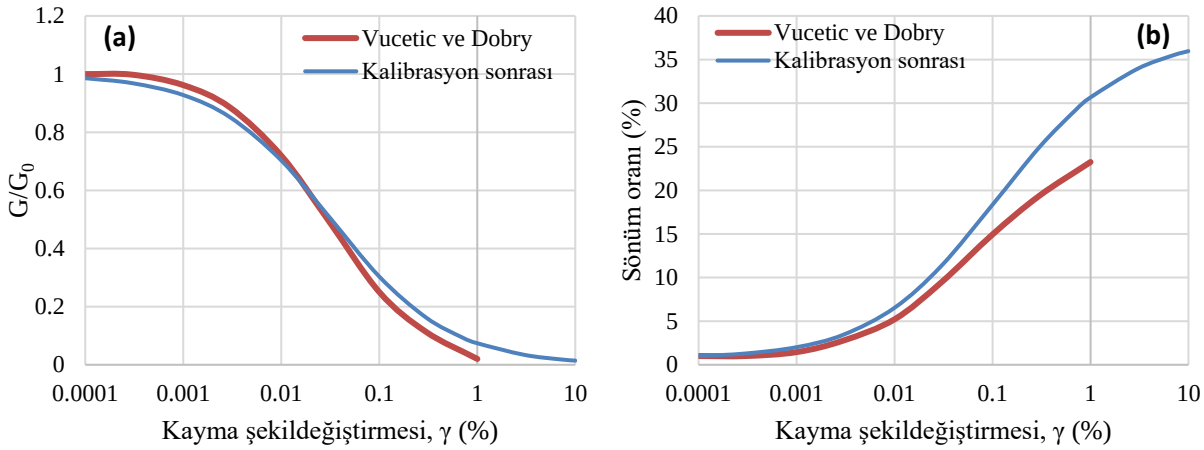
Bu çalışmada 30m kalınlığa sahip killi homojen bir zemin tabakasının sismik davranışı araştırılmaktadır. Bu sebeple Deepsoil (Hashash vd., 2017) paket programında oluşturulan model Şekil 1'de görülmektedir. Homojen tabaka 5m'lik alt tabakalara bölünmüş, modelin tabanı ise rijit kabul edilmiştir. Killi zeminin kayma dalgası hızı 400 m/s, yoğunluğu 1940 kg/m3 ve poisson oranı 0.4 olarak belirlenmiştir. Zeminin tabanı rijit olarak dikkate alınmıştır. Analizlerde Friuli depreminin Tolmezzo kaydının maksimum yer ivmesi 0.05g, 0.25g, 0.5g, 0.75g ve 1g değerlerine ölçeklenerek 5 farklı kayıt kullanılmıştır. Orijinal kayıt ve kayda ait tepki spektrumu Şekil 2'de verilmektedir. Kaydın deprem büyüklüğü 6.5, maksimum yer ivmesi 0.357g ve merkez üssünden uzaklığı 23 km'dir. Kötü bir zemini temsil etmesi açısından killi zeminin plastisite indisi (PI) %0 kabul edilmiş ve kayma modülü azalımı (G/G_0-γ) ile sönüm değişimi (ξ-γ) kayma birim şekildeğiştirme ilişkisi için literatürde geçerliliği olan Vucetic & Dobry (1991) tarafından geliştirilen eğriler kullanılmıştır (Şekil 3). Histeretik yükleme-boşaltma davranışı için Masing kriteri (Masing, 1926) kullanılmıştır. Analizlerde Deepsoil'de mevcut olan Konder & Zelasko (1963) malzeme modeline dayanan model kullanılmıştır. Modifiye Konder Zelasko olarak bilinen bu model iskelet eğrisini oluşturan Beta (β) ve s olmak üzere iki ek parametre kullanmaktadır. Deepsoil'de bulunan bir eğri uydurma aracı, belirli bir kayma modülü ve sönüm eğrileri için model parametrelerini deneysel sonuçlara göre kalibre etmek için kullanılır. Bu araç kullanılarak belirlenen zemin davranışı Şekil 3'te, zemin model parametreleri ise Tablo 1'de verilmektedir. Eğri uydurmanın önemli bir avantajı da mevcut deneysel çalışmalara göre şekildeğiştirme düzeyinin %10'a kadar belirlenebilmesidir.



Şekil 1. Oluşturulan 1B zemin modelin özellikleri ve görünümü: Çizim (Sol), Deepsoil (Sağ)
Figure 1. *Properties and view of generated 1D soil model: Drawing (Left), Deepsoil (Right)*



Şekil 2. Friuli depremi tolmezzo kaydının (a) ivme-zaman değişimi ve (b) tepki spektrumu
Figure 2. *(a) Acceleration-time and (b) response spectrum of Tolmezzo record of Friuli earthquake*



Şekil 3. Killi zemin (PI=0) için (a) Kayma modülü ve (b) Sönüm değişimi
Figure 3. *Variation of (a) Shear modulus (b) Damping for Clay soil (PI=0)*

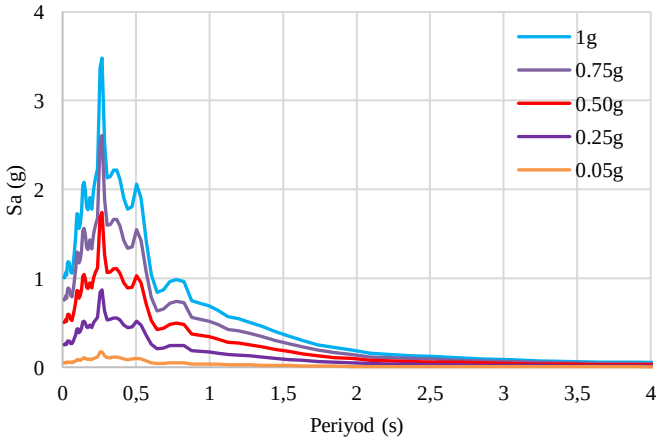
Tablo 1. Killi zemin için belirlenen MKZ model parametreleri
Table 1. *MKZ model parameters determined for clay soil*

Tanım	Kil (PI=%0)
Küçük şekildeğiştirme sönüm oranı[1], ξ (%)	0.7675
Referans şekildeğiştirme[2], γ_r (%)	0.0546
Referans gerilme (MPa)	0.180
Model parametresi, β	1.470
Model parametresi, s	0.735

[1] Basınç bağımlı (sönüm eğrisi) parametresi d=0
[2] Basınç bağımlı (referans şekildeğiştirme) parametresi b=0

3. Bulgular ve tartışma
3. Results and discussion

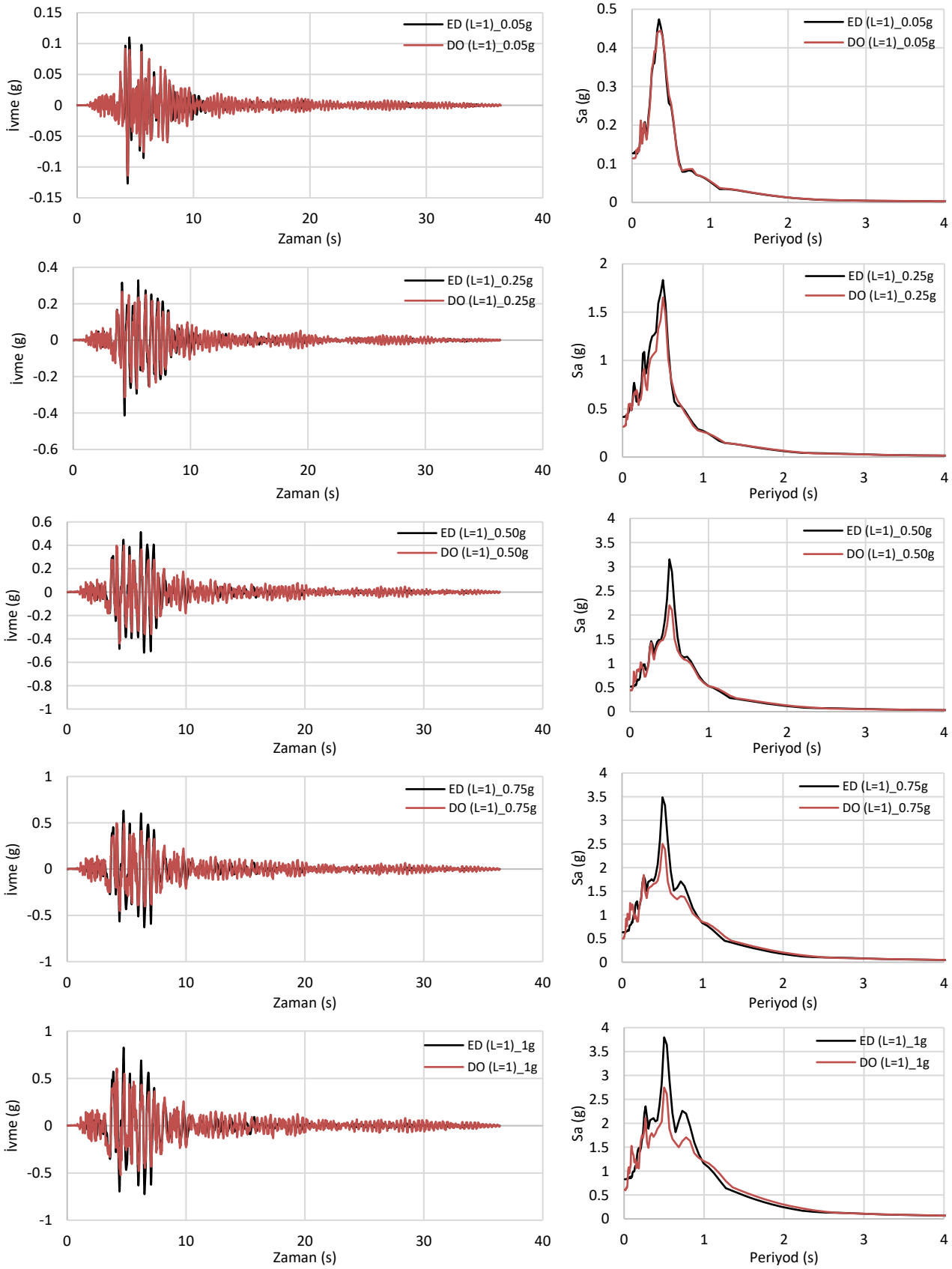
Bu çalışmada 5 adet ED ve 5 adet DO model analiz sonuçlarından elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak tartışılmaktadır. Çalışma kapsamında deprem kayıtlarının ölçeklenmiş tepki spektrumları Şekil 4'te verilmektedir. Analizlerde boşluk suyu basıncının değişimi dikkate alınmamıştır.



Şekil 4. Ölçeklenmiş kayıtların tepki spektrumlar
Figure 4. *Response spectrums of scaled records*

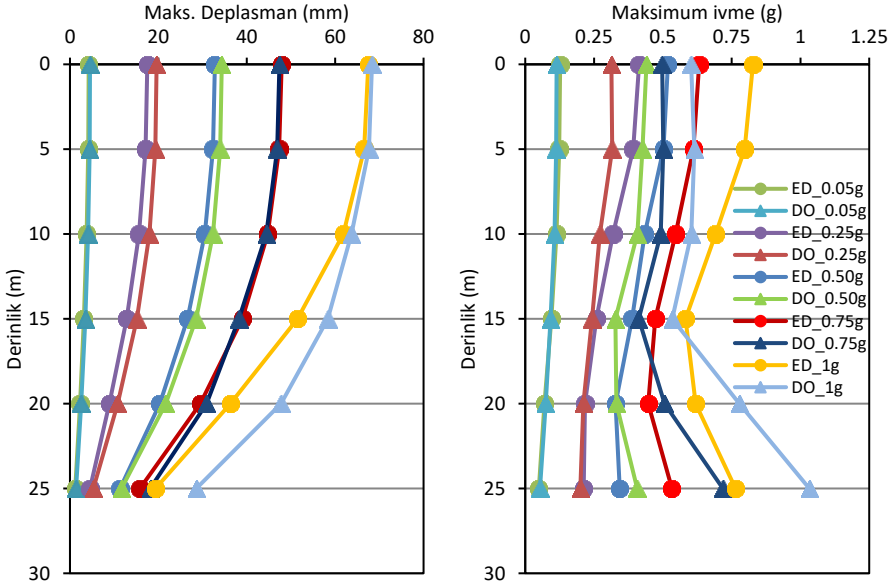
Zemin üst yüzünde (tabaka 1) farklı genlikler için gerçekleştirilen ED ve DO analizlerden elde edilen ivme-zaman kayıtları ve bu kayıtlara ait tepki spektrumları Şekil 5'te verilmiştir. Grafikler incelendiğinde düşük genliklerde ED ve DO analizler uyumlu iken genlik büyüdükçe ED analizler doğrusal analiz tabanlı olduğundan DO analizlere göre daha büyük tepkiler ortaya koymaktadır. Bu sonuca göre ED yöntemin

literatürle uyumlu bir şekilde (Stewart vd., 2008) 0.25g genliğe kadar DO davranışı temsil edebildiğini, 0.5g genlikte ise DO davranışı yansıtamadığını göstermektedir. Maksimum yer ivmesi değerinin 0.5g'nin üzerinde olduğu durumlarda ED sonuçların DO sonuçlardan uzaklaşacağı ve DO davranışı temsil edemeyeceği belirtilmelidir.



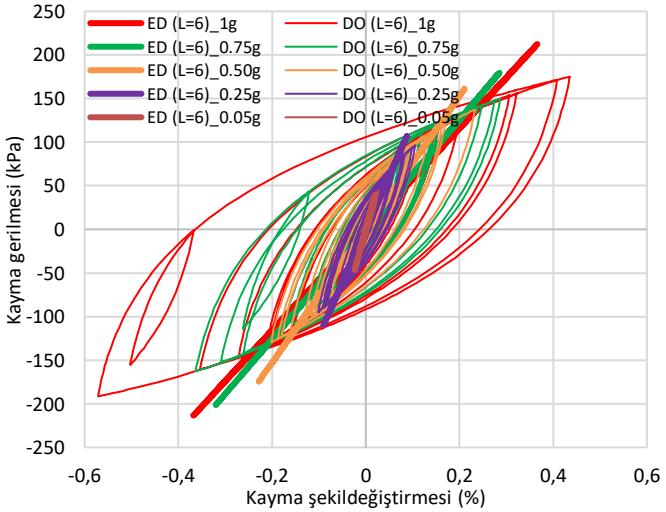
Şekil 5. Zemin üst yüzünde farklı genliklerde ivme-zaman ilişkisi ve tepki spektrumu
Figure 5. *Acceleration-time and response spectrum of surface for various amplitudes*

Gerçekleştirilen analizlerde maksimum deplasman ve ivmenin derinlikle değişimi Şekil 6'da verilmektedir. Deplasman değişimine bakıldığında 1g sonuçları hariç bütün modellerde uyumlu sonuçlar görülmektedir. Öte yandan ivme değişiminde küçük genliklerde uyumlu sonuçlar göze çarparken genlik büyüdükçe sonuçların da birbirinden uzaklaştığı ve ED analiz sonuçlarının DO'na göre daha büyük ivmeler ürettiği anlaşılmaktadır. Büyük genliklerde tabanda ivme değerlerinin daha büyük olmasının sebebi ise rijit taban olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6. Maksimum deplasman ve ivmenin derinlikle değişimi
Figure 6. *Variation of maximum displacement and acceleration with depth*

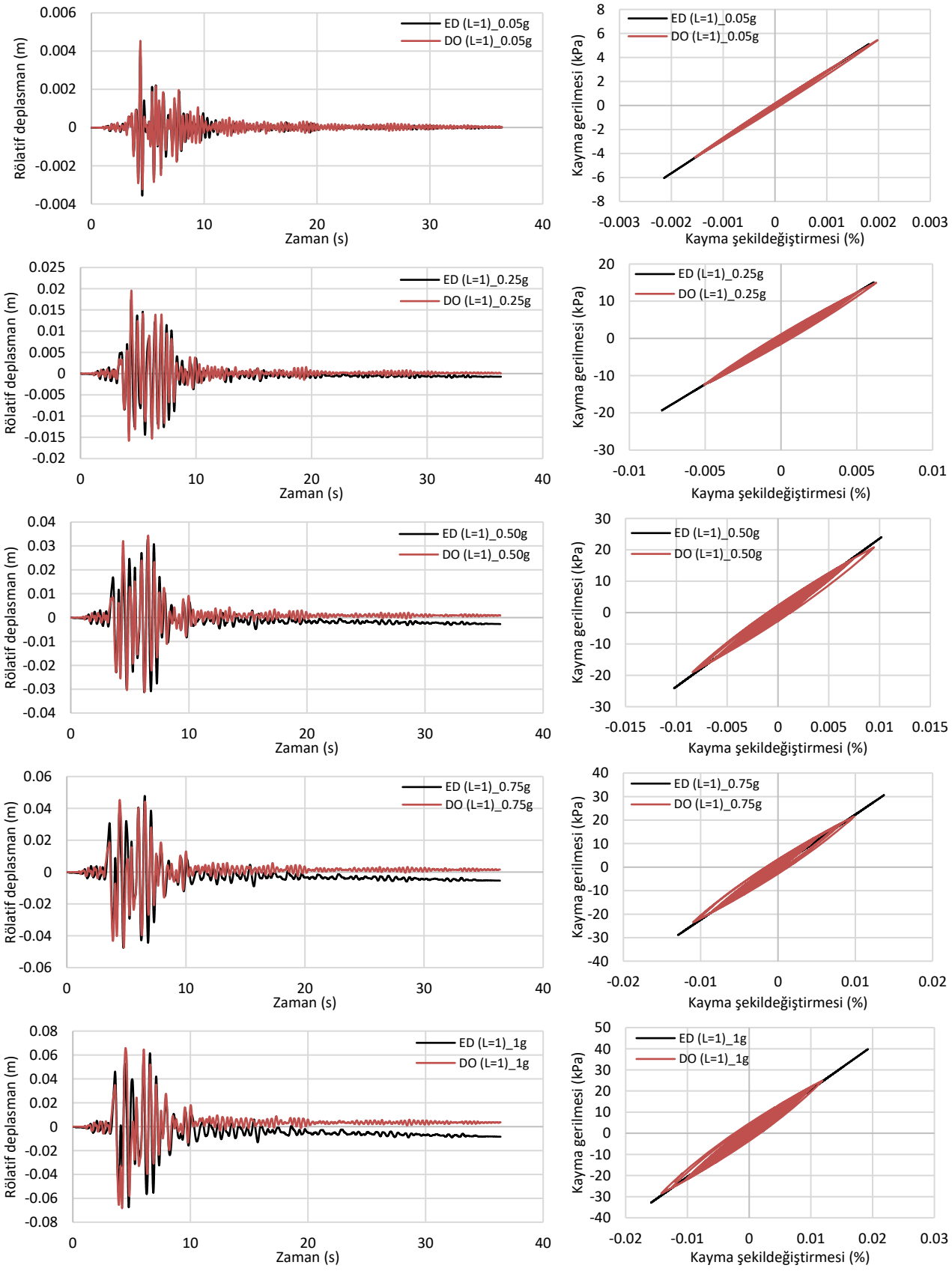
Rijit tabanın üstündeki tabakada farklı genliklerde meydana gelen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekil 7 incelendiğinde küçük genliklerde doğrusala yakın davranış hakim olduğundan ED modelin rijitliği DO modelin rijitliğine yakın olmakta ve benzer davranış sergilemektedir. Ancak genlik büyüdükçe DO davranış hakim olduğundan başlangıç kayma modülü ile nihai kayma modülü arasında önemli bir fark ortaya çıkmakta ve ED modelin sonuçları DO modelin sonuçlarından önemli oranda farklılık oluşmaktadır.



Şekil 7. Taban tabakada farklı genliklerdeki kayma gerilmesi-şekildeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması
Figure 7. *Comparison of shear stress-strain relationships at different amplitudes in the base layer*

Zemin üst yüzünde (Tabaka 1) farklı genlikler için gerçekleştirilen ED ve DO analizlerden elde edilen deplasman-zaman ve kayma gerilmesi-şekildeğiştirme eğrileri Şekil 8'de verilmiştir. Deplasman zaman ilişkileri dikkate alındığında maksimum genlik arttıkça ED analiz sonucunda meydana gelen kalıcı şekildeğiştirmelerin DO sonuçlara göre daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Kayma gerilmesi-

şekildeğiştirme ilişkisi incelendiğinde ED analizlerden elde edilen maksimum şekildeğiştirme düzeyi DO sonuçların üzerinde kalmaktadır. Bu durumda ED analizlerin daha büyük şekildeğiştirmelere ve deplasmanlara sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Zemin üst yüzünde farklı genliklerde deplasman-zaman ve kayma gerilme şekildeğiştirme ilişkisi
Figure 8. *Displacement-time and shear stress strain relations at the surface for various amplitudes*

4. Sonuçlar
4. Conclusions

Bu çalışma kapsamında homojen killi zeminlerde maksimum yer ivmesi değerinin ED ve DO zemin davranış analizleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 30m derinliğe sahip 1B model oluşturulmuştur. Model tabanının rijit kabul edildiği model farklı genliklerdeki kayıtlar altında gerçekleştirilen ED ve DO analiz sonuçları aşağıda maddeler halinde değerlendirilmiştir:

- İvme-zaman değişimi dikkate alındığında maksimum yer ivmesi arttıkça ED yöntemin DO davranışı temsil edemediği ortaya çıkmıştır.
- Zemin yüzündeki ED ve DO tepki spektrumları karşılaştırıldığında büyük yer ivmelerinde ED yöntemin DO yönteme göre daha büyük tepkiler ürettiği görülmüştür.
- Zemin yüzündeki deplasman-zaman ilişkileri açısından ED yöntemin zeminde kalıcı plastik şekildeğiştirmelere sebep olduğu anlaşılmıştır.
- Kayma gerilmesi-şekildeğiştirme davranışı dikkate alındığında ED yöntemin zemin yüzünde daha büyük şekildeğiştirmelere neden olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma homojen killi bir zemin için geçerli olmakla beraber başka tür zeminler için ayrıca araştırılması gerekmektedir. Bu sonuçlar ışığında homojen killi bir zeminde ED yöntemin kullanılabileceği maksimum yer ivmesi değerinin literatürle uyumlu şekilde 0.25-0.50g arasında olacağı söylenebilir. Bu aralığın zemin türü, tabakalanma, deprem frekans içeriği gibi birçok parametreye bağlı olduğunu hatırlatmak gerekir. Maksimum yer ivmesinin ED ve DO yöntem üzerindeki etkisinin gelecek çalışmalarda daha kapsamlı araştırılması önem arz etmektedir. Tabakalanmanın, kumlu zemin türlerinin ve sıvılaşmanın etkisi araştırılabilecek etmenler arasındadır.

Yazar katkısı
Author contribution

Mehmet Ömer Timurağaoğlu: Yazma-inceleme ve düzenleme, Orijinal taslak, Doğrulama, Kavramsallaştırma

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Astroza, R., Pastén, C., & Ochoa-Cornejo, F. (2017). Site response analysis using one-dimensional equivalent-linear method and Bayesian filtering. Computers and Geotechnics, 89, 43-54. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.04.004

Bilotta, E., De Sanctis, L., Di Laora, R., D'Onofrio, A., & Silvestri, F. (2015). Importance of seismic site response and soil–structure interaction in dynamic behaviour of a tall building. Geotechnique, 65(5), 391-400. https://doi.org/10.1680/geot.SIP.15.P.016

Bolisetti, C., Whittaker, A. S., Mason, H. B., Almufti, I., & Willford, M. (2014). Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear structures. Nuclear Engineering and Design, 275, 107-121. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.04.033

Carlton, B., & Tokimatsu, K. (2016). Comparison of Equivalent Linear and Nonlinear Site Response Analysis Results and Model to Estimate Maximum Shear Strain. Earthquake Spectra, 32(3), 1867-1887. https://doi.org/10.1193/021215EQS029MR1

Civelekler, E., Afacan, K. B., Volkan Okur, D., (2021). Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlara göre sismik yük etkisindeki zeminlerde davranış analizi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(2), 158-171. https://doi.org/10.31796/OGUMMF.839703

Fatahi, B., & Tabatabaiefar, S. H. R. (2014). Fully Nonlinear versus Equivalent Linear Computation Method for Seismic Analysis of Midrise Buildings on Soft Soils. International Journal of Geomechanics, 14(4), 04014016. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000354

Han, B., Zdravković, L., & Kontoe, S. (2018). Analytical and numerical investigation of site response due to vertical ground motion. Géotechnique, 68(6), 467-480. https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.191

Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Ilhan, O., Groholski, D. R., Philips, C. A., & Park, D. (2017). DEEPSOIL 7.0, User Manual.

Idriss, I. M., & Seed, H. B. (1968). Seismic Response of Horizontal Soil Layers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 94(4), 1003-1031. https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001163

Kara, F. İ., & Şahin, B. (2022). Sahaya Özel Zemin Davranış Analizlerinde Profil Derinliği Değişiminin İncelenmesi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 8(1), 37-52. https://doi.org/10.21324/DACD.855902

Kaklamanos, J., Bradley, B. A., Thompson, E. M., & Baise, L. G. (2013). Critical Parameters Affecting Bias and Variability in Site-Response Analyses Using KiK-net Downhole Array Data. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(3), 1733-1749. https://doi.org/10.1785/0120120166

Kim, B., & Hashash, Y. M. A. (2013). Site response analysis using downhole array recordings during the March 2011 Tohoku-Oki earthquake and the effect of long-duration ground motions. Earthquake Spectra, 29(SUPPL.1), 37-54. https://doi.org/10.1193/1.4000114

Kim, B., Hashash, Y. M. A., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Harmon, J. A., Musgrove, M. I., Campbell, K. W., & Silva, W. J. (2016). Relative Differences between Nonlinear and Equivalent-Linear 1-D Site Response Analyses. Earthquake Spectra, 32(3), 1845-1865. https://doi.org/10.1193/051215EQS068M

Konder, R. L., & Zelasko, J. S. (1963). A hyperbolic stress-strain formulation of sands. Proceedings of the 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 289-324.

Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Kramer, S. L., & Paulsen, S. B. (2004). Practical use of geotechnical site response models. Proceedings, Int. Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, PEER Center Headquarters, Richmond, California, 1-10.

Masing, G. (1926). Eigenspannungen und verfestigung beim messing. In Proceedings, second international congress of applied mechanics, 332-335.

Matasovic, N., & Hashash, Y. M. A. (2012). Practices and Procedures for Site-Specific Evaluations of Earthquake Ground Motions (A Synthesis of Highway Practice). https://doi.org/10.17226/14660

Nghiem, H. M., & Chang, N.-Y. (2019). A new viscous damping formulation for 1D linear site response analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 127, 105860. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105860

Rathje, E. M., Kottke, A. R., & Trent, W. L. (2010). Influence of Input Motion and Site Property Variabilities on Seismic Site Response Analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(4), 607-619. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000255

Schnabel, P. B., Lysmer, J. L., & Seed, H. B. (1972). SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Stanko, D., Gülerce, Z., Markušić, S., & Šalić, R. (2019). Evaluation of the site amplification factors estimated by equivalent linear site response analysis using time series and random vibration theory based approaches. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 117, 16-29. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.007

Stewart, J. P., Kwok, A. O., Hashash, Y. M. A., Matasovic, N., Pyke, R., Wang, Z., & Yang, Z. (2008). Benchmarking of Nonlinear Geotechnical Ground Response Analysis Procedures.

Sun, R., & Yuan, X. (2021). A holistic equivalent linear method for site response analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 141(October 2020), 106476. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106476

Timurağaoğlu, M. Ö., Fahjan, Y., & Dogangun, A. (2021). Bir ve üç boyutlu zemin davranış analizlerinin karşılaştırılması. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, X, 1-6. https://doi.org/10.5505/pajes.2021.40565

Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of Geotechnical Engineering, 117(1), 89-107.

Wolf, J. P. (1985). Dynamic soil-structure interaction. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I., & Miura, K. (2002). Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(3), 205-222. https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00011-8

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 11-20 doi: 10.17714/gumusfenbil.1444495 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Yosun gübresi ve mikoriza uygulanmasının mercimek bitkisi rizosfer bölgesinin biyolojik aktivitesine etkileri

Effects of seaweed fertilizer and mycorrhiza application on the biological activity of lentil rhizosphere soil

Çiğdem KÜÇÜK*[1], Meryem DEMİR[2]

[1]*Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 63050, Şanlıurfa*

[2]*Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 63050, Şanlıurfa*

• Geliş tarihi / *Received*: 28.02.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 19.12.2024

Öz

Bu çalışmada, mercimek bitkisinin gelişimi ve rizorferdeki bazı mikrobiyolojik özellikler üzerinde yosun gübresi ve mikorizanın ayrı ayrı ve birlikte etkisini belirlemek amaçlanmıştır. Deneme doğal ışık alan serada tesadüf parselleri deneme desenine göre 5 tekerrürlü olarak yürütülmüştür. Denemede ticari olarak satılan yosun ve mikoriza gübreleri kullanılmıştır. Biyostimülant olarak satılan sıvı yosun gübresi, su ile birlikte topraklara dört dozda (%0, %1, %2 ve %4), mikoriza ise 2 dozda (mikorizalı ve mikorizasız) uygulanmıştır. Bitkiler ekimden 15 hafta sonra hasat edilmiştir. Elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirmesine göre, uygulamaların kontrole göre önemli ($p<0.05$) derecede farklılık gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek yeşil aksam ağırlığı yosun gübresinin %1'lik uygulanması ile elde edilmiştir. Mikoriza ve %0.2'lik yosun gübresinin birlikte uygulanması ile bitki yeşil aksam boyu ve kök uzunluğu diğer uygulamalara göre daha fazla artmıştır. Mikoriza ve %1'lik yosun gübresinin birlikte uygulanması kök kuru ağırlığı, yaprakların klorofil içerikleri, kök bölgesi (rizosfer) β-glukosidaz, dehidrogenaz, alkalin fosfataz enzim aktiviteleri ve CO_2 içeriği üzerine etkili olmuştur. Mikoriza ve yosun gübresinin birlikte uygulanması, mercimek bitkilerinin temel gelişme özelliklerini de iyileştireceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Biyostimülant, Mercimek, Mikoriza, Rizosferin biyolojik özellikleri, Yosun gübresi

Abstract

The aim of this study was to determine the effects of seaweed fertilizer and mycorrhiza on the development of lentil plants and some microbiological properties in the rhizosphere, separately and together. The experiment was carried out in a greenhouse with natural light according to a randomized plot design with 5 replications. Commercially available seaweed and mycorrhizal fertilizers were used in the experiment. Liquid seaweed fertilizer sold as a biostimulant was applied to the soil with water at four doses (0%, 1%, 2% and 4%), while mycorrhiza was applied at two doses (with and without mycorrhiza). Plants were harvested 15 weeks after planting. According to the statistical evaluation of the results obtained, it was determined that the applications showed significant ($p<0.05$) differences compared to the control. The highest green parts weight was obtained with 1% seaweed fertilizer application. With the combined application of mycorrhiza and 0.2% seaweed fertilizer, plant green parts length and root length increased more than other applications. The combined application of mycorrhiza and 1% seaweed fertilizer was effective on root dry weight, chlorophyll contents of leaves, root zone (rhizosphere) β-glucosidase, dehydrogenase, alkaline phosphatase enzyme activities and CO_2 content. Although the application doses of seaweed fertilizer showed differences in their effects on the basic growth parameters of lentil plants, the combined application of mycorrhiza and seaweed fertilizer showed that it increased both plant development and microbiological properties of rhizosphere soil.

Keywords: *Biostimulant, Lentils, Mycorrhiza, Biological properties of the rhizosphere, Liquid seaweed fertilizer*

*Çiğdem KÜÇÜK; ckucuk@harran.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Tarım arazilerinin sürekli işlenmesi nedeniyle dünya genelinde toprakların; bitki büyümesi ve verimi için gerekli olan temel besin maddeleri bakımından fakir olduğu bildirilmiştir (Al-Karaki, 2013). Kimyasal gübreler kullanılarak verimi artırmak için yeni arayışlar hız kazanmıştır (Subhashini, 2016; Anlı vd., 2020). Kimyasal gübrelerin yanlış ve aşırı kullanımı toprak kalitesini, verimliliğini ve insan sağlığını olumsuz etkileyerek yetiştiricileri büyük kayıplara uğratmıştır (Rivera-Becerril vd., 2017). Tarım topraklarına her yıl büyük miktarlarda kimyasal gübre uygulanmaktadır (Baligar vd., 2001; Rivera-Becerril vd., 2017). Artan dünya nüfusu için gıda üretimini artırmak amacıyla, kullanılan kimyasal gübre oranlarının gelecekte artacağı tahmin edilmektedir (Cordell vd., 2009). Kimyasal gübre girdilerini en aza indirmek için çeşitli agroekolojik uygulamalar araştırılmıştır. Biyo-gübreler bu uygulamalar arasında yer almakta ve bitki verimliliğinin sürdürülmesinde etkili görünmektedir (Sumbul vd., 2017). Rizosfer; bitki, toprak ve mikroorganizma arasındaki etkileşimin belirlenmesinde oldukça önemli bir alandır. Rizosfer mikroorganizmalarının, organik asitlerin, amino asitlerin, karbonhidratların ve ikincil metabolizma ürünlerinin salınımına katkıda bulunduğu (Chen vd., 2022), organik maddenin parçalanması ve dönüşümünden ve buna eşlik eden besin maddelerinin salınımından bitki hormonunun oluşumundan, bitkinin mineral beslenmesinin iyileştirilmesi ve toprak agregatının oluşumundan sorumlu olduğu bildirilmiştir (Chen vd., 2022). Kolonizasyondan sonra, kökle ilişkili mikrobiyal topluluklar, besin maddelerinin kullanımını ve bulunabilirliğini artırarak, fitohormonları sentezleyerek ve patojenlere karşı direnç göstererek bitki büyümesini ve sağlığını destekleyebilmiştir (Ait-El-Mokhtar vd., 2019). Ekili topraklara besin girdileri, mikrobiyal topluluk yapısını ve aktivitelerini değiştirebilmektedir (Ait-El-Mokhtar vd., 2019; Shukla vd., 2019). Bu nedenle, gübreleme sonunda rizosferin mikrobiyolojik özelliklerinin de incelemesi topraklara verilen biyostimülantların etkinliğinin belirlenmesi açısından önemlidir (Chen vd., 2022; Ait-El-Mokhtar vd., 2019). Kimyasal gübreler tarımda yaygın olarak kullanıldığından, kimyasal gübrenin uzun süreli ve aşırı uygulanması; mikrobiyal çeşitliliği azaltabilmekte sonuçta bitki-mikroorganizma etkileşimini zayıflayabilir, toprağın mikrobiyal işlevini düzensizleşebilir, bu durum bitkilerin topraktan alacağı besin elementlerini azaltmakta ve toprak sağlığını olumsuz etkileyeceğinden uzun vadede sürdürülebilir toprak verimliliği engellenebilmektedir (Anlı vd., 2020). Bu sorunun çözümü için toprak mikrobiyomunu yönetmek, toprağın mikrobiyal çeşitliliğini korumak, organik gübre veya biyostimülantları ekleyerek toprağı desteklemek önerilmiştir (Rasouli vd., 2023; Shukla vd., 2019).

Arbusküler mikorizal mantarlar ve sıvı deniz yosunu ekstraktları, özellikle toprakların organik besin açısından fakir olduğu kurak ve yarı kurak bölgelerde sürdürülebilir tarımın sağlanması için önemli stratejilerden biri haline gelmiştir (Rady vd., 2018). Mikorizalar, bitkilerle simbiyotik bir ilişki kurabilen mikroorganizmalar olarak adlandırılmıştır (Van Der Heijden vd., 2015). Çeşitli çalışmalar, mikoriza uygulamasının bitki büyümesi ve mineral beslenmesinin iyileştirilmesi, abiyotik ve biyotik streslere karşı tolerans kazanması gibi yararlı etkilerini doğrulamıştır (Meddich vd., 2015; Wicaksono vd., 2018; Ait-El-Mokhtar vd., 2019). Benzer şekilde, sıvı yosun gübresi de bitki büyümesini ve verimini artırma yetenekleriyle değerlendirilmiştir (Abd El-Gawad & Osman, 2014).

Sıvı yosun gübresinin bitki gelişimi üzerindeki etkileri, soya fasulyesi, mısır, çeltik, patlıcan, muz ve kabak gibi yüksek ekonomik değere sahip çok sayıda ürünü içeren denemelerle kanıtlanmıştır (Roshdy, 2014; Rouphael vd., 2017; Ağırağaç ve Zorer Çelebi, 2022). Deniz yosununun içeriğindeki makrobesin ve mikro element besin maddeleri, büyüme hormonları, amino asitler, vitaminler, betainler, sitokininler ve steroller, bitkisel üretimde verimi artırmıştır (De Pascale vd., 2017). Deniz yosunu ekstraktları fizyolojik ve biyokimyasal süreçte değişikliklere neden olarak besin alımının artmasına ve bitkinin daha iyi büyümesine yol açmış, tohumların erken çimlenmesini teşvik etmiş, kök büyümesini iyileştirmiş, yaprak klorofil içeriğini ve bitki verimini artırmış, bitkilerin biyotik ve abiyotik strese karşı direncini arttırmıştır (Anlı vd., 2020; Ağırağaç ve Zorer Çelebi, 2024). Ayrıca deniz yosunu ekstraktları toprağın fiziko-kimyasal ve biyolojik özelliklerini de iyileştirmiştir (Yakhin vd., 2017). Deniz yosunu ekstraktının topraklara eklenmesinin domates, mısır, buğday vb. ürünlerde faydalı olduğu kanıtlanmıştır (Shukla vd., 2019). Mikoriza ve deniz yosunu ekstraktları toprakta ve bitkilerde meydana gelen metabolik süreçleri artırarak besin kazanımını ve translokasyonunu kolaylaştırabilir. Örneğin, mikoriza veya yosun ekstraktlarının topraklara eklenmesi, toprakta bulunan fosfor ve azotun mineral değişimini tetikleyerek bu besin maddelerinin bitkiler tarafından kullanılabilir olmasını sağlamıştır (De Pascale vd., 2017; Lucini vd., 2019; Shukla vd., 2019). Kanada ve Hindistan mercimek ekiminde dünyada ilk sırada yer almakta bunu Avustralya, Amerika ve Türkiye

izlemektedir (Gülaç, 2022). Mercimek, besin değerleri bakımından zengin olmakla birlikte, üretimi yapılan toprakta olumlu etkilerde bulunmalarıyla da önemlidir (Gülaç, 2022). Çalışmamızda topraktan uygulanan sıvı yosun gübresi ve mikorizanın mercimek bitkisinin temel büyüme özellikleri ile rizosfer bölgesinde bazı toprak mikrobiyolojik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve yöntem
2. Material and method

Çalışmamızda mecimek bitkisi tohumu materyal olarak kullanılmıştır. Mercimek tohumları, sıvı yosun gübresi ve mikoriza gübresi ticari olarak temin edilmiştir. Sıvı yosun gübresinin organik madde içeriği %12, pH'ı 6, suda çözünür potasyum oksit içeriği %3, Aljinit asit miktarı %0.3, EC; 13.56 dS/m'dir. Ticari olarak temin edilen Mikorizal gübre içerisinde *Glomus mosseae, G.intraradices, G.clarum, G.monosporus, G. deserticola, G. brasilianum, G. aggregatum, Gigaspora margarita, G.etunicatum, G.fasciculatum* bulunmakta, ürün içerisinde spor sayısı $1x10^5$ propagül/pkt'tür. Denemede kullanılan toprağın bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Toprak örneklerinin analizi GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü'nde yaptırılmıştır. Çalışmada kullanılan toprak 121 ^oC'de ardışık 3 gün otoklavda steril edilmiş, 2 kg'lık saksılara doldurulmuştur. Çalışma, doğal ışık alan serada gerçekleştirilmiştir. Tohumlar seyreltilmiş soyum hipoklorit ve steril distile su (1:2; v:v) karışımı ile yüzey sterilizasyonu yapıldıktan sonra kurutma kağıtları üzerinde nemleri alınmış ve daha sonra saksılara 10'ar adet ekilmiş (26 Ekim 2022), çimlenme sonunda her saksıda 3 bitki kalacak şekilde seyreltilmiştir. Bitkiler gerektiğinde %75 tarla kapasitesinde tartılarak çeşme suyu ile sulanmıştır. Deney, her biri beş tekrarlı olarak tesadüf parselleri deneme desenine göre kurulmuştur. Mikorizalı ve mikorizasız yosun gübresinin kontrol (%0), %0.2, %0.4 ve %1'lik dozları saksılara uygulanmıştır. Mikoriza ekimle birlikte tohum yatağına uygulanmıştır. Hasat; ekimden 15 hafta sonra (2 Şubat 2023) yapılmış, besin eksikliği olan bir sistemi korumak ve uygulanan mikorizal suşun enfektivitesini teşvik etmek için topraklara hiçbir kimyasal gübre uygulanmamıştır.

Tablo 1. Denemede kullanılan toprağın bazı özellikleri
Table 1. *Some properties of the soil used in the experiment or the trial*

Toprak derinliği	pH	EC (dS/m)	Organik madde (%)	Kum (%)	Kil (%)	Silt (%)	Toprak tekstürü	Yarayışlı fosfor (kg/da)
0-30	8.08	0.95	1.70	19.37	60.02	20.61	Killi	4. 88

2.1.Temel bitki gelişme parametreleri
2.1.Basic plant growth parameters

Deneme sonunda her bir saksıdaki bitkinin bitki boyu (Elkoca, 1997), kök uzunluğu (Goertz & Coons, 1991), yeşil aksam ve kök kuru ağırlıkları (Elkoca, 1997) belirlenmiştir. Her bir uygulamadan, hasat öncesi alınan yaprak örneklerinde klorofil tayini Küçük vd. (2024)'e göre belirlenerek hesaplanmıştır.

2.2.Kök bölgesi toprakların bazı mikrobiyolojik özellikleri
2.2. Some microbiological properties of root zone soils

Hasat zamanı; her bir uygulamanın olduğu saksıdaki bitkilerin köklerine yapışan topraklar alınarak steril torbalara konulmuş, bekletilmeden laboratuvara getirilen topraklarda aşağıda verilen mikrobiyolojik analizleri yapılmıştır.

2.2.1.Mikrobiyal toprak solunumu (CO_2 oluşumu)
2.2.1.Microbial soil respiration (CO_2 formation)

Kök bölgesi topraklarında solunum lsermayer yöntemine göre yapılmıştır. Toprak örneği, BaOH içeren kapaklı şişelere eklenmiş, alkali çözelti içinde tutulan CO_2, HCl çözeltisi ile titre edilerek mg CO_2/100 g toprak olarak hesaplanmıştır (Küçük & Cevheri, 2019).

2.2.2.Beta-glukosidaz enzim aktivitesi
2.2.2.Beta-glucosidase enzyme activity

Her bir uygulamadaki toprağın beta-glukosidaz aktivitesi Küçük & Şinşek (2018)'e göre yapılmıştır. Toprak örneğine; toluen, MUB tamponu (pH 6), p-nitrofenil β-D-glukopiranosid eklenerek 60 dakika boyunca 37°C'de inkübasyona bırakılmıştır. Süre sonunda, karışıma 0.5 M $CaCl_2$ ve 0.1 M THAM solüsyonları eklemiş, karıştırılmış ve 12.000 x g'da 10 dakika santrifüjlenmiştir. Santrifüj sonrası elde edilen süpernatant 410 nm dalga boyunda spektrofotmetrede ölçülmüştür (Küçük & Şinşek, 2018).

2.2.3.Dehidrogenaz aktivite
2.2.3.Dehydrogenase activity

Her bir uygulamadaki toprak örneklerinin dehidrogenaz aktivitesi Küçük & Cevheri (2019)'e göre yapılmıştır. Toprak örneğinin üzerine %3'lük TTC (2,3,5-trifenil tetrazolium klorür) çözeltisi distile su eklenerek 25 ^{o}C'de 24 saat inkübe edilmiştir. Süre sonunda oluşan 1,3,5 trifenil formazon 485 nm dalga boyunda spektrofotometrede okunmuştur. Sonuç mg TPF/g toprak olarak hesaplanmıştır.

2.2.4.Alkalin fosfataz aktivitesi
2.2.4.Alkaline phosphatase activity

Her bir uygulamada toprak örneklerindeki alkalin fosfataz enzim aktivitesi Küçük & Cevheri (2019)'a göre yapılmıştır. Rizosfer toprak örneğine sırası ile toluen, MUB (pH 11), p-nitrofenilfosfat eklenmiş, karıştırılmış ve 37°C'de 1saat inkübe edilmiştir. Süre sonunda örneklere $CaCl_2$ ve NaOH eklenerek 12.000 g'de 7 dakika santrifüjlenmiştir. Elde edilen süpernatant 410 nm dalga boyunda spektrofotmetrede ölçülmüştür (Küçük & Şinşek,2018).

2.3.İstatistik analiz
2.3.Statistical analysis

Uygulamalar arasındaki farklılıkları belirlemek amacıyla, deneme sonunda elde edilen veriler JMP11 istatistik programında analiz edilmiştir. Elde edilen ortalama değerler arasındaki farklılıklar $p<0.05$ önem seviyesinde karşılaştırılmıştır.

3. Bulgular ve tartışma
3.Results and discussion

Bu çalışmada kullanılan mikoriza ve yosun gübresi uygulamaları mercimek bitkilerinin bitki boyu, kök uzunluğu üzerinde istatistiki olarak önemli bulunmamıştır. Mikoriza ile %0.2'lik yosun gübresinin birlikte uygulanması bitki boyunu kontrole göre %8.75 oranında arttırırken; kök uzunluğu üzerinde Mikoriza ile % 0.2'lik yosun gübresinin birlikte kullanılması %21.4 oranında artışa neden olmuştur. Yeşil aksam kuru ağırlıkta kontrolde mikoriza nispeten etkili olurken; yosun dozları arasındaki fark önemsiz olmakla birlikte, mikorizasız %1 yosun dozu nispeten daha etkili (önemli) olmuştur ($p<0.05$). Mikoriza ve yosun gübresinin %1'lik uygulama dozu yeşil aksam kuru ağırlığını kontrole göre %29 oranında, mikorizasız yosun gübresinin %1'lik dozu yeşil aksam ağırlığını %42.5 oranında artırmıştır. Kök kuru ağırlığında da mikorizalı %1 yosun gübresi; mikorizasız %1'lik yosun gübresine göre nispeten daha etkili bulunmuştur (Tablo 2). Yeşil aksam ağırlığı üzerine mikorizasız yosun gübresinin %1'lik dozu etkili bulunurken ($p<0.05$), kök kuru ağırlığı üzerine mikorizalı %1'lik yosun gübresi uygulaması etkili bulunmuş ($p<0.05$) ve kök kuru ağırlığını %177 oranında arttırmıştır (Tablo 1). Mikoriza aşılamasının bitkilerin büyümesini ve biyokütlesini artırdığı ve bu artışın hormonal seviyelerdeki artışa neden olduğu rapor edilmiştir (Sukumar vd., 2013). Büyüme teşvikinin bitkinin hormonal durumunu değiştirdiğine ve böylece besin emilimini önemli ölçüde artırdığına inanılmaktadır (Rouphael & Colla, 2018).

Son yıllarda birçok tarımsal araştırma, gıda güvenliğini sağlayan çevre dostu yönetim stratejilerinin keşfedilmesine odaklanmıştır (Begum vd., 2018; Ait-El-Mokhtar vd., 2019; Hussain vd., 2021). Sürdürülebilir tarımsal üretim sistemlerinin gelişmesiyle birlikte, bitki verimliliğini artırmak, sürdürülebilir bir ekolojik çevreye ulaşmak için besin uyarıcıları veya simbiyotiklerin kullanılması gerekmektedir. Spesifik

fizyolojik ve moleküler etkileri olan uyarıcılar, besin maddelerinin emilimini ve verimliliğini artırmakta ve ürünlerin verimini ve kalitesini yükseltmektedir (Hussain vd., 2021).

Tablo 2. Mikoriza ve yosun gübresinin bazı temel bitki özelliklerine etkileri
Table 2. Effects of mycorrhiza and algae fertilizer on some basic plant characteristics

Mikoriza uygulaması	Yosun gübresi (%)	Yeşil aksam kuru ağ. (g/bitki)	Kök kuru ağ. (g/bitki)	Bitki boyu (cm)	Kök uzunluğu (cm/bitki)	Klorofil a (mg/l)	Klorofil b (mg/l)
Mikorizalı	0	0.87 cde*	0.09 c	37.7 ab	10.7 a	14.2 f	7.4 d
	0.2	0.70 c	0.18 ab	41 a	13 a	16.4 e	11.3 c
	0.4	0.61c	0.15 bc	33.7 b	10.3 a	20.8 b	16.9 b
	1	1.24 ab	0.25 a	35.3 ab	11.7 a	22.3 a	19.2 a
Mikorizasız	0	0.75 bc	0.16 bc	33.7 b	9.7 a	10.8 h	5.7 e
	0.2	0.91 abc	0.15 bc	32.3 b	10.3 a	12 g	7.6 d
	0.4	0.81 bc	0.10 c	31.7 b	10.3 a	16.9 d	8.5 d
	1	1.39 a	0.21 ab	36 ab	11.3 a	18.6 c	10.4 c

* Farklı harfler birbirinden farklı olan değerleri göstermektedir ($p < 0.05$)

Bu uyarıcıların, özellikle mikrobiyal ve mikrobiyal olmayan uyarıcıların uygulanması, bitkilerin büyümesini ve verimliliğini etkili bir şekilde artırabilir. Biyostimülantların birlikte uygulanmasının etkileri antagonistik veya sinerjik olabilir. Bu etkiler, araştırmacıları işlevsel nitelikleri bakımından belirli performanslara sahip çeşitli biyostimülantlar tasarlamaya ve formüle etmeye teşvik etmiştir (Rouphael & Colla, 2018). Tablo 2'de görüldüğü gibi çalışmamızda da biyostimülant olarak kullanılan mikoriza aşılaması ve %0.2'lik yosun gübresinin birlikte uygulanması bitki boyunu diğer uygulamalara göre artırmıştır ($p<0.05$). Sonuçlarımızla uyumlu olarak, Golubkina vd. (2020) mikoriza kullanımının çörtük bitkisinde büyüme özelliklerini artırdığını rapor etmiştir. Benzer şekilde, Begum vd. (2018) arbusküler mikoriza mantarının simbiyotik bir ilişki yoluyla ve geniş bir hif sistemi oluşturarak bezelye bitkilerinde su ve besin emilimini artırdığını bildirmiştir. Ayrıca, deniz yosunu ekstraktlarının mikro ve makro elementler, vitaminler, amino asitler ile gibberellin ve sitokinin gibi bitki hormonları içerdiği yapılan çalışmalarda açıklandığından (Carrasso-Gill vd., 2018; Hussain vd., 2021), çalışmamızda yosun gübresinin biyostimülant olarak uygulanmasıyla mercimeğin büyüme özelliklerinin kontrole göre artmasının; kökler yoluyla besin ve su emilimine, bitki hormonlarının etkisiyle büyümenin teşvik edilmesine bağlanabilir.

Çalışmamızda mikorizalı ve mikorizasız yosun gübresinin %1'lik dozu diğer dozlarla karşılaştırıldığında yeşil aksam ve kök kuru ağırlığı üzerinde önemli ($p<0.05$) bulunmuştur. Bulgularımızla uyumlu olarak, Alam vd. (2013) yosun gübresinin yapraktan kullanımının çilek, kanola ve çam dahil olmak üzere farklı bitki türlerinin kök ve sürgünlerinin büyümesi üzerinde kayda değer bir etkisi olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, Hussain vd. (2021) domates bitkilerinin kök uzunluğu, gövde ve kök kuru ağırlığı gibi büyüme özelliklerinin yosun kullanımı ile arttığını bildirmiştir. Yaprakların fotosentetik kapasitesi doğrudan bitki verimliliği seviyesini yansıtmaktadır (Shuab vd., 2017). Çalışmamızda mikoriza uygulaması bitkinin klorofil içeriğini arttırmıştır (Tablo 2). Bu artış, mikorizal hifler tarafından daha iyi su emilimi ve/veya besin maddelerinin daha iyi alımından kaynaklanıyor olabilir (Ait-El-Mokhtar vd., 2019). Uygulama dozları karşılaştırıldığında; yosun gübresinin %1'lik dozu klorofil içeriği üzerinde etkili bulunmuştur. Mikoriza ve %1'lik yosun gübresinin birlikte kullanımı klorofil içeriğini diğer uygulamalara göre arttırmıştır. Yosun gübresinin kullanımı, bitkilerde klorofil içeriğini ve işlevini artırmak için gerekli elementlerden biri olan bitki

dokusundaki Fe içeriğini artırmaktadır (Carrasco-Gil vd., 2018). Yapılan çalışmalarda; mikoriza ve sıvı deniz yosunu ekstraktlarının birlikte uygulanmasının stoma iletkenliğinin yanı sıra klorofil floresansını iyileştirebileceğini ve bunun da bitki büyümesini etkileyecek fotosentetik aktiviteyi ve CO_2 asimilasyonunu artırabileceğini göstermiştir (Carrasco-Gil vd., 2018). Bu artış, hücrelerin karbon bağlama yeteneğini geliştirerek fotosentetik pigment seviyelerini artırarak fotosentetik aktiviteyi geliştirebilen fitohormonların zengin deniz yosunu ekstraktlarının bileşiminden kaynaklandığı açıklanmıştır (Rouphael vd., 2018; Yakhin vd., 2017). Bu sonuçlar bizim bulgularımızı da desteklemektedir. *Ecklonia maxima* ekstraktlarının uygulanması, klorofil içeriğini ve transpirasyon oranını artırarak kabak (*Cucurbita pepo* L.) fizyolojisini iyileştirmiştir (Rouphael vd., 2017). Klorofil floresanının yoğunluğu, uyarılmış klorofil moleküllerinin konsantrasyonuyla doğrudan ilişkili bulunmuştur (Oyetunji vd., 2007). Deniz yosunu ekstraktları, polisakkaritler, yağ asitleri, vitaminler, mineral elementler (fosfor vb.), fitohormonlar (indol asetik asit, sitokinin, gibberellik asit ve poliaminler) içerdiğinden bitki büyümesini önemli ölçüde arttırmıştır (Khan vd., 2009; Zhao, 2018). Kullanılan yosun gübresinin içerdiği metabolitler, mercimeğin fotosentetik özelliklerinin ve mineral beslenmesinin arttırılmasında ve antioksidan sistemin uyarılmasında önemli bir rol oynayabilir. Ayrıca, mercimeğin gelişmesindeki artış; hormonal mekanizmalara deniz yosunu ve mikorizada bulunan mineral elementlerin doğrudan veya mikoriza miselleri aracılığıyla topraktan bitkiye dolaylı olarak emilmesine bağlı olabilir. Bu sonuçlar, mercimek bitkilerinin deniz yosunu ve mikorizanın birlikte uygulanmasına göre, mikoriza veya deniz yosununun tek başına uygulanması daha fazla fayda sağladığını göstermektedir.

Toprak enzimleri besin döngüsü ile ilişkilidir, faaliyetleri toprak verimliliğinin korunması için gereklidir (Gianfreda vd., 2005). Üreaz ve fosfataz enzim aktivitelerinin sırasıyla azot ve fosfor mineralizasyonunda önemli rol oynarken, invertaz ve proteinaz karbon döngüsünde yer almaktadır (Gianfreda vd., 2005). Tüm bu enzimler, toprak verimliliğine önemli katkılarda bulunur ve aktiviteleri toprağın biyokimyasal işleyişinin göstergesi kabul edilmiştir (Acosta-Martinez vd., 2007). Gianfreda vd. (2005), sürekli mısır tarımı yapılan toprakların düşük organik madde içeriği ve düşük dehidrogenaz, invertaz, arilsülfataz ve β-glukosidaz aktiviteleri gösterdiğini bildirmiştir. Çalışmamızda, mikoriza uygulaması toprakların enzim aktivitelerini arttırmıştır. Yosun gübresinin farklı dozlarının enzim aktiviteleri üzerinde önemli olduğu ($p<0.05$) belirlenmiştir. Mikoriza ve yosun gübresinin birlikte uygulanması aktiviteler üzerinde farklılık göstermiştir. Kontrolle karşılaştırıldığında dehidrogenaz ve toprak solunumu üzerine; mikoriza ve %1'lik yosun gübresinin birlikte uygulanması sırasıyla %304 ve % 63.9 oranında artış göstermiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Uygulamaların rizosferdeki bazı biyolojik özelliklere etkileri
Table 3. Effects of applications on some biological properties in the rhizosphere

Mikoriza uygulaması	Yosun gübresi %	Mikrobiyal toprak solunumu (mg CO_2/100 g toprak)	β-glukosidaz aktivitesi (mg p-nitrofenol /100 g toprak)	Dehidrogenaz aktivitesi (mg TPF/g toprak)	Alkalin fosfataz enzimi aktivitesi (µgPNP/ toprak)
Mikorizalı	0	26.1±0.3 d*	11.2±0.03 g	2.4±0.01 g	9.6±0.02 d
	0.2	31.7±0.3 c	23.9±0.02 e	4.7±0.04 e	10.1±0.02 c
	0.4	34.9±0.4 b	24.8±0.08 c	6.2±0.01 b	10.5±0.03 b
	1	42.8±0.4 a	35.7±0.2 a	9.7±0.01 a	12.1±0.04 a
Mikorizasız	0	18.6±0.2 f	9.1±0.03 h	1.8±0.03 h	6.7 ±0.03h
	0.2	18.9±0.8 f	22.7±0.02 f	4.3±0.03 f	7.2±0.2 g
	0.4	22.9±0.1 e	24.2±0.02 d	4.9±0.03 d	7.8±0.03 f
	1	26.7±0.3 d	25.1±0.03 b	5.1±0.03 c	8.1±0.04 f

*Farklı harfler birbirinden farklı olan değerleri göstermektedir ($p < 0.05$)

Alkalin fosfataz ve β-glukosidaz aktivitelerini mikoriza ve %1'lik yosun gübresi uygulaması kontrole göre sırasıyla; % 26.04 ve % 218.8 oranında arttırmıştır (Tablo 3). En düşük değerler hiçbir uygulamanın yapılmadığı kontrolden alınmıştır. Bu sonuçlar, uygulamaların topraktaki enzim aktivitelerini uyardığını ve sonuçta toprak enzim aktivitelerini farklı olarak etkilediğini göstermiştir. Bu sonuçlara dayanarak, mikoriza ve yosun gübresinin toprağa uygulanmasının toprak mineralizasyonunu artırdığını ve mevcut besin maddelerinin konsantrasyonunu yükselteceğini tahmin ediyoruz. Mikorizal mantarlar gibi mikrobiyal topluluklarda; deniz yosunu ekstraktlarının farklı konsantrasyonları içerdikleri düşük ve yüksek molekül ağırlıklı organik bileşikler aracılığıyla rizosfer ve kök sistemi yapısı, makro besin ve mikro besin elementlerinin emilimini etkin bir şekilde artırabilir (Gonzales-Gonzales vd., 2020). Deniz yosunu ekstraktlarının içerdiği bileşikler, topraktaki mikoriza başta olmak üzere faydalı fungusların büyümesini teşvik edebilmekte, kök gelişmesini ve hifsel büyümeyi önemli ölçüde artırabilmiştir (Golubkina vd., 2020). Çalışmamızda da mikoriza aşılaması sonunda farklı yosun gübresi dozlarının kontrolle karşılaştırıldığında kök gelişiminin, kök kuru ağırlığının ve rizosfer enzim aktivitelerinin artması araştırıcıların bulguları ile desteklenmektedir. Çalışmamızda, sıvı deniz yosunu ve mikorizanın özellikle kombine bir uygulama olarak uygulanması, toprakların enzim aktivitelerini, kök uzunluğu, bitki boyu, yeşil aksam ve kök ağırlığını kontrole göre artırmıştır. Yosun gübresinin topraktan uygulamaları ve mikorizanın tek başına veya kombinasyon halinde uygulanması mercimek bitkilerinin gelişimi için umut verici araçlar olduğunu kanıtlamaktadır.

4.Sonuç
4.Conclusion

Mikoriza ve yosun gübresinin birlikte uygulanması, mercimek gelişimini artırmak için sürdürülebilir ve uygulanabilir bir biyo-gübreleme yaklaşımı olarak katkıda bulunabilir. Bu biyostimülantlar, tek başlarına veya birlikte uygulandıklarında besin eksikliği olan sistemlerde bitkisel üretimi iyileştirme potansiyeline sahiptir. Yosun gübresinin (%1'lik) ve mikorizanın birlikte toprağa uygulanması mercimek bitkisinin rizosfer bölgesindeki mikrobiyal solunumu, alkalin fosfataz, dehidrogenaz ve β-glukosidaz aktivitelerini mikorizasız uygulamalara göre önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca yosun gübresinin %1'lik dozu ve mikorizanın birlikte uygulanması, mercimek bitkilerinin kök kuru ağırlığını, klorofil içeriğini iyileştirmiştir. Bitki boyu ve kök uzunluğu üzerinde mikoriza ve %0.2'lik yosun gübresi diğer uygulamalarla karşılaştırıldığında daha fazla etkili olmuştur. Bu nedenle, deniz yosunu ve mikoriza uygulaması, mercimek bitkisi gelişimi ve rizosfer toprağının mikrobiyal aktivitesini iyileştirmek için umut verici bir araç olarak önerilebilir. Mikoriza ve deniz yosununun birlikte kullanımı güvenilir bir biyogübreleme metodolojisi olarak düşünülebilir. Sonuç olarak, bu biyogübrelerin birlikte uygulanması, sadece kimyasal gübrelerin girdisini ve ekosistem üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda mercimek bitkilerinin temel gelişme özelliklerini de iyileştireceğini göstermektedir. Bu bakımdan, mercimek verimini artırmak için çiftçilere biyolojik gübreler önerilmelidir. Biyolojik gübrelerin doğal koşullarda da etkinliklerinin belirlenmesi ile ilgili daha fazla çalışmaya gereksinim vardır. Tarımda hem mikrobiyal hem de mikrobiyal olmayan biyostimülant ürünlerin uygulanması sürdürülebilirlik çabalarını önemli ölçüde destekleyebilir.

Teşekkür
Acknowledgement

Bu araştırmanın yapılmasında maddi destek sağlayan Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (HÜBAP-21257) teşekkürlerimizi sunarız.

Yazar katkısı
Author contribution

Birinci yazar araştırma konusunun seçiminde, araştırma kurgusunun oluşturulmasında, analizlerin yapımında ve makalenin son yazım aşamalarında, ikinci yazar deneyin kurulumu, analizlerin yapılmasında, literatür araştırması aşamalarında katkı sunmuştur.

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Çalışma, etik kurul izni veya herhangi bir özel izin gerektirmemektedir.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Abd El-Gawad, H.G., & Osman, H.S. (2014). Effect of exogenous application of boric acid and seaweed extract on growth, biochemical content and yield of eggplant. *Journal Horticultural Science & Ornamantel Plants*, 6, 133-143. https://doi.org/10.5829/idosi.jhsop.2014.6.3.1147

Acosta-Martinez, V., Cruz, L., Sotomayor-Ramirez, D., & Pérez-Alegría, L. (2007). Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Applied Soil Ecology*, 35, 35-45. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.05.012.

Ağirağaç, Z., & Zorer Çelebi, Ş. (2024). Combined applications and Multi-Faceted evaluations of humic acid, seaweed, and vermicompost with chemical and organo-mineral fertilizers on corn, part I: chlorophyll concentration. *Journal of Plant Nutrition*, 1-12.

Ağırağaç, Z., Çelebi, Ş. Z. (2022). Karasal İklimde Yetiştirilen İkinci Ürün Mısırın Silaj Verimi Üzerine Deniz Yosunu Uygulamasının Etkisi. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, *6*(1), 7-19.

Al-Karaki, G. (2013). Application of mycorrhizae in sustainable date palm cultivation. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 25, 854. https://doi.org/10.9755/ejfa.v25i11.16499.

Alam, M.Z., Braun, G., Norrie, J., & Hodges, D.M. (2013). Effect of *Ascophyllum* extract application on plant growth, fruit yield and soil microbial communities of strawberry. *Canadian Journal Plant Science*, 93, 23–36. https://doi.org/10.4141/cjps2011-260.

Ait-El-Mokhtar, M., Ben-Laouane, R., Anli, M., Boutasknit, A., & Wahbi, S., Meddich, A. (2019). Use of mycorrhizal fungi in improving tolerance of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seedlings to salt stress. *Scientia Horticulturae*, 253, 429-438. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00131.

Anlı, M., El Kaouna, M., Ait-El-Mokhtar, M., Boutasknit, A., Ben-Laouane, R., Toubali, S., Baslam, M., Lyamlouli, K., Hafidi, M., & Meddich, A. (2020). Seaweed extract application and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation: a tool for promoting growth and development of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cv Boufgous. *South African Journal Botany*, 132, 15-21. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.04.004.

Baligar, V.C., Fageria, N.K., & He, Z.L. (2001). Nutrient use efficıency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32, 921-950. https://doi.org/10.1081/CSS-100104098.

Begum, M., Bordoloi, B.C., Singha, D.D., & Ojha, N.J. (2018). Role of seaweed extract on growth, yield and quality of some agriculturalcrops: A review. *Agriculture Review*, 39, 321–326. https://doi.org/10.18805/ag.R-1838.

Carrasco-Gil, S., Hernandez-Apaolaza, L., & Lucena, J. J. (2018). Effect of several commercial seaweed extracts in the mitigation of ironchlorosis of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.). *Plant Growth Regulation*, 86, 401–411. https://doi.org/10.3390/agronomy11030507.

Chen, C.L., Song, W.L., Sun, L., Qin, S., Ren, C.G., Yang, J.C., Feng, D.W., Liu, N., Yan, J., & Cui, B.B. (2022). Effect of Seaweed Extract Supplement on Rice Rhizosphere Bacterial Community in Tillering and Heading Stages. *Agronomy 12*, 342. https://doi.org/10.3390/agronomy12020342

Cordell, D., Drangert, J.O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environ. Change*, 19, 292-305. https://10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.

De Pascale, S., Rouphael, Y., & Colla, G. (2017). Plant biostimulants: innovative tool for enhancing plant nutrition in organic farming. *European Journal of Horticultural Science*, 82, 277–285. https://doi.org/10.17660/eJHS.2017/82.6.2.

Elkoca, E. (1997). *Fasulye (Phaseolus vulgaris L)'de tuza dayanıklılık üzerine bir araştırma* [Yüksek Lisans Tezi Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Gianfreda, L., Rao, M.A., Piotrowska, A., Palumbo, G., & Colombo, C. (2005). Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution. *Science of the Total Environment*, 341, 265-279. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.10.005.

Goertz, S.H., & Coons, J.M. (1991). Tolerance of tepary and navy beans to NaCl during germination and emergence. *Horticulturae Science*, 26(3), 246-249. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.26.3.246.

Golubkina, N., Logvinenko, L., Novitsky, M., Zamana, S., Sokolov, S., Molchanova, A., Shevchuk, O., Sekara, A., Tallarita, A., & Carusa, G. (2020). Yield, essential oil and quality performances of *Artemisia dracunculus, Hyssopus officinalis* and *Lavandula angustifolia* as affected by arbuscular mycorrhizal fungi under organic management. *Plants*, 9, 375. https://doi.org/10.3390/plants9030375.

Gonzalez-Gonzalez, H.F., Ocampo-Alvarez, H., Santacruz-Ruvalcaba, F., Sanchez-Hernandez, C.V., Casarrubias-Castillo, K., Beceril-Espinosa, A., Castaneda-Nava, J.J., & Hernandez-Herrera, R.M. (2020). Physiological, Ecological, and Biochemical Implications in Tomato Plants of Two Plant Biostimulants: Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Seaweed Extract. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1-18. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00999.

Gülaç, Z.N. (2022). Ürün Raporu Mercimek 2022. Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü, p.32. ttps://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge/Belgeler/PDF%20%C3%9Cr%C3%BCn%20Raporlar%C4%B1/2022%20%C3%9Cr%C3%BCn%20Raporlar%C4%B1/Mercimek%20%C3%9Cr%C3%BCn%20Raporu-TEPGE-358.pdf.

Hussain, H. I., Kasinadhuni, N. & Arioli, T. (2021). The effect of seaweed extract on tomato plant growth, productivity and soil. *Journal Applied Phycology*, 33,1305–1314. https://doi.org/10.1007/s10811-021-02387-2.

Khan, U.P., Rayirath, S., Subramanian, M.N., Jithesh, P., Rayorath, D.M., Hodges, A.T., Critchley, J., CraigiJ., Norrie, B., & Prithiviraj, B. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. J. Plant Growth Regulation, 28, 386-399. https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x.

Küçük, Ç., Uslu, P., & Sezen, G. (2024). *Cladophora* sp. ve Arbüsküler Mikorizal Fungus (AMF) Spor Aşılamasının Mısır Bitkisinin (*Zea mays* L.) Gelişim Parametreleri ve Bazı Rizosfer Toprak Enzimlerine Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 28(2), 189-1965. https://doi.org/ 10.19113/sdufenbed.1473028.

Küçük, Ç., & Şinşek, N. (2020). The effects of different agricultural wastes on some microbiological properties of soil. *Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences* 15, 451-460. https://ejons.org/index.php/ejons/article/view/129.

Küçük, Ç., & Cevheri, C. **(**2019). Investigation of some soil microbiological properties of rhizosphere soil of halophytic forage plants. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences,* 37(1), 7-14**.** https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2031899.

Lucini, L., Colla, G., Morebo, M. B. M., Bernardo, L., Cardarelli, M., & Terzi, V. (2019). Inoculation of *Rhizoglomus irregulare* or *Trichoderma atroviride* differentially modulates metabolite profiling of wheat root exudates. *Phytochemistry*, 157, 158–167. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2018.10.033.

Meddich, A., Jaiti, F., Bourzik, W., El Asli, A., & Hafidi, M. (2015). Use of mycorrhizal fungi as a strategy for improving the drought tolerance in date palm (*Phoenix dactylifera*). *Scientia Horticulturae*, 192, 468-474. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.06.024.

Oyetunji, O.J., Ekanayake, I.J., & Osonubi, O. (2007). Chlorophyll fluorescence analysis for assessing water deficit and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Journal of Advanced Research*, 1, 108-117.

Rady, M.M., Taha, S.S., & Kusvuran, S. (2018). Integrative application of cyanobacteria and antioxidants improves common bean performance under saline conditions. *Scientia Horticulturae*, 233, 61-69. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.047.

Rasouli, F., Nasiri, Y., Hassanpouraghdam, M.B., Asadi, M., Qaderi, T., Trifa, A., Strzemski, M., Dresler, S., & Szczepanek, M. (2023). Seaweed extract and arbuscular mycorrhiza co-application affect the growth responses and essential oil composition of *Foeniculum vulgare* L.. *Scientific Reports* 13, 11902. https://doi.org/10.1038/s41598-023-39194-3

Rivera-Becerril, F., Van-Tunien, O., Rivera-Becerril, F., Van-Tuinen, O., Chataignier, N. Rouard, J. Béguet, C. Kuszala, G. Soulas, V. Gianinazzi-Pearson, F. & Martin Laurent, F. (2017). Impact of a pesticide cocktail (fenhexamid, folpel, deltamethrin) on the abundance of Glomeromycota in two agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 577, 84-93. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.098.

Roshdy, K.A. 2014. Effect of spraying silicon and seaweed extract on growth and fruiting of grandnaine banana. *The Egyptian Journal of Agricultural Research*, 92, 979-991. https://doi.org/10.21608/ejar.2014.156427.

Rouphael, Y., De Micco, V., Arena, C., Raimondi, G., Colla, G., De Pascale, S. (2017). Effect of *Ecklonia maxima* seaweed extract on yield, mineral composition, gas exchange, and leaf anatomy of zucchini squash grown under saline conditions. *Journal of Applied Phycology*, 29, 459-470. https://doi.org/10.3390/agronomy13112745.

Rouphael, Y., & Colla, G. (2018). Synergistic biostimulatory action: Designing the next generation of plant biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science,* 9, 1655. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01655.

Shuab, R., Lone, R., & Koul, K.K. (2017). Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on storage metabolites, mineral nutrition, and nitrogen-assimilating enzymes in potato (*Solanum tuberosum* L.) plant. *Journal of Plant Nutrition*, 40, 1386-1396. https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1263317.

Subhashini, D.V. (2016). Effect of NPK fertilizers and co-inoculation with phosphate-solubilizing arbuscular mycorrhizal fungus and potassium-mobilizing bacteria on growth, yield, nutrient acquisition, and quality of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis,* 47, 328-337. https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1123724.

Shukla, P.S., Mantin, E.G., Adil, M., Bajpai, S., Critchley, A.T., & Prithiviraj, B. (2019). *Ascophyllum nodosum*-based biostimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. *Frontiers in Plant Science,* 10, 655. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655.

Sumbul, A., Mahmood, I., Rizvi, R., & Ansari, R.A. (2017). *Mycorrhiza: an alliance for the nutrient management in plants.* In V. Kumar, M. Kumar, S. Sharma, & R. Prasad (Eds.), Probiotics in Agroecosystem, (ss. 1-537). Springer, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-4059-7_19.

Sukumar, P., Legue, V., Vayssieres, A., Martin, F., Tuskan, G.A., & Kalluri, U.C. (2013). Involvement of auxin pathways in modulating root architecture during beneficial plant–microorganism interactions. *Plant Cell Environment*, 36, 909–919. https://doi.org/10.1111/pce.12036.

Van Der Heijden, M.G.A., Martin, F.M., Selosse, M.A., & Sanders, I.R. (2015). Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytologist*, 205, 1406-1423. https://doi.org/10.1111/nph.13288.

Wicaksono, W.A., Sansom, C.E., Jones, E., Perry, N.B., Monk, J., Ridgway, H.J. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Leptospermum scoparium* (mānuka): effects on plant growth and essential oil content. *Symbiosis*, 75, 39-50. https://doi.org/10.1007/s13199-017-0506-3.

Yakhin, O.I., Lubyanov, A.A., Yakhin, I.A., & Brown, P.H. (2017). Biostimulants in plant science: a global perspective *Frontiers Plant Science*, 7, 1-32. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049.

Zhao, Y. (2018). Essential roles of local auxin biosynthesis in plant development and in adaptation to environmental changes. *The Annual Review of Plant Biology,* 69, 417-435. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040226.

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 21-35 doi: 10.17714/gumusfenbil.1599838 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Adli delil olarak kullanılan cam malzemelerin analitik yöntemlerle incelenmesi

Examination of glass materials used as forensic evidence with analytical methods

Yester ÖZMERİNOĞLU*[1], Orhan DESTANOĞLU[1], Salih CENGİZ[2]

[1]*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Adli Tıp ve Adli Bilimler Enstitüsü, Fen Bilimleri Anabilim Dalı, 34500, İstanbul*

[2]*İstanbul Rumeli Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Meslek Yüksek Okulu, 34445, İstanbul*

• Geliş tarihi / *Received*: 11.12.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 23.12.2024

Öz

Hırsızlık, vur-kaç gibi farklı adli vakalarda toplanan cam malzeme delillerinin fiziksel, kimyasal, mekanik ve optik özellikleri göz önünde bulundurularak karakterizasyonun yapılması adli olayların çözümünde önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada farklı tipte cam malzemelerin elementel analiz sonuçlarına bağlı olarak istatistiksel farklılandırılması amaçlanmıştır. Cam örneklerinin X-ışını floresan spektrometresi (XRF) ile Alüminyum, Demir, Titanyum, Kalsiyum, Magnezyum, Sodyum, Potasyum, Kükürt, Baryum ve Krom elementleri analiz edilmiştir. Bu örneklerden 27 tanesinin ise lazer ablasyon indüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometresi (LA-ICP-MS) ile Alüminyum, Demir, Titanyum, Kalsiyum, Magnezyum, Sodyum, Potasyum, Kükürt, Baryum, Arsenik, Kobalt, Nikel, Rubidyum, Stronsiyum ve Kurşun elementleri analizlenmiştir. Cam numunelerinin sınıflandırılmasında Temel Bileşenler Analizi (TBA-PCA) yöntemi kullanılmıştır. Deneysel analizler sonucunda, tek bir elemente dayalı farklılaştırmadan ziyade birden fazla elementin birlikte değerlendirilmesiyle cam örneklerinde güvenilir bir tanımlama ve farklılaştırma yapılabileceği görülmüştür. Ayrıca yapılan istatistiksel yöntem değerlendirmesi sonucunda 3-boyutlu temel bileşen analizi uygulandığında cam örnekleri arasındaki sınıf ayrımının daha yüksek skorla yapılabildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Cam malzeme, Elementel analiz, Mikro analiz, Temel bileşenler analizi

Abstract

The characterization of glass material evidence collected in different forensic cases such as burglary, hit-and-run, etc. by considering their physical, chemical, mechanical and optical properties has an important place in the solution of forensic cases. In this study, statistical differentiation of different types of glass materials based on elemental analysis results was aimed. Aluminum, Iron, Titanium, Calcium, Magnesium, Sodium, Potassium, Potassium, Sulfur, Barium and Chromium elements were analyzed by X-ray fluorescence spectrometry (XRF). In 27 of these samples, the elements Aluminum, Iron, Titanium, Calcium, Magnesium, Sodium, Potassium, Sodium, Potassium, Sulfur, Barium, Arsenic, Cobalt, Nickel, Rubidium, Strontium and Lead were analyzed by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). Principal Component Analysis (PCA) method was used to classify the glass samples. As a result of the experimental analysis, it was seen that a reliable identification and differentiation can be made in glass samples by evaluating multiple elements together rather than differentiation based on a single element. Additionally, as a result of the statistical method evaluation, it was seen that class distinction between glass samples could be made with a higher score when 3-dimensional principal component analysis was applied.

***Keywords**: Glass material, Elemental analysis, Micro analysis, Principal component analysis*

*Yester ÖZMERİNOĞLU, yozmerinoglu@gmail.com

1. Giriş
1. Introduction

Eski Mısır'da ilk üretilmeye başlamasından bu yana farklı coğrafyalarda, farklı üretim süreçlerinden geçen cam, kullanım amacına göre farklı türlerde çeşitlenerek günümüze kadar geldiği görülmektedir. Sanayi Devrimi'nin etkisiyle, cam üretiminde büyük bir dönüşüm yaşanmış, buhar gücüyle çalışan makineler sayesinde cam üretimi hızlanmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda ise cam teknolojisi hızlı ilerlemeler kaydetmiş; bilimde, mimaride ve yaşamın hemen her alanında sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. (Doğan, 1996; Ustaer, 1995; Doremus, 1994).

Cam, amorf yapıya sahip inorganik bir eriyiktir. Kimyasal tepkimelerle birlikte fiziksel değişimlere karşı yüksek direnç gösterdiğinden, yıllar boyunca bozulmadan aynı şekilde kalabilir (Buscaglia, 1994). Camın diğer fiziksel özellikleri arasında saydam ve inert olması da bulunur. Kimyasal açıdan cam, çeşitli elementlerin belirli oranlarda bir araya gelmesiyle oluşur. Bu elementler arasında Si**,** Al**,** Ca**,** Mg ve Na başlıca yer alır. Bazı özel cam türlerinde ise bu elementlere ek olarak Pb**,** Fe**,** S ve B gibi diğer elementler de dahil edilir.

Cam, malzeme olarak oda sıcaklığında tamamen elastik olmayan bir katı olup, en önemli dezavantajı ise kırılgan olmasıdır (Çakır, 2003). Öte yandan, camın kırılgan olması adli vakaların çözümünde delil niteliği taşıması bakımından önemlidir. Hırsızlık olaylarında kırılan camdan sıçrayan küçük parçacıklar olaya karışan kişinin cildinde, saçında, elbisesinde ya da ayakkabısında taşınabilme özelliğine sahiptir. Arabayla vur-kaç olaylarında ise olay yerinde bulunan cam kırıkları şüpheli araçtan alınan örneklerle mukayese edilerek birincil olay yeriyle bağlantıyı sağlayabilmek yönünden önem arz eder (Corzo vd., 2021). Ek olarak, kırıldığında yaygın olarak giysiler, halılar vb. gibi diğer yüzeylere kolaylıkla transfer olabildiğinden iki veya daha fazla olay yeri arasında ilişki kurmanın yanı sıra bir şüpheli ile olay yeri arasında ilişki kurma özelliğine de sahiptir. Adli vakalarda karşılaşılan birçok cam delili çok küçük ebatta olduğundan yeterli sonuç alınabilmesi için hassas ve güvenilir analitik metotlar gereklidir (Hicks vd., 2003). Olay yerinden elde edilen cam delillerin incelenmesi amacıyla yıllar içerisinde farklı analitik yöntemler kullanılarak çok sayıda araştırmalar yapılmıştır (Saferstein, 2004).

Camın fiziksel özellikleri arasında yer alan rengi, camın sertliği, yoğunluğu, kırılma indisi ve ısıl genişleme katsayısı gibi parametrelerin ölçülmesinde kullanılan birçok analiz yöntemi mevcuttur (Almirall vd., 2020). Elektromanyetik spektrumun görünür bölge aralığında elde edilen yansıma spektrumlarına dayanan kantitatif renk analizi, onlarca yıldır iz kanıt çalışmalarının bir parçası olarak kullanılmaktadır (Bell vd., 2009). Örnekler arasında fiber kanıtların, mürekkeplerin, tortuların ve toprakların sınıflandırılması yer almaktadır. Bu nedenle rengi tanımlamak için kullanılan çok sayıda model veya 'renk uzayı' vardır (Grieve vd., 1988; Hammond, 2007). Commission Internationale de L'Eclairage (CIE) tarafından geliştirilen CIE L*a*b* renk modeli, UV/Vis/NIR Spektrofotometresi gibi yöntemler kullanılarak cam örneklerinin renk analizinde uygulanmaktadır (Özmerinoğlu, 2008). Camın kırılma indisinin ölçülmesinde ise literatürde GRIM (glass refractive index measurment-cam kırılma indisi tayini cihazı) yönteminin kullanımıyla karşımıza çıkmaktadır (Zadora, 2001). Camın kimyasal bileşenlerini belirlemek, camın türünü ve özelliklerini anlamak için yapılan temel analizlerden biri de elementel bileşim analizidir. Bu amaçla SEM-EDS (enerji dağılımlı x-ışını analizörlü taramalı elektron mikroskobu), XRF, ICP-OES (indüktif eşleşmiş plazma atomik emisyon spektroskopisi), ICP-MS (indüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometresi) ve LA-ICP-MS gibi pek çok cihaz kullanılmaktadır. Fiziksel ve kimyasal analizlerin birleşmesiyle camın farklılaştırılması ve tanımlandırılmasında daha güçlü sonuçlar alındığı birçok çalışma ile kanıtlanmıştır (Trejos vd., 2013). Şişe camlarının GRIM ve ICP-MS cihazları kullanarak, kırılma indisi ve elementel analiz ölçümleri yapılarak bu iki metodu birbiriyle karşılaştırılmıştır (Suzuki vd., 2000). Pencere camlarında da benzer bir çalışma kırılma indisinin yanında SR-XRF (sinkrotron radyasyonuyla indüklenmiş x-ışını floresansı) ile elementel analiz ölçümü yapılarak camın farklılandırılması amaçlanmıştır (Suzuki vd., 2005). Analiz yöntemleri için çeşitli teknikler yalnızca karşılaştırma amaçlı kullanılmamış, aynı zamanda bu yöntemler ilgili sonuçları desteklemek ve/veya araştırmanın kendisi hakkında daha ayrıntılı bilgi üretmek için de kullanılmıştır (Martinez-Lopez vd., 2021).

Camın elementel analizi, genellikle camın içeriğindeki elementlerin oranlarını belirlemek amacıyla yapılan bir kimyasal analizdir. Element analizi yöntemi uygulandığında, camdaki elementlerin yüzdesinin farklılık gösterdiği görülür. Camın elementel analiz sonuçlarını yorumlamak için çok çeşitli istatistiksel ve analitik yöntemler kullanılır. Cam örneklerinin elementel analiz sonuçlarından elde edilen verilerin yorumlanması için olabilirlik oranının (likelihood ratio-LR) kullanımı literatürde karşılaşılan yöntemlerden biridir (O'Sullivana

vd., 2011). Araba ön camı numunelerinin LA-ICP-MS yöntemiyle incelenmesi sonucu farklı laboratuvarlar tarafından elde edilen verilerin yorumlanmasında LR güvenilir bir yöntem olarak kullanılmıştır (Hoffman vd., 2018). SEM-EDX ve GRIM cihazlarıyla incelenen farklı gruplardaki cam örneklerinin sınıflandırılmasında LR yaklaşımı destek vektör makinesi (support vector machines-SVM) ve naïve Bayes sınıflandırıcı (naïve Bayes classifiers-NBC) metotlarıyla kıyaslanarak camın sınıflandırılması güçlü ve zayıf yanları ortaya konulmuştur (Zadora, 2009). Camın elementel analizinde, PCA (principal component analysis - temel bileşenler analizi) kullanımı, çok değişkenli veri setlerinde gizli yapıları veya desenleri ortaya çıkarmak için oldukça faydalı bir istatistiksel analiz yöntemdir (Bajic vd., 2005). PCA, verideki en önemli değişkenleri bulmak ve veri boyutunu azaltarak analiz yapılabilirliği artırmak için kullanılabilir (Destanoğlu, 2022). PCA, genellikle sayısal veri ile çalışır, bu nedenle camın elementel analizindeki verilerin uygun olması önemlidir.

Bu çalışmada yurtiçi ve yurtdışından toplanılan farklı türdeki cam örneklerinin XRF spektrometresi ve LA-ICP-MS cihazı kullanılarak elementel analizi yapılmıştır. XRF cihazı, genellikle metal, seramik, cam, toprak, gıda ve daha birçok malzemenin element analizlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Maeo vd., 2007). Periyodik cetvelde bulunan birçok elementin analizlerinin yapıldığı hızlı bir enstrümantal analiz tekniğidir. Örneği yok etmeden ve herhangi bir kimyasal işlem yapmadan elementel analiz sağlar. Bu durum, özellikle delil niteliğindeki değerli ve hassas cam örnekleri için çok avantajlıdır. LA-ICP-MS doğal ve sentezlenmiş nesnelerin elementel bileşimini belirlemek için kullanılan son derece hassas bir analitik tekniktir. Çok az veya hiç numune hazırlamadan katı malzemelerin yüzeylerini analizi için kullanılır. Son derece hızlı ve yaygın olarak kullanılan bir cihazdır. Bu çalışmada iki mikro analitik yöntemle elde edilen verilerin en yaygın olarak kullanılan kemometrik tekniklerden biri olan PCA kullanılarak cam kanıtları arasındaki farklılıkları ortaya koyacak yeni bir yaklaşım önerilmiştir.

2. Gereç ve yöntem
2. Equipment and method

2.1. Sertifikalı referans malzemeler
2.1. Certified reference materials

Yapılan analizlerin iç kalite kontrolleri için XRF cihazında NIST SRM 620, 621 ve 1830 kodlu cam standartları, LA-ICP-MS cihazında ise NIST SRM 612 ve 620 kodlu sertifikalı referans cam malzemeleri kullanılmıştır.

2.2. Enstrümantal analizler
2.2. Instrumental analyses

Örneklerin analizleri Şişecam (Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A. Ş., İstanbul) ARGE Merkezi'nde bulunan XRF ve LA-ICP-MS cihazları kullanılarak camın kimyasal elementel analizi yapılmıştır.

2.2.1. LA-ICP-MS sistemi
2.2.1. LA-ICP-MS system

LA-ICP-MS analizleri, CETAC LSX-213 katı hal lazeri ile birleşik Perkin Elmer NexION 300X ICP-MS cihazı kullanılarak yapılmıştır. LA kısmında 213 nm dalgaboyunda lazer ve ayırıcı sistemde ise taşıyıcı olarak 0,6 L/dk akış hızında argon gazı kullanılmıştır. Cam örnekleri LA-ICP-MS sistemi kullanılarak toplam 14 adet element analizlenmiştir.

2.2.2. XRF spektrometresi
2.2.2. XRF spectrometry

Bu çalışma WDXRF deneyleri Rigaku RIX 2000 sıralı XRF spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 50mA, 50kV tüp gücünde vakum koşulu altında incelenmiştir. Örnek başına yaklaşık 600 saniye boyunca kantitatif analiz yapılmıştır. Spektrometre, Toshiba Rhodium anot x-ışını tüpü ile donatılmış ve RIX 2000'e özel yazılım içeren Digital Equipment PC bilgisayarı ile arayüzlenmiştir. XRF spektrometrisi ile toplam 10 adet element analizlenmiştir.

2.3. Örneklerin toplanması
2.3. Collection of sample

Cam örnekleri, şişe, düz cam ve far camları olmak üzere üç grupta toplanmıştır. XRF cihazında şişe grubunda 25, düz cam grubunda 15 ve far grubunda 17 olmak üzere toplam 57 adet, LA-ICP-MS cihazında ise şişe grubunda 12, düz cam grubunda 8 ve far grubunda 7 olmak üzere toplamda 27 adet renkli ve renksiz camlar analiz edilmiştir. Düz ve şişe cam numuneleri Şişecam ARGE Merkezi'nden, far numuneleri ise Farba Otomotiv Aydınlatma Fabrikası'ndan ve Mercedes-Benz Fabrikası'ndan temin edilmiştir.

Tablo 1. Renkli cam numuneleri
Table 1. Colored glass samples

Numune	Renk
S10	Yeşil
S11	Yeşil
S12	Yeşil
S15	Mavi
S19	Füme
D1	Füme
D4	Yeşil
D5	Mavi
D15	Füme

2.4. Örneklerin analiz için hazırlanması
2.4. Preparation of samples for analysis

Cam örneklerinin hazırlanması aşamasında sırasıyla kesme, taşlama (aşındırma) ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan her iki cihazın da numune tutucuları farklı ölçülerde olduğundan buna uygun büyüklükte numuneler kesilmiştir. Numunelerin yüzeyinin temiz, düz ve pürüzsüz olmasını sağlamak amacıyla numuneler önce 400'lük sonra 1000'lik silisyum karbür tozunun bor elementiyle sertleştirilmiş çelik disk üzerine dökülerek, taşlanması yani homojen bir analiz yüzeyinin elde edilmesi ve son aşama olarak da seryum oksit tozu serpilmiş keçe ile cam yüzeyinin parlatılması işlemleri uygulanmıştır (Özmerinoğlu, 2008).

XRF cihazında numunenin yerleştirileceği aparatın şekli daireseldir ve çapı 25 mm'dir. Bu cihazda incelenecek numunelerin çapı bu değere uygun olacak şekilde alınmıştır. Numunenin kalınlık değeri yaklaşık 2-6 mm arasında değişmektedir. LA-ICP-MS cihazı ile yapılan ölçümlerde ise birden fazla numune aynı anda cihaza konularak analiz gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 15 mm çapında hazırlanan kalıplara numuneler yerleştirilmiş ve üzerine ana malzemesi polyester olan bir karışım dökülmüştür. Karışımın katılaşması için 45 dakika beklenilmiştir. Taşlama ve parlatma uygulamalarının ardından örnekler kalıplar içerisine yerleştirilmiştir. Bu işlemler sonucu incelemeye hazır hale getirilmiştir. Tüm numunelerin kalıplarda aynı yükseklikte yerleştirilmesi sağlanmıştır.

2.5. İstatistiksel değerlendirme
2.5. Statistical evaluation

Kullanılan her iki cihazda numunelerin üçer tekrarlı analizi yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Araştırmada, farklı cam malzeme gruplarının istatistiksel ayrımının incelenmesi için enstrümantal analizlerden elde edilen numunelerdeki elementlerin analiz sonuçlarına PCA yöntemi uygulanmıştır. Yapılan tüm istatistiksel analizler, OriginPro (OriginLab, version 9.6.5.169) yazılımında bulunan PCA uygulamaları ile gerçekleştirilmiştir.

PCA, büyük çok değişkenli veri setlerinin yorumlanması için iyi bilinen tekniklerden biri olması sebebiyle bu çalışma için seçilmiştir. Boyut sayısını önemli ölçüde azalttığından dolayı özellikle çok sayıda elementin bulunduğu cam örneklerinde, veri analizi ve görselleştirme açısından çok faydalıdır. PCA sonrası elde edilen ilk iki veya üç temel bileşeni kullanarak, cam örneklerinin istatistiksel ayrımı görsel olarak incelenebilir.

Bu sayede, örneklerin gruplarını, benzerliklerini veya farklılıklarını saptamak daha kolay olur. Analiz sonucu elde edilen şekillerdeki PC1 verilerin en değişken (birincil) olanıdır ve PC2 bir sonraki (ikincil) en değişken olanıdır ve diğer bileşenler de bu sırayla devam eder.

3. Bulgular ve tartışma
3. Results and discussion

Şişe cam (S), düz cam (D) ve far camı (F) olmak üzere üç grupta toplanmış renkli (9 adet) ve renksiz (48 adet) olmak üzere toplam 57 adet cam örneğinin elementel analizi XRF cihazıyla ve bu örnekler arasından 27 tanesinin elementel analizi LA-ICP-MS cihazıyla yapılmıştır. Tüm örneklerin analizi bir noktadan, üç tekrarlı yapılmış ve hesaplanan değerlerin ortalaması alınarak aşağıdaki tablolar (Tablo 2-7) oluşturulmuştur. Tüm cam malzemelerin ana bileşeni silisyum (Si) olduğundan silisyum bu çalışmada analize alınmamıştır. Her iki cihazdan elde edilen bulgulara dayanarak S, D ve F grupları arasındaki ayrım istatistiksel olarak çok değişkenli kemometrik bir yöntem olan PCA ile incelenmiştir (Şekil 1-7).

3.1 LA-ICP-MS analiz tabloları
3.1. LA-ICP-MS analysis tables

LA-ICP-MS analizlerinde S, D ve F gruplarındaki 27 adet örnekte, toplam 14 elementin (Alüminyum, Demir, Titanyum, Kalsiyum, Magnezyum, Sodyum, Potasyum, Kükürt, Baryum, Arsenik, Kobalt, Nikel, Rubidyum, Stronsiyum ve Kurşun) ağırlıkça yüzdeleri belirlenmiştir ve bulunan değerler Tablo 2-4'te sunulmuştur.

Tablo 2. Şişe camlarında bulunan elementlerin % miktarları
Table 2. Percentage of element amounts of elements found in bottle glasses

Numune	Al	Fe	Ti	Ca	Mg	Na	K	Ba	As	Co	Ni	Rb	Sr	Pb
S1	0.064	0.013	0.010	4.513	0.077	9.673	1.274	0.463	0.051	0.000	0.000	0.000	0.004	0.001
S2	0.074	0.013	0.008	4.717	0.100	10.275	1.354	0.429	0.060	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000
S3	0.068	0.013	0.009	4.171	0.072	8.943	1.069	0.347	0.052	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000
S5	0.119	0.015	0.012	5.083	0.088	11.055	1.396	0.452	0.064	0.030	0.005	0.051	0.623	0.296
S6	0.071	0.012	0.011	4.013	0.071	9.115	1.074	0.335	0.059	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000
S7	0.987	0.036	0.031	7.323	1.865	11.161	0.189	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.005	0.001
S8	0.876	0.040	0.028	6.674	1.910	10.171	0.142	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000	0.004	0.001
S9	0.643	0.030	0.021	5.237	1.319	7.745	0.197	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000
S12	0.754	0.103	0.021	5.048	1.361	7.774	0.451	0.012	0.001	0.000	0.001	0.001	0.004	0.001
S15	0.219	0.068	0.017	5.354	1.325	7.361	0.108	0.007	0.005	0.001	0.000	0.000	0.003	0.001
S22	1.219	0.057	0.029	10.908	0.119	11.688	1.056	0.017	0.005	0.000	0.001	0.004	0.008	0.001
S24	0.801	0.025	0.016	6.194	0.109	7.838	0.671	0.025	0.002	0.000	0.000	0.002	0.007	0.004

Tablo 2'de renkli şişe camı olarak S12 ve S15 kodlu numuneler yer almaktadır. S12 kodlu numunede Fe element yüzde değeri XRF ile uyumlu olacak şekilde (Tablo 5'e bakınız) yüksek çıkmasına rağmen LA-ICP-MS cihazıyla yapılan analizde bu durum S15 kodlu numune için söylenilememektedir. Bununla beraber, renk incelemelerinde ikincil anlamlı olan alüminyum (Al) elementi Tablo 4'teki XRF ölçümüyle uyumlu ve belirgin miktarda düşük değerde çıkmıştır. Tablo 2'deki ilk 5 şişe camı numunesine bakıldığında, potasyum (K) değerlerinde belirgin bir fark olduğu gözlemlenmektedir. Bu farkın XRF cihazıyla yapılan analizlerde de farklı olduğu görülmektedir (Tablo 5'e bakınız). Camda potasyum elementi, genellikle potasyum oksit (K_2O) formunda bulunur. Potasyum oksit, camın şeffaflık özelliklerini iyileştirirken, özellikle optik camlarda, parlaklık ve estetik özelliklerini artırır (Aydın, 2012). Bu farkın nedeni, numunelerin temin edildiği üretici firmadan kaynaklanmaktadır. Diğer şişe numunelerinden farklı olarak, bu firma daha dekoratif ve özel kullanım amaçlı şişeler üretmektedir. Benzer özellik baryum (Ba) ve arsenik (As) elementlerinin değerleri için de dikkat çekmekte olup diğer numunelere kıyasla ilk 5 şişe camı numunesinde daha büyük yüzdede bulunmakta.

Şişe camlarının kalitesini ve dayanıklılığını artırmaya yardımcı olan magnezyum (Mg) elementinin bazı şişe numunelerinde diğerlerine göre daha fazla miktarda bulunduğu Tablo 2'de görülmektedir. Bunların içerisinde özellikle S7 ve S8 kodlu şişelerde yüksek olması bu şişelerden ilkinin ilaç, diğerinin ise su şişesi olduğu

bulgusuyla uyumlu olduğunu göstermektedir. Birbirine daha yakın değerde Mg içeren S9, S12 ve S15 kodlu numunelerin ise soda şişesi olduğu bilinmektedir. Aynı amaçlı üretilen bu şişelerde benzer miktarda Mg içeriğine rastlanmış olması bu elementin camın farklılandırılmasında katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Tablo 3. Düz camlarda bulunan elementlerin % miktarları
Table 3. Percentage of element amounts of elements found in flat glasses

Numune	Al	Fe	Ti	Ca	Mg	Na	K	Ba	As	Co	Ni	Rb	Sr	Pb
D2	0.081	0.112	0.007	6.767	2.668	11.139	0.067	0.001	0.000	0.004	0.000	0.000	0.003	0.000
D4	0.457	0.292	0.030	4.608	2.212	7.988	0.189	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
D5	0.437	0.227	0.028	4.639	2.031	7.449	0.257	0.005	0.000	0.004	0.000	0.001	0.003	0.000
D6	0.612	0.079	0.044	7.590	3.342	12.900	0.424	0.008	0.001	0.000	0.000	0.001	0.005	0.001
D7	0.743	0.088	0.038	7.711	3.506	12.848	0.054	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.001
D8	0.038	0.070	0.008	6.873	2.894	11.443	0.053	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000
D11	0.766	0.051	0.033	5.712	2.177	9.717	0.042	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000
D13	0.470	0.051	0.022	4.882	2.129	8.374	0.043	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000

Tablo 3'de renkli düz camlardan olan D4 ve D5 kodlu numunelerin Fe element yüzde değeri XRF ile uyumlu olacak şekilde (Tablo 6'ya bakınız) yüksek çıkmıştır. Bununla beraber renk incelemelerinde ikincil anlamlı olan Al elementinin değerlerine bakıldığında, renkli D8 kodlu numunede belirgin şekilde düşük olduğu görülmektedir. Bu durum XRF verileriyle de tutarlılık göstermektedir. Cam formülasyonunda önemli elementlerden biri olan Mg özellikle camın kırılmaya karşı dayanıklılığını artırır (Aydın, 2012; Cuddy 2001). Düz cam grubunda Tablo 3'deki gibi Mg elementinin yüzde miktarının diğer gruplarla kıyaslandığında daha fazla miktarda olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Far camlarında bulunan elementlerin % miktarları
Table 4. Percentage of elements found in headlight lenses

Numune	Al	Fe	Ti	Ca	Mg	Na	K	Ba	As	Co	Ni	Rb	Sr	Pb
F2	0.028	0.013	0.003	3.155	0.029	10.692	1.742	0.000	0.024	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
F3	0.069	0.015	0.012	5.024	0.037	11.121	2.669	0.007	0.002	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002
F4	0.064	0.015	0.013	6.001	0.193	12.170	1.214	0.005	0.004	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002
F5	0.057	0.011	0.004	3.375	0.024	10.445	2.185	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
F6	0.196	0.012	0.008	3.391	0.030	14.525	2.080	0.034	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.005
F14	0.789	0.012	0.004	4.854	0.019	7.443	1.082	0.023	0.004	0.000	0.000	0.003	0.005	0.001
F16	1.214	0.014	0.005	7.176	0.035	10.712	1.523	0.035	0.000	0.000	0.000	0.005	0.010	0.001

Tablo 4'teki ilk 4 far camı numunesine bakıldığında, Al elementi değerlerinin geri kalan 3 far camı numunesine kıyasla daha düşük değerlerde bulunduğu gözlemlenmektedir. Araba farlarında, Al genellikle koruyucu kaplama olarak cam yüzeyine uygulanarak camın dayanıklılığını artırabilir (Cuddy 2001). Bu farkın, numunelerin temin edildiği iki farklı far camı üreticisinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Kalsiyum (Ca) elementi far camlarında şeffaflığı ve ışık geçirgenliğini artırmak için kullanılması sebebiyle F16 kodlu sis farı numunesinde diğer numunelere göre fazla olmasını açıklamaktadır.

Genel olarak camlarda eser miktarda bulunan As, Co, Ni, Rb, Sr ve Pb elementlerinin far camı grubundaki numunelerin farklılaştırılmasında etkin elementler olmadığı görülmektedir. Ayrıca Na ve K elementlerinin yüzde değerlerinin, diğer cam gruplarına kıyasla far camı grubunda daha geniş bir aralığa yayılmakta olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, hem XRF cihaz bulguları hem de 3B PCA analiz sonuçlarıyla (Şekil 2'ye bakınız) uyumludur.

3.2. XRF analiz tabloları
3.2. XRF analysis tables

XRF analizlerinde S, D ve F gruplarındaki 57 adet örnekte, toplam 10 elementin (Alüminyum, Demir, Titanyum, Kalsiyum, Magnezyum, Sodyum, Potasyum, Kükürt, Baryum ve Krom) yüzdeleri belirlenmiştir ve bulunan değerler Tablo 5-7'de sunulmuştur.

Tablo 5. Şişe camlarda bulunan elementlerin % miktarları
Table 5. Percentage of element amounts of elements found in bottle glasses

Numune	Al	Fe	Ti	Ca	Mg	Na	K	S	Ba	Cr
S1	0.079	0.011	0.016	5.414	0.096	11.332	1.536	0.115	0.793	0.000
S2	0.090	0.011	0.015	5.589	0.124	11.451	1.552	0.117	0.690	0.000
S3	0.095	0.011	0.016	5.496	0.103	11.035	1.361	0.105	0.636	0.000
S4	0.101	0.011	0.016	5.514	0.103	11.054	1.361	0.106	0.622	0.000
S5	0.127	0.012	0.017	5.585	0.100	10.954	1.461	0.115	0.676	0.000
S6	0.095	0.012	0.019	5.492	0.103	11.491	1.345	0.124	0.631	0.000
S7	0.916	0.035	0.030	7.261	1.686	9.815	0.100	0.097	0.000	0.000
S8	0.892	0.040	0.030	7.151	1.894	9.759	0.133	0.096	0.000	0.001
S9	0.879	0.041	0.028	7.297	1.734	9.640	0.133	0.094	0.000	0.000
S10	1.021	0.152	0.029	7.383	1.809	10.078	0.627	0.100	0.013	0.156
S11	1.029	0.153	0.030	7.383	1.803	10.078	0.623	0.070	0.009	0.156
S12	0.836	0.192	0.029	7.858	0.633	9.444	0.473	0.021	0.045	0.137
S13	0.704	0.046	0.035	7.919	1.019	9.681	0.208	0.066	0.009	0.001
S14	0.897	0.023	0.018	8.030	0.229	10.353	0.042	0.117	0.000	0.000
S15	0.291	0.105	0.021	7.183	1.722	9.852	0.158	0.067	0.009	0.001
S16	0.709	0.049	0.034	7.840	1.037	9.670	0.224	0.053	0.013	0.001
S17	0.717	0.032	0.018	7.697	1.122	9.199	0.208	0.063	0.027	0.000
S18	0.667	0.037	0.023	7.976	0.335	10.553	0.315	0.074	0.004	0.000
S19	0.969	0.347	0.049	6.918	1.719	10.097	0.108	0.015	0.000	0.101
S20	0.894	0.075	0.035	7.304	1.472	10.156	0.100	0.088	0.004	0.001
S21	0.683	0.046	0.021	8.709	0.090	9.815	0.398	0.059	0.000	0.000
S22	0.945	0.045	0.019	8.805	0.072	8.891	0.984	0.089	0.009	0.000
S23	0.725	0043	0.030	7.805	0.989	9.670	0.224	0.058	0.022	0.001
S24	1.006	0.031	0.017	7.969	0.127	9.525	0.988	0.091	0.036	0.000
S25	0.963	0.037	0.020	8.426	1.254	8.810	0.847	0.067	0.049	0.001

Cam örnekleri yeterli büyüklükte olduğunda, renk veya ton farkları gözle görülebilmekle birlikte, adli olaylarda karşılaşılan cam numunelerinin çoğu, boyutları itibarıyla renk özelliği açısından herhangi bir analitik yöntem kullanılmadan ayırt edilmesine olanak tanımamaktadır. Fe, cam numunelerinin renkli olup olmadığını belirlemede yardımcı olan önemli bir elementtir. Tablo 5'te görüldüğü üzere, bazı numunelerde (S10, S11, S12, S15, S19 kodlu) Fe elementinin yüzde değeri, diğer numunelere göre belirgin şekilde daha yüksektir. Bu da söz konusu numunelerin yeşil ya da mavi renkli şişeler (Tablo 1'e bakınız) olduğunu göstermektedir. Camın renk özelliğini değiştirmek için kullanılan bir diğer elementte kromdur (Cr). S10, S11, S12 ve S19 kodlu numunelerde Cr elementinin yüksek miktarda ölçülmüşken bir diğer renkli cam olan S15 kodlu numunede Cr değeri son derece düşük ölçülmüştür. Özellikle yeşil ve kahverengi camlarda bu elemente rastlanıldığı için bu elementin camın renkli olup olmaması ve renkliyse hangi renk tonunda olabileceği hakkında tanımlama yapılmasında etkili olabileceğini göstermektedir. Bu bulgu füme renkte olan D1 (Tablo 1'e bakınız) kodlu numunenin Cr değeri ile de uyumludur (Tablo 6'ya bakınız).

Tablo 5'teki ilk 6 şişe camı numunesine bakıldığında, diğer numunelere kıyasla Fe, Ti, Ca, Mg, Na, K ve Ba elementlerinin değerlerinde kendi içlerinde belirgin bir gruplanma olduğu gözlemlenmektedir. Bu farkın LA-

ICP-MS cihazıyla yapılan analizlerde de benzer olduğu görülmektedir (Tablo 2'ye bakınız). Bu gruplaşmanın şişe numunelerin temin edildiği üretici firmanın farklı olmasından kaynaklandığı görülmektedir.

Potasyum elementi camın parlaklık ve estetik özelliklerini artırır. İlk 6 şişe numunesinde K miktarının belirgin olarak fazla olmasının şişe numunelerinden farklı olarak, bu firma daha dekoratif ve özel kullanım amaçlı şişeler üretmektedir. Tablo 5'te Mg elementinin bazı şişe numunelerinde diğerlerine göre daha fazla miktarda bulunduğu görülmektedir. Bunların içerisinde yüksek miktarda Mg içeren S9, S10, S11, S12 ve S15 kodlu numunelerin soda şişesi olduğu, S17, S19, S23 ve S25 kodlu numunelerin içki şişesi olduğu bilinmektedir. Aynı amaçlı üretilen bu şişelerde yüksek miktarda Mg içeriğine rastlanmış olması bu elementin camın farklılandırılmasında katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Tablo 6. Düz camlarda bulunan elementlerin % miktarları
Table 6. Percentage of element amounts of elements found in flat glasses

Numune	Al	Fe	Ti	Ca	Mg	Na	K	S	Ba	Cr
D1	0.426	0.904	0.026	6.104	2.491	10.048	0.116	0.069	0.000	0.006
D2	0.069	0.123	0.006	6.243	2.274	10.427	0.075	0.083	0.000	0.000
D3	0.079	0.073	0.006	6.254	2.280	10.453	0.083	0.081	0.000	0.000
D4	0.550	0.465	0.034	5.789	2.633	10.267	0.033	0.077	0.000	0.001
D5	0.553	0.362	0.038	6.007	2.512	10.052	0.382	0.081	0.000	0.001
D6	0.471	0.073	0.036	6.100	2.512	10.086	0.390	0.104	0.000	0.001
D7	0.569	0.084	0.031	6.093	2.639	10.275	0.050	0.088	0.000	0.001
D8	0.032	0.074	0.007	6.236	2.488	10.282	0.025	0.093	0.000	0.000
D9	0.450	0.074	0.017	6.547	2.177	10.694	0.332	0.135	0.000	0.000
D10	0.550	0.074	0.028	6.439	2.424	9.566	0.208	0.077	0.000	0.001
D11	0.770	0.061	0.035	5.978	2.153	10.078	0.042	0.118	0.000	0.001
D12	0.513	0.052	0.034	6.414	2.394	10.323	0.042	0.104	0.000	0.001
D13	0.566	0.074	0.028	5.986	2.536	10.393	0.050	0.097	0.000	0.001
D14	0.450	0.055	0.033	6.136	2.126	9.767	0.224	0.086	0.009	0.001
D15	0.799	0.211	0.027	5.850	2.427	10.112	0.423	0.095	0.004	0.001

Tablo 6'da görüldüğü üzere, D1, D4, D5 ve D9 kodlu Fe elementinin yüzdesi, diğer numunelere göre belirgin şekilde daha yüksektir. Bu durum, söz konusu numunelerin renkli şişeler olduğunu işaret etmektedir. Bununla birlikte, Ca, Na ve Mg gibi majör elementlerin, düz cam örnekleri arasında yüzdece bulunma yoğunlukları Şekil 3'teki bulgularla uyumlu olacak şekilde tutarlılık göstermektedir.

Baryum (Ba) camda minör bulunan elementlerdendir. Bununla beraber S ve F gruplarında belirgin olarak ölçüldüğü (Tablo 5 ve Tablo 7'ye bakınız) ancak D grubunda D14 ve D15 kodlu numuneler dışında görülmemektedir. Bir elementin varlığı kadar yokluğu da camın tanımlanmasında faydalı olacağından bu veri dikkat çekmektedir. LA-ICP-MS cihazında eser miktarda da olsa Ba elementinin düz cam grubunda ölçüldüğü (Tablo 3'e bakınız) görülmektedir. Buna rağmen camda bulunmadığı kabul edilmeyecek kadar düşük miktarda tespit edilmiştir.

Tablo 7. Far camlarında bulunan elementlerin (%) miktarları
Table 7. Percentage of elements found in headlight lenses

Numune	Al	Fe	Ti	Ca	Mg	Na	K	S	Ba	Cr
F1	0.069	0.011	0.012	5.739	0.160	10.642	2.146	0.137	0.009	0.000
F2	0.037	0.011	0.004	3.988	0.036	13.105	2.192	0.114	0.000	0.001
F3	0.069	0.011	0.012	4.928	0.030	10.149	2.212	0.081	0.009	0.001
F4	0.064	0.011	0.013	5.828	0.169	11.083	1.129	0.133	0.000	0.000
F5	0.074	0.008	0.004	3.970	0.024	12.293	2.636	0.075	0.009	0.001
F6	0.201	0.008	0.009	3.509	0.024	14.566	2.192	0.055	0.040	0.001
F7	0.143	0.011	0.010	3.949	0.021	12.867	2.540	0.082	0.009	0.000

Tablo 7. Far camlarında bulunan elementlerin (%) miktarları devamı
Table 7. Percentage of elements found in headlight lenses continues

F8	0.064	0.008	0.012	5.492	0.109	10.987	1.951	0.122	0.000	0.000
F9	0.064	0.011	0.012	5.739	0.145	10.920	2.129	0.136	0.004	0.000
F10	0.069	0.010	0.013	5.657	0.157	10.798	2.138	0.134	0.000	0.000
F11	0.074	0.009	0.013	5.896	0.187	11.187	0.855	0.122	0.000	0.000
F12	1.175	0.011	0.011	6.875	0.024	9.907	1.486	0.142	0.036	0.000
F13	1.146	0.009	0.004	6.833	0.018	9.674	1.449	0.123	0.036	0.000
F14	0.947	0.021	0.022	5.410	0.778	9.859	2.275	0.122	1.245	0.000
F15	0.865	0.016	0.019	5.292	2.672	9.307	1.096	0.083	1.187	0.001
F16	1.138	0.008	0.004	6.854	0.027	9.674	1.449	0.137	0.036	0.000
F17	1.159	0.013	0.011	6.811	0.048	9.596	1.449	0.080	0.036	0.000

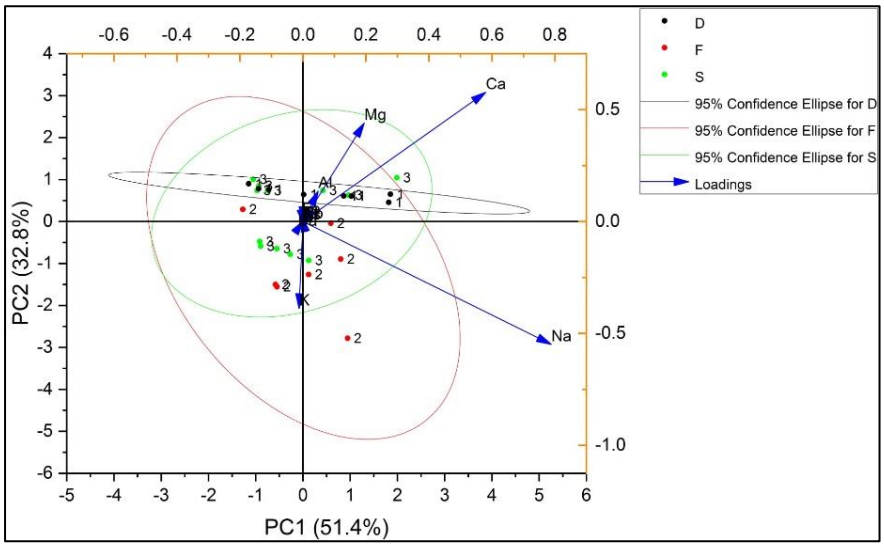
Tablo 7'deki ilk 11 far camı numunesine bakıldığında, Al elementi değerlerinde belirgin bir gruplaşma olduğu ve bu numunelerin, geri kalan 6 far camı numunesine kıyasla daha düşük değerler gösterdiği gözlemlenmektedir. Araba farlarında, Al genellikle koruyucu kaplama olarak kullanılır. Özellikle farın dış camında Al_2O_3 gibi bileşikler, cam yüzeyine uygulanarak camın dayanıklılığını artırabilir (Cuddy 2001). Bu farkın, numunelerin temin edildiği iki farklı far camı üreticisinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Ayrıca titanyum (Ti), camda ultraviyole koruma özelliği sağlayan elementlerdendir (Aydın, 2012; Cuddy 2001). Dekoratif amaçlı üretilen ya da güneş gözlükleri gibi optik özellikleri önemli olan camlarda Ti elementinin yüzdece miktarı önemli olmaktadır. Üç grupta incelenen camlarda bu elemente en az miktarda rastlanan grup Tablo 7'de görüldüğü gibi far camıdır. Ti elementinin özellikleri göz önüne alındığında bu bulgu camın sınıflandırılmasında faydalı olacağını göstermektedir. Ayrıca camda S elementi ısıya karşı dayanıklılığı sağlayan elementlerden biridir (Aydın, 2012). Far grubunda ışık enerjisinin ısıya dönüşeceği göz önünde bulundurularak bu element diğer gruplara göre far camlarında yüzdece daha fazla miktarda yer alması bulgularla uyumluluk göstermektedir.

Far grubunda bulunan numunelerin Cr elementi ölçümleri ya yok kabul edilebilecek oranda düşük ya da sıfır olarak çıkmıştır. Bu da numunelerin renksiz olması bulgusuyla örtüşmektedir. Benzer şekilde Al, Fe, Ca ve Mg elementleri far grubu numunelerinde diğer gruplarla karşılaştırıldığında belirgin olarak düşük miktarlarda ölçüldüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca Tablo 7'de Na ve K elementlerinin yüzde değerlerinin, diğer cam gruplarına kıyasla far camı grubunda daha geniş bir aralığa yayılmakta olduğu gözlemlenmektedir.

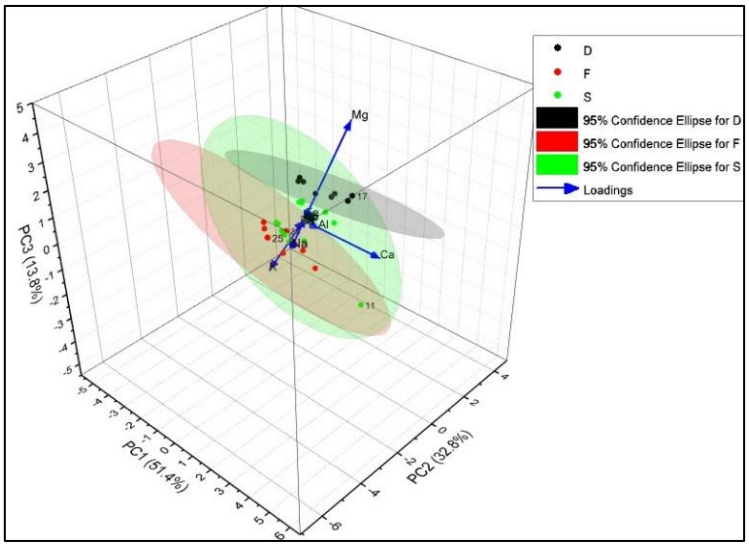
3.3. PCA şekilleri
3.3. PCA figures

Tablo 2-4 arası verilen 378-verideki (27×14 matris) ve Tablo 5-7 arası verilen 570-verideki (57×10 matris) farklılıkları istatistiksel olarak belirlemek için denetimsiz bir kemometrik yöntem olan PCA uygulanmış ve Şekil 1–7'de verilen skor ve yükleme grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 1–2'de LA-ICP-MS ile elde edilen bulgulardan ve Şekil 3–4'te XRF ile elde edilen bulgulardan yola çıkarak S, D ve F grupları arasındaki ayrım istatistiksel olarak PCA ile incelenmiştir. Şekil 5-7'de ise LA-ICP-MS ve XRF ile elde edilen bulgularından yola çıkarak S, D ve F gruplarında tek tek istatistiksel olarak çok değişkenli kemometrik bir yöntem olan PCA ile incelenmiştir.

Şekil 1'de, PC1 ve PC2 ile 2B PCA oluşturulmuş ve bu iki temel bileşenin toplam varyansın sırasıyla %51,4 ve %32,8'ini (PC1+PC2=%84,2) açıkladığı görülmüştür. Bu grafikte, düz cam (D) grubu üst-sağ ve üst-sol (up-right and up-left) bölgelerinde kümelenirken, şişe ve far camı grupları tüm bölgelere dağılmaktadır. En geniş dağılıma sahip ola S grubundaki numunelerin, kullanım amacına göre çok çeşitli olmasından kaynaklı, üç grup içerisinde en geniş dağılıma sahip olduğu görülmektedir.

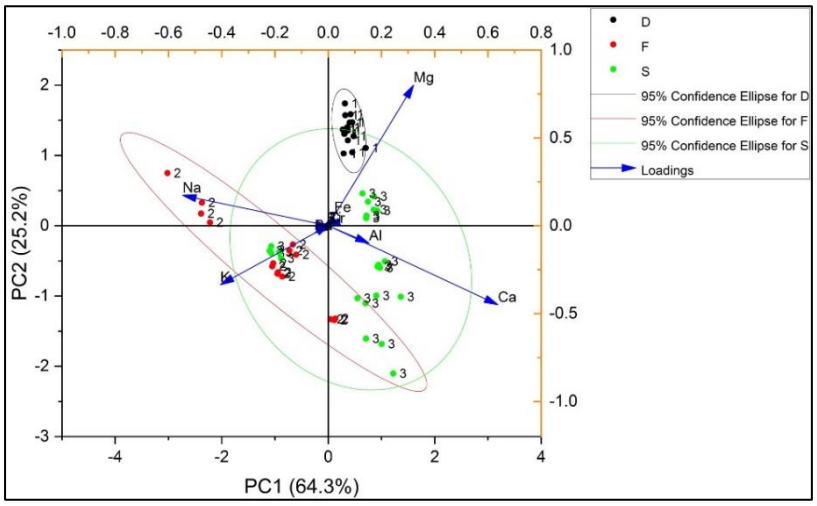


Şekil 1. S, D ve F cam örneklerinde LA-ICP-MS kullanarak ölçülen elementlerin % bağıl içeriği verilerinin kemometrik proseslenmesiyle elde edilen PCA'nın 2B puan ve yükleme çizelgesi.
Figure 1. *The 2D score and loading plots of the PCA obtained through chemometric processing of the relative elemental content percentages measured by LA-ICP-MS in B, F, and H glass samples.*



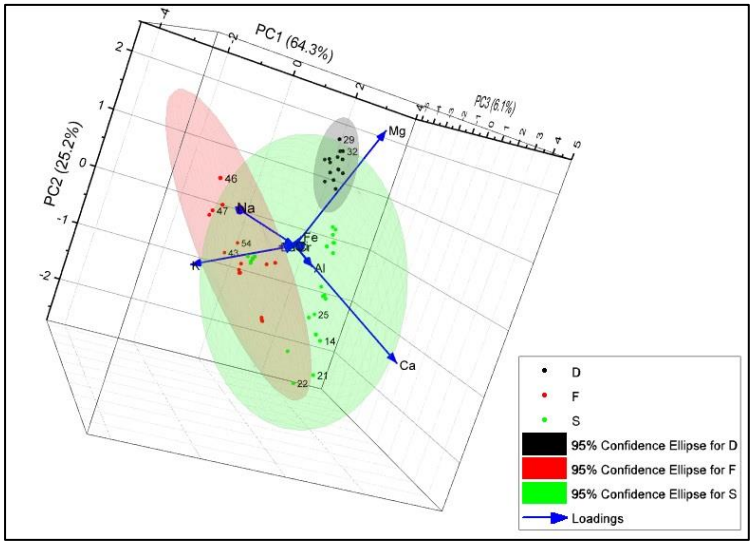
Şekil 2. S, D ve F cam örneklerinde LA-ICP-MS kullanarak ölçülen elementlerin % bağıl içeriği verilerinin kemometrik proseslenmesiyle elde edilen PCA'nın 3B puan ve yükleme çizelgesi.
Figure 2. *The 3D score and loading plots of the PCA obtained through chemometric processing of the relative elemental content percentages measured by LA-ICP-MS in B, F, and H glass samples.*

Gruplar arasındaki ayrımı istatistiksel olarak daha güçlü başarmak amacıyla Şekil 2'de görüldüğü gibi verilere 3B PCA uygulanmış ve bu analizde toplam varyansın %98'e ulaştığı görülmüştür. Ayrıca far gruplarında Tablo 4 ve Tablo 7'de gözlemlenen Na ve K elementlerinin yüzde değerlerinin, diğer cam gruplarına kıyasla daha geniş bir aralığa yayılmakta olduğu durumu 3B PCA analiz sonuçlarıyla da uyumlu olduğu Şekil 2'de görülmektedir. Böylece Na ve K elementlerinin far camlarının gruplandırılmasında kullanılabilecek belirgin elementlerden olduğu sonucu istatistiksel verilerle de desteklenmektedir (Yatsuka, 2024).



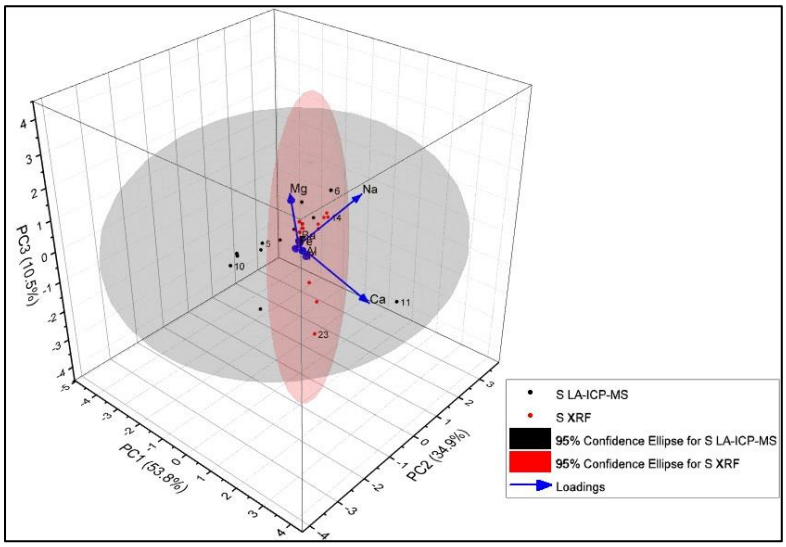
Şekil 3. S, D ve F cam örneklerinde XRF kullanarak ölçülen elementlerin % bağıl içeriği verilerinin kemometrik proseslenmesiyle elde edilen PCA'nın 2B puan ve yükleme çizelgesi.
Figure 3. *The 2D score and loading plots of the PCA obtained through chemometric processing of the relative elemental content percentages measured by XRF in B, F, and H glass samples.*

Şekil 3'teki 2B PCA'da, birinci temel bileşene (PC1) karşı ikinci temel bileşenin (PC2) grafiği oluşturulmuş ve bu iki temel bileşenin toplam varyansın sırasıyla %64,3 ve %25,2'sini (PC1+PC2= %89,5) açıkladığı görülmüştür. Bu grafikte, düz cam (D) grubu üst-sağ (up-right) bölgede kümelenirken, şişe ve far camı grupları diğer üç bölgede dağılarak yer almaktadır. Gruplar arasındaki ayrımı daha yüksek skorla başarabilmek amacıyla Şekil 4'te görüldüğü gibi verilere 3B PCA uygulanmış ve bu analizde toplam varyansın %95,6'ya çıktığı görülmüştür. S grubundaki numunelerin kullanım amacına göre çok çeşitli olmasından kaynaklı üç grup içerisinde en geniş dağılıma sahip olduğu görülmektedir.



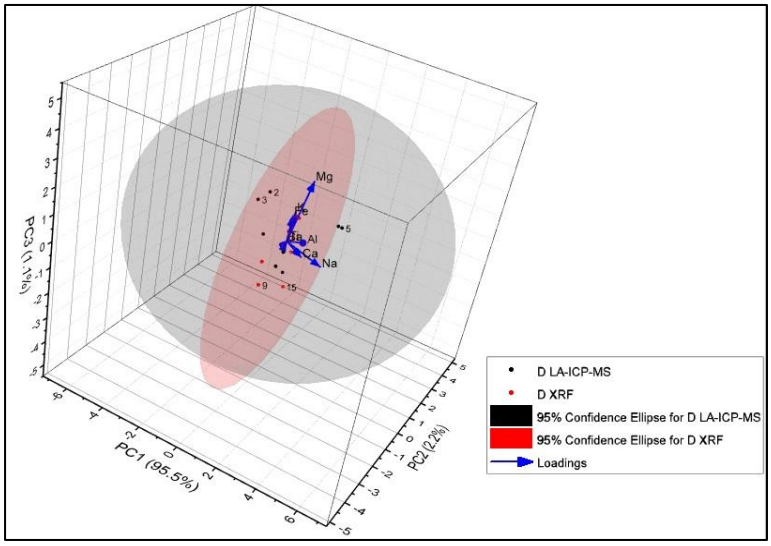
Şekil 4. S, D ve F cam örneklerinde XRF kullanarak ölçülen elementlerin % bağıl içeriği verilerinin kemometrik proseslenmesiyle elde edilen PCA'nın 3B puan ve yükleme çizelgesi.
Figure 4. *The 3D score and loading plots of PCA obtained by processing the relative content (%) of elements hrough chemometric processing of the relative elemental content percentages measured by XRF in B, F, and H glass sample.*

Şekil 4'te Mg element vektörünün özellikle D grubu için uzunluğunun, bu elementin ayırt edici elementlerden biri olabileceğini desteklemektedir. Ca, Na ve K elementlerinin yüzde değerleri, far camı grubunda daha geniş bir aralığa yayılmaktadır. Bu durum, Şekil 4'teki üç boyutlu (3B) PCA analiz sonuçlarıyla uyumlu olup, bu elementlerin far camlarının gruplandırılmasında kullanılabilecek belirgin elementler olduğu sonucunu desteklemektedir (Yatsuka, 2024).



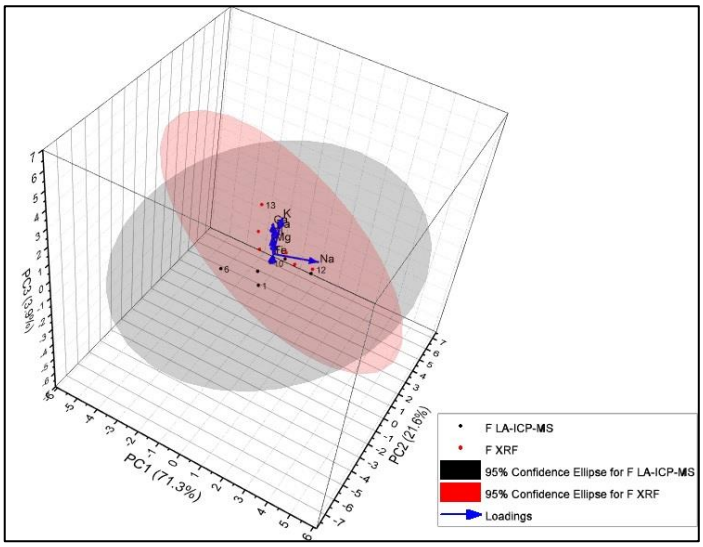
Şekil 5. S cam örneklerinde LA-ICP/MS ve XRF kullanılarak ölçülen elementlerin % bağıl içeriği verilerinin kemometrik proseslenmesiyle elde edilen PCA'nın 3B puan ve yükleme çizelgesi.
Figure 5. *The 3D score and loading plots obtained through chemometric processing of the relative elemental content percentages measured by LA-ICP-MS and XRF in B glass sample*.

Şekil 5'te görüldüğü gibi her iki cihazla ölçülen şişe camı verilerine 3B PCA kemometrik yöntemi uygulanmıştır. Üç temel bileşen olan PC1, PC2 ve PC3 toplam varyansının (PC1+PC2+PC3) %99,2'ye çıkmıştır. Şişe camı grubu bu kıyaslamada tekrardan en geniş kümelenmeye sahip grup olarak görülmektedir. Numunelerin hem toplandığı ülkeler, hem kullanılma amaçlarındaki çeşitlilik hem de renk farklılıklarının bulunması sebebiyle bu dağılımın bulgularla örtüştüğü gözlemlenmektedir. XRF cihazından elde edilen verilerinin kümelenme aralığının LA-ICP-MS ile kıyaslandığında daha dar olması bu cihazın ölçüm parametrelerinde daha hassas olduğu bulgusunu desteklemektedir.



Şekil 6. D cam örneklerinde LA-ICP/MS ve XRF kullanılarak ölçülen elementlerin % bağıl içeriği verilerinin kemometrik proseslenmesiyle elde edilen PCA'nın 3B puan ve yükleme çizelgesi.
Figure 6. *The 3D score and loading plots obtained through chemometric processing of the relative elemental content percentages measured by LA-ICP-MS and XRF in F glass sample*.

Şekil 6'da görüldüğü gibi her iki cihazla ölçülen düz cam verilerine 3B PCA uygulanmıştır. Üç temel bileşen olan PC1, PC2 ve PC3 toplam varyansın (PC1+PC2+PC3) %98,8'e çıktığı görülmektedir. Düz cam grubu her bir grup için yapılan istatistiksel incelemede en iyi kümelenen grup olarak farklılaşmaktadır. Düz cam grubu için de XRF cihaz verilerinin kümelenme aralığının LA-ICP-MS ile kıyaslandığında daha dar olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 7. H cam örneklerinde LA-ICP/MS ve XRF kullanılarak ölçülen elementlerin % bağıl içeriği verilerinin kemometrik proseslenmesiyle elde edilen PCA'nın 3B puan ve yükleme çizelgesi.
Figure 7. *The 3D score and loading plots obtained through chemometric processing of the relative elemental content percentages measured by LA-ICP-MS and XRF in H glass sample.*

Şekil 7'de görüldüğü gibi her iki cihazla ölçülen far camı verilerine 3B PCA uygulanmış ve üç temel bileşenin toplam varyansının (PC1+PC2+PC3) %96,8'e çıktığı görülmektedir. Düz cam sonuçlarıyla paralel olarak far grubunda da XRF cihaz verilerinin kümelenme aralığının LA-ICP-MS ile kıyaslandığında daha dar olması XRF cihazının ölçüm parametrelerinde daha hassas olduğu bulgusunu desteklemektedir.

4. Sonuçlar
4. Conclusions

Bu çalışmada, adli cam incelemelerine konu olan cam malzeme örnek gruplarında, XRF ve LA-ICP-MS cihazlarından elde edilen elementel analiz sonuç verilerinin, çok değişkenli bir denetimsiz kemometrik yöntem olan PCA ile proseslenmesi ile gruplama yapılması ve ilgili vakalarda başvurulmak üzere istatistiğe dayanan bir yaklaşımın önerilmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneylerde kullanılan yöntemlerden XRF yönteminin daha hassas ölçümler yaptığı gözlemlenmiştir. Tüm cam türleri üzerinde XRF yöntemi için elementel analiz bulgularının tabloları incelendiğinde, Na ve Ca elementlerinin miktarları arasında belirgin bir fark görülmemiş; dolayısıyla ayırt etmede tek başlarına bir ölçüt olarak kullanılmalarının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Buna bağlı olarak bu elementler PCA ile değerlendirdiğinde aralarında belirgin bir fark olduğu gözlenmemiştir. Mg elementi ise her iki cihaz bulgularında tutarlı sonuçlar vererek düz cam grubu için ayırt edici elementlerden biri olarak tespit edilmiştir. Fe elementinin, renkli ve renksiz cam örneklerinin ayrımı için kullanılabilir olduğu görülmüştür. Yine de bazı durumlarda tek başına yeterli olmayacağı, Al gibi ikincil bir elementle sonuçların desteklenmeye ihtiyacı olduğunu göstermiştir. S, D ve F grupları için her iki analitik yöntemden elde edilen analiz sonuçlarına 3B PCA uygulandığında >%95 gibi yüksek skora ulaşılabildiği görülmüş olup bu durum PCA analizlerinde sadece 2B PCA sonuçlarına bağlı kalınmaması gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmada, delil niteliğinde toplanan cam numunelerinin menşeinin tespit edilmesi yoluyla, elementel analiz sonuçlarının istatistiksel olarak gruplandırılması üzerine yöntem değerlendirmeleri yapılmıştır. Önerilen yaklaşımlar ışığında gerçekleştirilecek ilave laboratuvar çalışmaları ve istatistiksel analizlerle, adli cam incelemelerine gelecekte daha fazla bilimsel katkı sağlanacağına inanılmaktadır.

Teşekkür
Acknowledgement

Yazar, deneyler sırasında laboratuvar altyapısını kullanılmasına olanak tanıyan Şişecam ARGE Merkez Yöneticilerine ve cam karakterizasyonu konusunda sağladıkları katkılar için Dr. Semin Atılgan ve Nurettin Kılıçalp'e, makalenin incelenmesi ve değerlendirilmesi süresince katkı veren editör ve hakemlere teşekkür eder.

Yazar katkısı
Author contribution

Birinci yazar araştırma çalışmasının planlanması, literatür taraması, deneysel çalışmaların yapılması ve bulguların incelenmesi; ikinci yazar bulguların kemometrik incelenmesi ve makalenin kontrolü; üçüncü yazar yazım denetimi, sonuçların incelenmesi ve makalenin son yazım aşamalarında katkı sunmuştur.

Etik beyan
Declaration of ethical code

Çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin kullanımında etik kurul iznine ve/veya yasal-özel izne ihtiyaç olmadığı tüm yazarlar tarafından beyan edilmektedir.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Herhangi bir çıkar çatışması olmadığı tüm yazarlar tarafından beyan edilmektedir.

Kaynaklar
References

Almirall, J., Trejos, T. & Lambert, K. (2020). Interpol review of glass and paint evidence 2016-2019, *Forensic Science International: Synergy, 2,* 404–415. https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2020.01.010

Aydın, E. (2012). Cam Üretiminde Sorunlu Alanlar, 1. Baskı, İstanbul, Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları

Bajic, S.J., Aeschliman, D.B., Saetveit, J.N., Baldwin, D. P. & Houk, R. S. (2005). Analysis of Glass Fragments by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry and Principal Component Analysis, *Journal of Forensic Sciences, 50 (5),* 1123-1127.

Bell, S. C. & Nawrocki, H. D. & Morris, K. B. (2009). Forensic discrimination of glass using cathodoluminescence and CIE LAB color coordinates: a feasibility study, *Forensic Science International, 189,* 93–99. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.04.023

Buscaglia, J. (1994). Elemental analysis of small glass fragments in forensic science, *Analitic Chimica Acta, 288,* 17-24.

Caddy, B. (2001) Forensic Examination of Glass and Paint (1. Baskı), Taylor & Francis, https://doi.org/10.1201/9780203483589

Çakır, İ. (2003). *Enerji dağılımlı x-ışını analizörlü taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) ile sıkça karşılaşılan katı adli delillerin incelenmesi*, [Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Adli Tıp Enstitüsü].

Corzo, R., Hoffman, T., Ernst, T., Weis, P., Stryjnik, A., Dorn, H., Pollock, E., Workman, S. M., Jones, P., Nytes, B., Scholz, T., Huifang, X., Igowsky, K.**,** Nelson, R., Gates, K., Gonzalez, J., Voss, L.M. & Almirall, J. (2021). An interlaboratory study evaluating the interpretation of forensic glass evidence using refractive index measurements and elemental composition, *Forensic Chemistry, 22,* 100307. https://doi.org/10.1016/j.forc.2021.100307

Destanoğlu, O. (2022). Discrimination and authentication of geographical origin of Turkish Taşköprü garlic by investigating volatile organosulfur compound profiles and multivariate analyses, *Turkish Journal of Chemistry, 46 (4),* 1152-1163. doi:10.55730/1300-0527.3423

Doğan, N. (1996). *Sodalı camların elektromanyetik radyasyon karşısındaki davranışı*, [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsü].

Doremus, R. H. (1994). *Glass science,* (2nd edt). , A Wiley-Interscience Publication.

Grieve, M.C., Dunlop, J. & Haddock, P. (1988). An assessment of the value of blue, red, and black cotton fibers in forensic science investigations, *Journal of Forensic Sciences, 33,* 1332–1344. doı:10.1520/JFS12577J

Hammond, D.L. (2007). Validation of LAB color mode as a nondestructive method to differentiate black ballpoint pen inks, *Journal of Forensic Sciences, 52(4),* 967–973. doi: 10.1111/j.1556-4029.2007.00469.x

Hicks, T., Monard Sermier, F., T Goldmann, T., Brunelle, A., Champod, C. & Margot, P. (2003), The classification and discrimination of glass fragments using non destructive energy dispersive X-ray μfluorescence, *Forensic Science International, 137* (2-3), 107-118. https://doi.org/10.1016/S0379-0738(03)00278-0

Hoffman, T., Corzo, R., Weis, P., Pollock, E., Es, A., Wiarda, W., Stryjnik, A., Dorn, H., Heydon, A., Hoise, E., Franc, S., Huifang, X., Pena, B., Scholz, T., Gonzalez, J. & Almirall, J. (2018). An inter-laboratory evaluation of LA-ICP-MS analysis of glass and the use of a database for the interpretation of glass evidence, *Forensic Chemistry, 11*, 65-76. https://doi.org/10.1016/j.forc.2018.10.00

Maeo, S., Sakai. I., Kuzushita, K. & Taniguchi K. (2007). Development of micro X-ray fluorescence spectrometer with multi excitation sources, *Spectrochimica Acta Part B, 62,* 562-566

Martinez-Lopez, C., Ovide, O., Corzo, R., Andrews, Z., Almirall, J. & Trejos, T. (2022). Homogeneity assessment of the elemental composition of windshield glass by μ-XRF, LIBS and LA-ICP-MS analysis, *Forensic Chemistry, 27*, 100384. https://doi.org/10.1016/j.forc.2021.100384

O'Sullivana, S., T. Geddesb, T. & Lovelockb, J. (2011). The migration of fragments of glass from the pockets to the surfaces of clothing, *Forensic Science International, 208 (1-3),* 149-155. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.11.020

Özmerinoğlu, Y. (2008). *Adli olaylarda karşılaşılabilecek cam örneklerinin mikroanalitik yöntemler kullanılarak tanımlanması ve farklılandırılması*, [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Adli Tıp Enstitüsü].

Saferstein, R. (2004). *Criminalistics: an introduction to forensic science*, (8th ed.). Pearson Prentice Hall.

Suzuki, Y., Sugita, R., Suzuki, S. & Maruma, Y. (2000). Forensic Discrimination of Bottle Glass by Refractive Index Measument and Analysis of Trace Elements with ICP-MS, *Analytical Sciences, (16),* 1195-1198.

Suzuki, Y., Kasamatsu, M., Suzuki, S., Nakanishi, T., Takatsu, M., Muratsu, S., Shimoda, O.,Watanabe, S., Nishiwaki, Y. & Miyamoto, N. (2005). Forensic discrimination of sheet glass by a refractive-index measurement and elemental analysis with synchrotron radiation x-ray spectrometry, *Ananlytical Science, 21(7),* 855-859. doi: 10.2116/analsci.21.855

Trejos, T., Koons, R., Becker, S., Palenik, C., Berman, T., Buscaglia, J., Duecking, M., Eckert-Lumsdon, T., Ernst, T., Hanlon, C., Heydon, A., Mooney, K., Nelson, R., Olsson, K., Palenik, C., Pollock, E., Rudell, D., Ryland, S., Tarifa, A., Valadez, M., Weis, P. & Almirall, J. (2013). Cross-validation and evaluation of the performance of methods for the elemental analysis of forensic glass by μ-XRF, ICP-MS, and LA-ICP-MS, *Anal Bioanal Chem, 405*, 5393-5409. doi: 10.1007/s00216-013-6978-y

Ustaer, C. (1995). *Cam bilimi'ne giriş,* 1. Baskı, I.Cilt. İstanbul Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu.

Yatsuka, O., Kochb, L., Giannossac, L.C., Annarosa Mangone, A., Fioccoe, G., Malagodie, M., Gorghiniang, A., Ferrettih, M., Davita, P., Cristiano Iaiai, C. & Monica Gulminia, M. (2024). Back to black: Analysis of the earliest natron glass found in Italy, Journal of Archaeological Science (57). DOI: 10.1016/j.jasrep.2024.104648

Zadora, G. (2001). Examination of the refractive index of selected samples of glass for forensic purposes, *Problems of Forensic Sciences, 45,* 36-51.

Zadora, G. (2009). Classification of glass fragments based on elemental composition and refractive index**,** *Journal of Forensic Sciences, 54(1),* 49-59. doi: 10.1111/j.1556-4029.2008.00905.x

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 36-50 doi: 10.17714/gumusfenbil.1563367 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Sinüzoidal dalgalı bir kanalda akış ve ısı transferi üzerinde dalga genliğinin ve dairesel engellerin etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of wave amplitude and circular obstacles on flow and heat transfer in a sinusoidal wave channel

Elif ÇELİK[1], Selma AKÇAY*[2]

[1]*Çankırı Karatekin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, 18100, Çankırı*

[2]*Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 18100, Çankırı*

• Geliş tarihi / *Received*: 08.10.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 23.12.2024

Öz

Bu çalışma, sinüzoidal dalgalı bir kanalda dalga genliğinin ve kanal içerisine eklenen dairesel engellerin akış ve ısı transferini sayısal olarak incelemektedir. Çözümler, ANSYS Fluent çözücü ile analiz edilmiştir. Çalışmada, kanalın dalga genliğinin (s), dairesel engellerin çapının (d) ve kanalın giriş hızının etkileri araştırılmıştır. Analizler, ilk önce dairesel engellerin olmadığı (d=0) kanalın üç farklı dalga genliği için (s: 20mm, 30mm ve 40mm) gerçekleştirilmiş, daha sonra dalga genliği sabit tutularak (s=40mm) kanal merkezine yerleştirilen dört adet dairesel engellerin farklı çapları (d: 4mm, 6mm, 8mm) için incelenmiştir. Dalgalı kanalın yüzeyleri, T_s=350 K sıcaklığında korunmaktadır. Çözümler, 3000≤Re≤8000 aralığındaki Reynolds sayıları için uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, Nusselt sayısı (Nu), ısı transferi iyileşme oranı (ER), basınç düşüşü (ΔP), sürtünme faktörü (f) ve performans faktörü (PF) hesaplanmıştır. Sonuç olarak tüm kanallarda Reynolds sayısının artması ile ısı transferi iyileşmiştir. Kanalın dalga genliğinin artması ile Nu artmıştır. İçerisinde dairesel engellerin olmadığı (d=0) kanalda, s=40mm dalga genliğinde ısı transferi, düz kanal göre 1.47 kat iyileşmiştir. Sabit bir dalga genliğinde (s=40mm) içerisinde engellerin olduğu kanalda, dairesel engellerin çaplarının artması ile Nusselt sayısı artmıştır. En yüksek engel çapında (d=8mm) ısı transferinin düz kanala göre 1.82 kat iyileştiği tespit edilmiştir. İçerisinde engellerin olmadığı (d=0) kanallarda, en yüksek PF, s=40mm ve Re=4000'de PF=1.10 olarak elde edilmiştir. Dairesel engellerin varlığında, en yüksek PF, Re=8000 ve d=4mm durumunda PF=1.08 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada, iki farklı pasif yöntemin birlikte kullanılması ile akış ve ısı transferi davranışı incelenmiş ve sonuçların kanal tasarımcılarına bir kılavuz olması amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Dalga genliği, Dairesel engeller, Isı transfer iyileşmesi, Sinüzoidal dalgalı kanal

Abstract

This study numerically investigates the flow and heat transfer of the wave amplitude and the circular obstacles added into the channel in a sinusoidal wave channel. The solutions are analyzed with ANSYS Fluent solver. In the study, the effects of the wave amplitude (s) of the channel, the diameter of the circular obstacles (d) and the inlet velocity of the channel are investigated. The analyses are first carried out for three different wave amplitudes (s: 20 mm, 30 mm and 40 mm) of the channel without circular obstacles (d=0), then the wave amplitude is kept constant (s=40 mm) and the four circular obstacles placed at the center of the channel with different diameters (d: 4 mm, 6 mm, 8 mm) are investigated. The surfaces of the wavy channel are maintained at the temperature T_s=350 K. The solutions are applied for Reynolds numbers in the range of 3000≤Re≤8000. As a result of the study, Nusselt number (Nu), heat transfer improvement rate (ER), pressure drop (ΔP), friction factor (f) and performance factor (PF) were calculated. As a result, heat transfer improved with the increase in Reynolds number in all channels. Increasing the wave amplitude of the channel increased the Nu. In the channel without circular obstacles (d=0), heat transfer at s=40mm wave amplitude was improved by 1.47 times compared to the straight channel. In the channel with obstacles at a constant wave amplitude (s=40mm), Nusselt number increased with the increase in the diameters of the circular obstacles. It was determined that heat transfer at the highest obstacle diameter (d=8mm) improved by 1.82 times compared to the straight channel. In channels without obstacles (d=0), the highest PF was obtained as PF=1.10 at s=40mm and Re=4000. In the presence of circular obstacles, the highest PF was found to be PF=1.08 in the case of Re=8000 and d=4mm. In this study, the flow and heat transfer behavior was investigated by using two different passive methods together and the results were aimed to be a guide for channel designers.

Keywords*: Wave amplitude, Circular obstacles, Heat transfer improvement, Sinusoidal wavy channel*

*Selma AKÇAY; selmaakcay@karatekin.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Isı değiştiricileri, elektronik devrelerin soğutulması, nükleer reaktörlerin termal yönetimi, gıda ve kimya sanayi başta olmak üzere pek çok proseslerinin etkili şekilde yürütülmesi, sistemin verimliliğinin artırılması ve maliyetlerin azaltılması açısından ısı transferi iyileştirme yöntemlerine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır (Zhang vd., 2019). Isı transferi iyileştirme yöntemleri, mevcut enerjinin etkin kullanılması ve enerji tasarrufunun sağlanması için büyük önem arzetmektedir. Bu nedenle araştırmacılar, farklı ısı transferi iyileştirme yöntemleri üzerinde çalışmaktadır. Bu yöntemlerden pasif yöntemler, harici enerjiye ihtiyaç duymaması ve diğer yöntemlere göre daha ekonomik olması nedeniyle pek çok mühendislik uygulamalarında büyük ilgi görmektedir (Ajarostaghi vd., 2022).

Pasif yöntemler arasında, dalgalı ve uzatılmış yüzeylerin kullanılması yaygın bir uygulamadır. Bu yüzeyler, ısı transfer yüzey alanını artırdığı için ısı transferinin iyileşmesine önemli katkı sağlar. Bu nedenle farklı geometrilere sahip dalgalı yüzeylerde, akış ve ısı transferi pek çok sayısal ve deneysel çalışmalarda araştırılmış ve bu çalışmaların sonucunda, basınç düşüşünde bir artışla birlikle dalgalı kanallarda ısı transferinin düz kanallara göre daha yüksek elde edildiği bildirilmiştir (Kurtulmuş & Şahin, 2019; Alfellag vd., 2022). Dalgalı kanallarda kullanılan dalga/oluk geometrileri arasında, üçgen veya V şeklinde geometriler (Krishnan, 2021; Li vd., 2022), yarı dairesel geometriler (Ajeel vd., 2019; Akcay, 2023b), dikdörtgen geometriler (Zontul vd., 2021), trapez geometriler (Abed vd., 2015; Ajeel vd., 2018), sinüzoidal geometriler (Khoshvaght-Aliabadi, 2014; Nakhchi, 2019) ve diğer geometrilerin kombinasyonlarından oluşan yeni dalga geometrileri (Ajeel vd., 2021; Khan vd., 2021) en çok incelenen dalga profillerini oluşturmaktadır.

Sayısal bir çalışmada, Zhang ve Che (2011) dikdörtgen, üçgen, trapez, sinüzoidal ve eliptik profillere sahip beş farklı dalgalı kanalın ısı transferini ve akışkan davranışını araştırmışlar ve çalışma sonucunda trapezoidal profile sahip kanalda ısı transferinin ve basınç kaybının diğer profillerden daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ahmet vd. (2014) üçgen, trapez ve sinüzoidal dalgalı kanalların akış ve ısı transferi davranışını sayısal olarak karşılaştırmışlar ve çalışmalarının sonucunda, trapez kanalda ısı transferinin ve basınç düşüşünün diğer kanallardan daha yüksek elde edildiğini ancak en yüksek termohidrolik performansın sinüzoidal kanalda sağlandığını bildirmişlerdir. Salami vd. (2019) çalışmalarında farklı geometrilere sahip kanallarda trapez kanalın en yüksek ısı transferini sağladığını, sinüzoidal kanalın ise en iyi termohidrolik performansa sahip olduğunu bildirmişlerdir. Bir diğer çalışmada, Shahsavar vd. (2021) üçgen, sinüzoidal ve trapez dalgalı kanallar arasında ısı transferi açısından en uygun dalga profilinin sinüzoidal kanal olduğunu belirtmişlerdir. Feng vd. (2022) üst duvarında trapez bölmeler bulunan ve alt duvarı üçgen dalgalı bir kanalda ısı transferinin düz kanala göre 1.7 kat arttığını, basınç düşüşünün 3.5 kat yükseldiğini bulmuşlar ve trapez bölmelerin performans faktörünü %30 artırdığını bildirmişlerdir. Yapılan bu çalışmalardan, dalgalı kanal profilleri arasında sinüzoidal dalga profilinin ısı transferi, basınç düşüşü ve dolayısı ile termo hidrolik performans açısından en uygun geometri olduğu konusunda genel bir görüşün hâkim olduğu anlaşılmaktadır.

İç akışlarda, kanala ilave edilen engel veya kanatçık gibi modifikasyonlar, pasif yöntemlerden bir diğeridir. Bu tür düzenlemeler, akışı belli bir yöne yönlendirmede ve akış karışımını iyileştirmede önemli rol oynar. Bu nedenle ısı transferi iyileşme uygulamalarında yaygın olarak kullanılır (Nitturi vd., 2023; Kanchan vd., 2024). Ancak bu modifikasyonların, akışa karşı bir direnç oluşturmaları nedeniyle basınç düşüşünde ve dolayısıyla pompalama gücünde bir artışa yol açmaları kaçınılmaz olmaktadır. Yapılan çalışmalarda, en az basınç düşüşü ile ısı transferini iyileştiren geometriler araştırılmaktadır (Alfellag vd., 2022; Raza vd., 2024). Zheng vd. (2021) dikdörtgen bir kanala yerleştirilen farklı yüksekliklere sahip üçgen ve dairesel engellerin türbülanslı akışta ısı transferini araştırmışlar ve engellerin yüksekliğinin artması ile basınç düşüşünün arttığını ve dairesel engellerin üçgen engellere göre daha yüksek ısı transferi sağladığını göstermişlerdir. Choudhary vd. (2022) dalgalı ve oluklu kanallara sahip ısı değiştircilerinin akış ve ısı transferini karşılaştırmışlar ve dalgalı kanaldaki basınç kaybının oluklu kanala göre daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Naderifar vd. (2022) dikdörtgen oluklu bir kanalda oluk sayısının (1-5 adet) ve kanala yerleştirilen kanatçıkların uzunluğunun (5-10mm) ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemişler ve oluk sayısının 2 ve kanatçık yüksekliğinin 7.5 mm olduğu durumda ısı transferinin en yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Akçay (2023a) sayısal çalışmasında, dikdörtgen, dairesel, üçgen ve trapez oluklu kanallar içerisine dik olarak ilave edilen katı ve delikli bölmelerin, hidrolik ve termal performansını incelemiş ve katı bölmelerin ısı transferini ve basınç düşüşünü artırdığını, delikli bölmelerin daha az basınç kaybına neden olduğunu bildirmiştir.

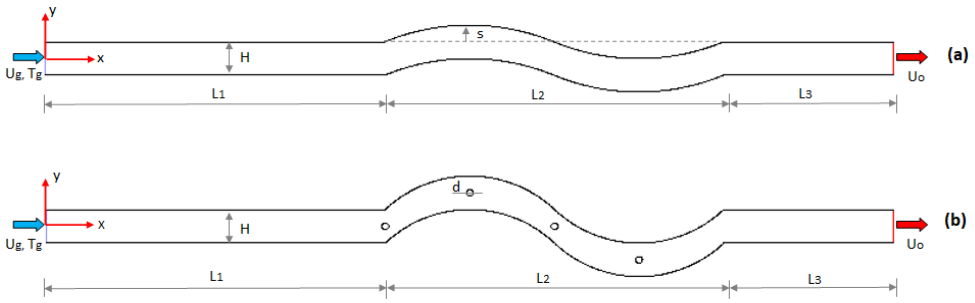
Yukarıdaki çalışmalar, dalgalı kanallar içerisine ilave edilen engellerin ve kanatçıkların akış ve ısı transferi davranışının geometrik parametrelere bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Dalgalı kanallarda, dalga sayısının artması ısı transferini olumlu yönde etkilerken basınç kaybında ise bir artışa neden olmaktadır. Yine bu araştırmalardan, sinüzoidal profile sahip kanalların ve dairesel engellerin daha düşük basınç kaybına neden olduğu anlaşılmaktadır. O nedenle bu çalışmada, sadece bir dalga uzunluğuna sahip sinüzoidal bir kanal profili kullanılmış ve kanal içerisine eklenen engeller, dairesel geometride seçilmiştir. Kanalın dalga genliğinin (s) ve dairesel engel çaplarının (d) akış ve ısı transferi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

2. Sayısal çalışma
2. Numerical study

Sayısal analizler, sonlu hacim metodu ile çözüm yapan ANSYS Fluent (2015) programı yardımıyla yapılmıştır. Çalışmada, dalgalı kanalın genliği (s), dairesel engellerin çapı (d) ve kanalın giriş hızını temsil eden Reynolds sayısı (Re) değiştirilmiştir. Bu parametreler harici diğer geometrik ve akış özellikleri sabit kalmıştır. Analizler, ilk önce dairesel engellerin bulunmadığı (d=0) dalgalı kanalda üç farklı dalga genliği (s: 20 mm, 30 mm ve 40 mm) için yapılmış, daha sonra dalgalı kanalın genliği s=40 mm sabit tutulup dalgalı bölüm içerisine farklı çapta (d: 4 mm, 6 mm ve 8 mm) dört adet dairesel engeller yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir.

2.1. Sayısal modelin tarifi
2.1.Description of the numerical model

Şekil 1'de, çalışmaya ait sayısal çözüm alanının şematiği iki boyutlu olarak gösterilmektedir. Şekil (1a) s=20 mm ve d=0 durumundaki, Şekil (1b) ise s=40 mm ve d=8 mm durumundaki sinüzoidal dalgalı kanalın geometrisini göstermektedir. Kanalın girişinde L_1=400 mm ve kanalın çıkışında L_3=200mm uzunluğunda adyabatik düz bir bölüm mevcuttur. Kanalın ortasında L_2=400 mm uzunluğunda, sabit yüzey sıcaklığına sahip sinüzoidal dalgalı bir bölüm vardır. Kanalın yüksekliği H=40 mm'dir.



Şekil 1. Sayısal modelin geometrisi, (a) s=20mm ve d=0, (b) s=40mm ve d=8mm.
Figure 1. *Geometry of the numerical model, (a) s=20mm and d=0, (b) s=40mm and d=8mm.*

2.2. Korunum denklemleri
2.2. Governing equations

Çalışmada iş yapan akışkan havadır. Analizlerde, havanın ideal gaz olduğu, tek fazlı ve Newton tipi sıkıştırılamaz bir akışkan olduğu varsayılmıştır. Akış, tam gelişmiş, sürekli şartlarda ve türbülans rejimindedir. Kanal içinde ısı üretimi yoktur. Viskoz terimler, gövde kuvvetlerin etkisi ve ışınımla ısı transferi ihmal edilmiştir. Viskoz model olarak standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Bu kabullere göre korunum denklemleri aşağıda verilmiştir (Zontul vd., 2021):

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

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial t}(\bar{u}_i) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_i\bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\right] - \rho\overline{u_i' u_j'} \tag{2}$$

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial t}(c\bar{T}) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_i\bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\Gamma + \Gamma_t)\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}\right)\right] \tag{3}$$

$$-\rho\overline{u_i'u_j'} = (\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \qquad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial t}(k)+\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_i}(k\bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho\varepsilon \tag{5}$$

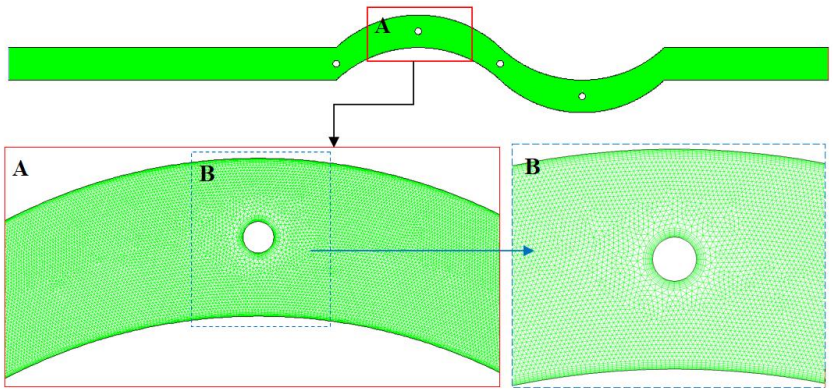
$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon)+\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon\bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

$$G_k = -\rho\overline{u_i'u_j'}\frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \qquad \Gamma = \frac{\mu}{Pr}, \qquad \Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t} \tag{7}$$

Eşitliklerin çözümünde, türbülans modelinde yer alan sabitler için, σ_k=1.0, σ_ε=1.3, $C_{1\varepsilon}$=1.44, $C_{2\varepsilon}$=1.92, C_μ=0.09 ve Pr_t=0.9 değerleri set edilmiştir (Zontul vd., 2021).

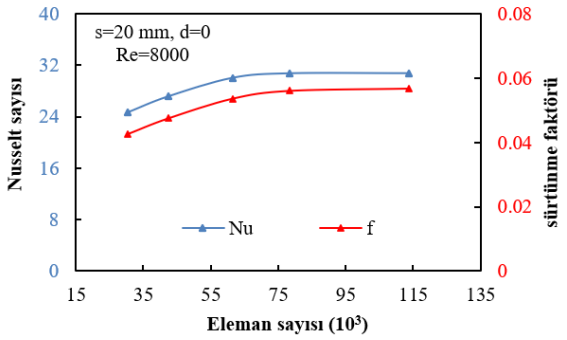
2.3. Sayısal metod ve sınır şartlar
2.3. Numerical method and boundary conditions

Sayısal modelin geometrisi Gambit yazılımı ile oluşturulmuştur. Modelin ağ yapısında, viskoz alt tabakayı doğru bir şekilde yakalamak için boyutsuz parametre y^+ değeri 1'den küçük (y^+<1) tutulmuştur. Bu nedenle kanal yüzeylerine ve silindir duvarlarına 1.1 geometrik büyüme oranında 9 sıradan oluşan yapılandırılmış bir ağ tabakası uyarlanmış ve sınırların yakınındaki eleman sayıları daha yüksek tutulmuştur. Böylece ilk ızgara noktasının viskoz alt tabakanın içinde kaldığından emin olunmuştur. Kanalın geri kalan yüzeylerine yapılandırılmamış üçgen eleman yapısı uyarlanmıştır. Modelin ağ yapısında, ağ kalitesi 0.91, hücrelerin çarpıklık (skewness) değeri ise 0.38 olduğu belirlenmiştir. Sinüzoidal dalgalı kanalın (s=40mm ve d=8 mm için) ağ yapısı detaylı olarak Şekil 2'de verilmiştir. Çözümlerin ağdan bağımsız olduğu en uygun eleman sayısının tespiti için tüm kanallara ağ bağımsızlık testi uygulanmıştır. İçerisinde dairesel engellerin olmadığı kanala uyarlanan eleman sayıları, s=20mm, s=30mm ve s=40 mm için sırasıyla 78368, 79864 ve 81078'dir. İçerisinde dairesel engellerin bulunduğu kanallarda ise eleman sayıları d=4mm, d=6mm ve d=8mm için sırasıyla 98245, 99136, 147668'dir. Re=8000'de, dalga genliği s=20 mm ve d=0 durumundaki dalgalı kanal için ağ bağımsızlık testi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Sayısal modelin eleman yapısı ve detayı (s=40mm ve d=8 mm).
Figure 2. *Mesh structure and detail of the numerical model (s=40mm and d=8mm).*

Sayısal analizler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı ANSYS Fluent (2015) yazılımı ile yürütülmüştür. Denklemlerin ayrıklaştırılması, ikinci dereceden ileri fark şeması ile gerçekleştirilmiştir. Hız-basınç ilişkisi SIMPLE algoritması ile ele alınmıştır. Standart k-ε türbülans modelinin dalgalı kanal çalışmalarında deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum gösterdiği yapılan çalışmalarla bildirilmiştir (Zontul vd., 2021). Sayısal çalışmada, bu nedenle viskoz model olarak standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Çözümlerde iterasyonlar arasındaki fark, süreklilik, momentum ve türbülans denklemleri için 10^{-5}, enerji denklemi için 10^{-7} olduğunda çözümler sonlandırılmıştır. Çözümlerin bu değerlerde yakınsadığı görülmüştür.

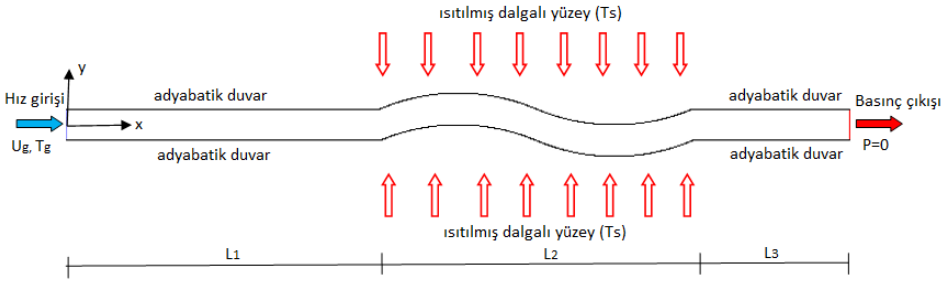


Şekil 3. Eleman sayısı ile Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü (Re=8000, s=20mm ve d=0 mm).
Figure 3. *Nusselt number and friction factor with the element numbers (Re=8000, s=20mm and d=0 mm).*

Akışkan kanala T_g=300 K sabit sıcaklıkta ve üniform bir hızla girmektedir. Akış hızı Reynolds sayısına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Analizlerde, Reynolds sayısı 3000≤Re≤8000 aralığında değişmektedir ve test edilen Reynolds sayılarına karşılık gelen kanal akış hızları Tablo 1'de verilmiştir. Kanalın girişindeki (L_1) ve çıkışındaki (L_3) düz uzunluklar adyabatik ve kaymaz şartlara sahiptir. Kanalın L_2 uzunluğundaki sinüzoidal dalgalı yüzeyleri T_s=350 K sıcaklığında sabit tutulmuştur. Kanalın çıkışında akışkan basınç çıkışı sınır şartı ile kanalı terk etmektedir. Sayısal modele uygulanan sınır şartları Şekil 4'te detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 1. Reynolds sayıları ve kanal giriş hızları.
Table 1*. Reynolds number and the velocity inlet of the channel.*

Reynolds sayısı	3000	4000	5000	6000	7000	8000
Kanal giriş hızı (m/s)	1.095	1.460	1.826	2.191	2.556	2.921



Şekil 4. Sayısal modele uygulanan sınır şartları (d=0 mm).
Figure 4. *Boundary conditions applied to the numerical model (d=0 mm).*

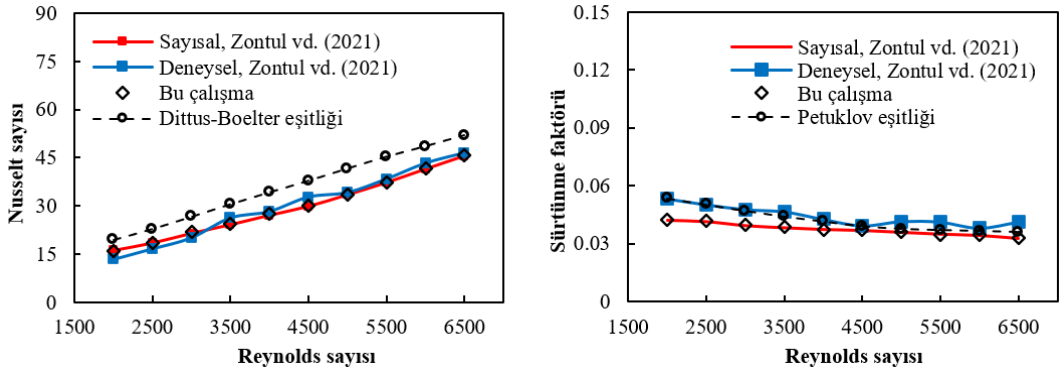
2.4. Sayısal çözümlerin doğrulanması
2.4. Validation of numerical solutions

Sayısal çalışmanın geçerliliğini sağlamak amacıyla sonuçlar, Zontul vd. (2021)'in deneysel ve sayısal sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Her iki çalışmada, benzer hidrolik çapa sahip düz bir kanal için benzer akış şartları kullanılarak Reynolds sayısı ile Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü elde edilmiştir. Düz kanallarda Nusselt sayısını tespit etmek için Dittus-Boelter eşitliği (Eşitlik 8) ve sürtünme faktörünü hesaplamak için Petuklov eşitliği (Eşitlik 9) yaygın olarak kullanılmaktadır. Sayısal çalışmadan elde edilen Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değerleri, bu ampirik bağıntılar ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarının önceki çalışma sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 5'te sunulmuş ve sonuçlar arasındaki uyum gösterilmiştir.

Dittus-Boelter korelasyonu Eşitlik 8, Petuklov korelasyonu ise Eşitlik 9'da verilmektedir (Zontul vd., 2021):

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (8)$$

$$f = [0.79\ln(Re) - 1.64]^{-2} \quad (9)$$



Şekil 5. Çözümlerin önceki çalışma sonuçları ile doğrulanması, (a) Re ile Nu, (b) Re ile f.
Figure 5. *Validation of the solutions with previous study results, (a) Nu vs. Re, (b) f vs. Re.*

2.5. Akış ve ısı transfer hesaplamaları
2.5. Flow and heat transfer calculations

Reynolds sayısı (Re), hidrolik çapa (D_h) bağlı olarak Eşitlik 10 ile hesaplanmıştır (Akçay, 2023a):

$$Re = \frac{\rho U_g D_h}{\mu} \tag{10}$$

Burada, ρ, U_g ve μ sırasıyla akışkan yoğunluğunu, akışkanın giriş hızını ve dinamik viskoziteyi göstermektedir.

Taşınım ısı transfer katsayısı (h) Eşitlik 11 ile verilmiştir (Doğukan & Akçay, 2024):

$$h = \frac{\theta}{A_s \Delta T_{log}} \tag{11}$$

$$\theta = mc_p(T_o - T_g) \tag{12}$$

Burada, ΔT_{log} logaritmik sıcaklık farkını gösterir ve Eşitlik 13 ile hesaplanır (Doğukan & Akçay, 2024):

$$\Delta T_{log} = \frac{[(T_s - T_o) - (T_s - T_g)]}{ln\left[\frac{(T_s - T_o)}{(T_s - T_g)}\right]} \tag{13}$$

burada, T_g, T_o, ve T_s sırasıyla akışkanın kanala giriş ve çıkış sıcaklıkları ve dalgalı yüzeyin sıcaklığıdır.

Nusselt sayısı (Nu) Eşitlik 14'de verilmiştir (Doğukan & Akçay, 2024):

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \tag{14}$$

Isı transfer iyileşme oranı (ER), dalgalı kanalda hesaplanan Nusselt sayısının (Nu_s), düz kanalda hesaplanan Nusselt saysına (Nu_o) oranı olarak belirlenmiş ve Eşitlik 15 ile verilmiştir (Akçay, 2023a):

$$ER = \frac{Nu_s}{Nu_o} \tag{15}$$

Sürtünme faktörü (f), basınç düşüşüne (ΔP) bağlı olarak Eşitlik 16 ile hesaplanmıştır (Akçay, 2023a):

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U_g^2} \frac{D_h}{L} \tag{16}$$

Dalgalı kanalda hesaplanan sürtünme faktörünün (f_s) düz kanalda hesaplanan sürtünme faktörüne (f_o) oranı relatif sürtünme faktörü olarak tanımlanmış ve Eşitlik 17'de verilmiştir (Doğukan & Akçay, 2024):

$$f_{rel} = \frac{f_s}{f_o} \quad (17)$$

Kanallarda ısı transferi iyileşmesinin ve sürtünme faktörünün birlikte değerlendirilmesi amacıyla performans faktörü (PF) tanımlanmış ve performans faktörü Eşitlik 18 ile gösterilmiştir (Doğukan & Akçay, 2024):

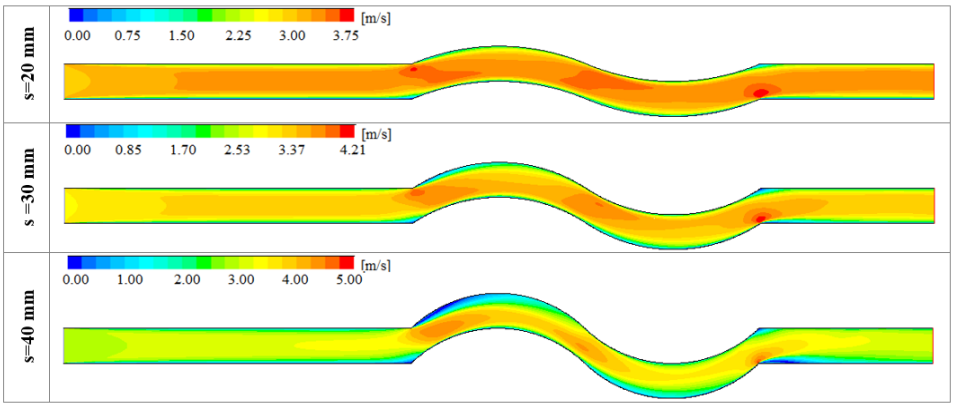
$$PF = (Nu_s/Nu_o)\,(f_s/f_o)^{-1/3} \quad (18)$$

3. Tartışma ve sonuçlar
3. Discussion and results

Sayısal analizler, üç farklı dalga genliğinde ve sabit bir dalga genliği için üç farklı dairesel engellerin varlığında 3000≤Re≤8000 aralığındaki Reynolds sayısı için gerçekleştirilmiştir. Isı transferi ve akış yapısı üzerinde her bir parametrenin etkilerini görüntülemek amacıyla sıcaklık ve hız dağılımları sunulmuştur. Çalışılan tüm kanal akışları için Nusselt sayısı, ısı transferindeki iyileşme oranı, basınç düşüşüne bağlı olarak hesaplanan sürtünme faktörü ve performans faktörü elde edilmiş ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuş ve tartışılmıştır.

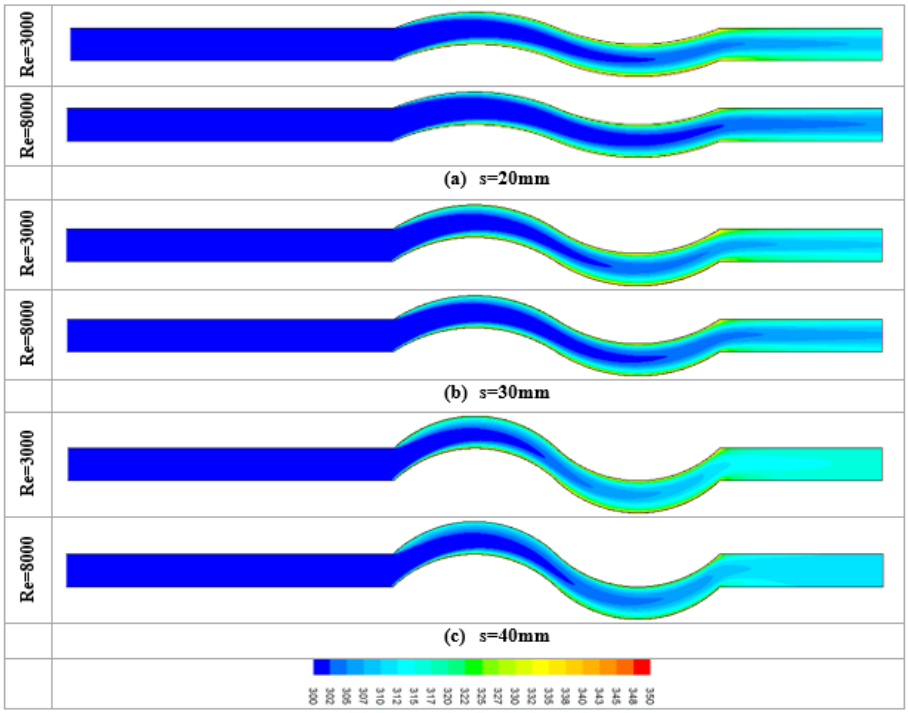
3.1. Dalga genliğinin akış ve ısı transferine etkisi
3.1. Effect of wave amplitude on flow and heat transfer

Re=8000'de içerisinde dairesel engellerin bulunmadığı (d=0) dalgalı kanallarda farklı dalga genlikleri için hız görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Akışkanın, kanal girişindeki düz bölümlerde yüzeye paralel aktığı ve dalgalı yüzeylerde kanalın geometrisi nedeniyle bir salınım hareketi yaptığı görülmektedir. Dalga genliğinin artması ile akış salınımı da artmaktadır. Tüm genliklerde, akışkan hızı dalgalı kanalın girişinde, dalga genliğinin yarısında ve kanalın çıkışında kanal geometrisi nedeniyle artmaktadır. Akışkanın, düşük dalga genliğinde dalgalı yüzeylere tamamen temas ettiği görülmektedir. Ancak dalga genliğinin artması ile akışkanın dalgalı yüzeyin bazı bölgelerinde düşük hız bölgelerinin varlığına neden olduğu görülmektedir. Dalga genliğinde daha fazla bir artış, bu düşük hız bölgesini artırabileceği ve bu durumun bir dezavantaj oluşturabileceği düşüncesiyle çalışmada dalga genliği daha fazla artırılmamıştır.



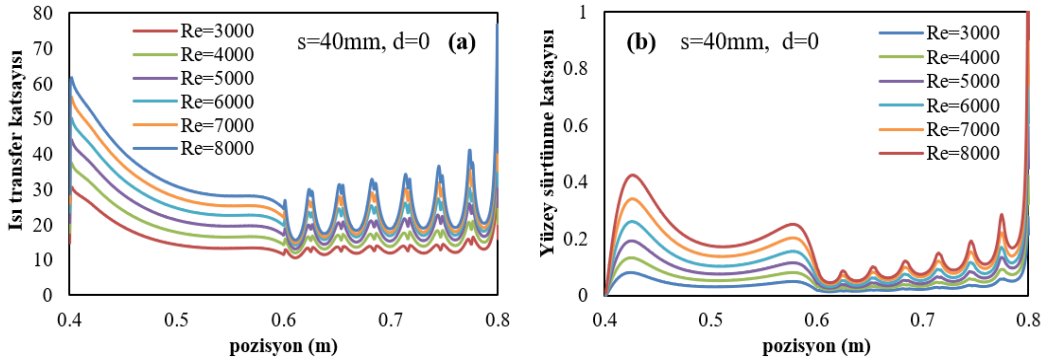
Şekil 6. Re=8000 de farklı dalga genlikleri için hız görüntüleri (d=0).
Figure 6. *Velocity images for different wave amplitudes at Re=8000 (d=0).*

Şekil 7, farklı dalga genliklerinde ve d=0 durumunda Reynolds sayısının sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisini göstermektedir. Kanal içinde sabit sıcaklıkta tutulan dalgalı yüzeylere yakın olan akışkan tabakasının sıcaklığının yüksek olduğu görülmektedir. Akışkan hızının artması kanaldaki atalet kuvvetlerinin ve kanala giren akışkanın kütlesel debisinin artmasına neden olmaktadır. Böylelikle yüksek Reynolds sayılarında daha fazla soğuk akışkan tabakası kanala girmektedir. Kanala giren daha düşük sıcaklıktaki akışkan, sıcaklığı daha yüksek olan dalgalı yüzeylerden geçerken yüzeylerden akışkana ısı transferi meydana gelmektedir. Böylece dalgalı yüzeylerin sıcaklığının düşmesi sağlanmaktadır. Düşük Re için dalgalı kanal yüzeylerindeki sıcaklık gradyanı oldukça yüksektir. Artan Re ile dalgalı yüzeylerin sıcaklığında azalma gözlenmektedir. Tüm dalga genliklerinde, Re=8000'de dalgalı kanalın yüzey sıcaklığı, Re=3000'e göre oldukça düşüktür. Dalga genliğinin artması ile ısı transfer yüzey alanı artmaktadır ve bu durum kanaldan olan ısı transferini de olumlu yönde etkileyecektir. Ayrıca tüm dalga genlikleri için akışkan sıcaklığının akış yönünde arttığı görülmektedir.



Şekil 7. Farklı dalga genlikleri ve Re için sıcaklık dağılımı, (a) s=20mm, (b) s=30mm, (c) s=40mm.
Figure 7. *Temperature distribution for different wave amplitudes and Re, (a) s=20mm, (b) s=30mm, (c) s=40mm.*

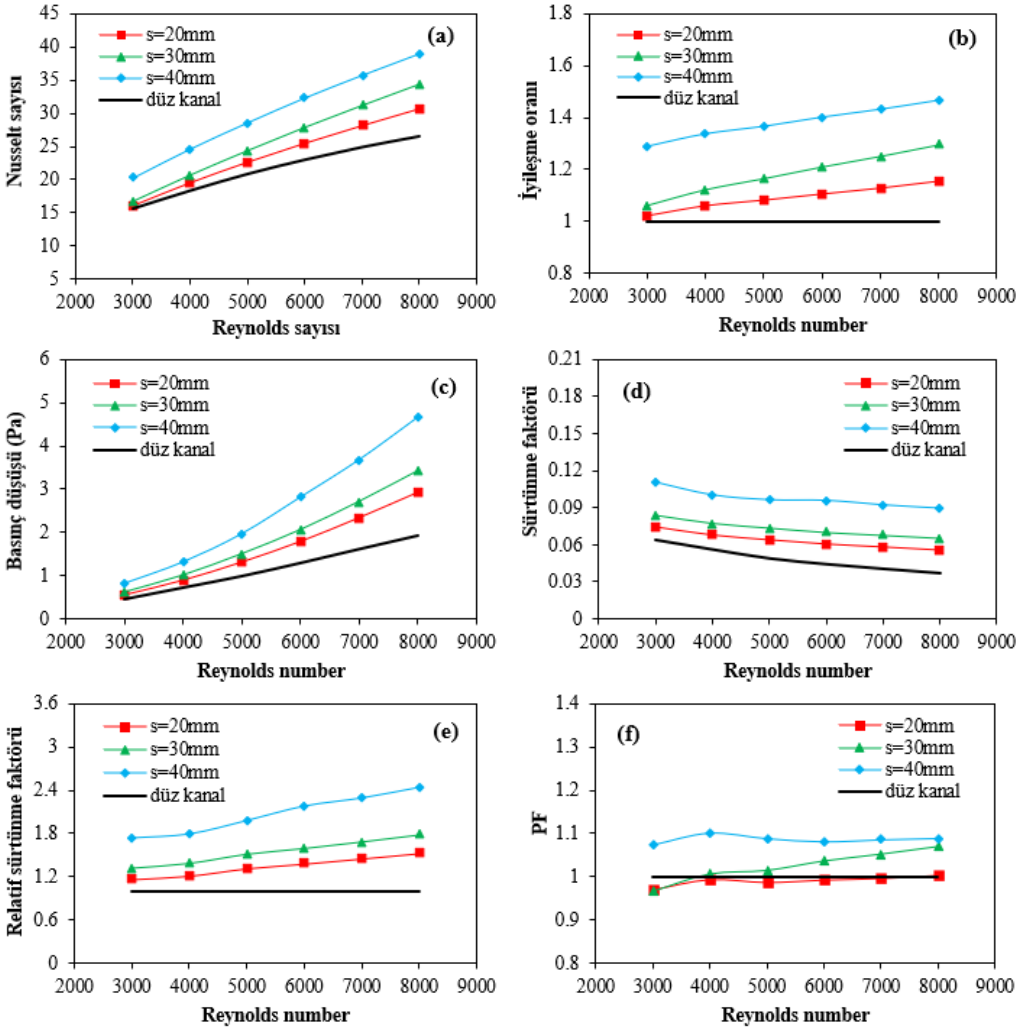
Şekil 8, s=40 mm ve d=0 durumunda dalgalı kanalın yerel ısı transfer katsayısının (a) ve yüzey sürtünme katsayısının (b) farklı Reynolds sayıları için yüzey boyunca değişimini sunmaktadır. Reynolds sayısının artması ile dalgalı yüzey boyunca yerel ısı transfer katsayısının arttığı görülmektedir. Yerel ısı transfer katsayısı, 0.4 m ile 0.6 m arasında yüzey boyunca azalmakta ve 0.6 m ile 0.8 m arasında ise artma eğilimi göstermektedir. Ancak bu artışın dalgalanma şeklinde olduğu görülmektedir. Bu durumun sinüzoidal dalga geometrisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. x=0.6 m'den sonra akışkanın yönü değişmektedir ve bu nedenle akış içinde çalkantılar ve dalgalanmalar meydana gelmektedir. Şekil 8b'de Reynolds sayısının artması ile dalgalı yüzey boyunca yüzey sürtünme katsayısı artmaktadır. Sabit bir Re için yüzey sürtünme katsayısı, dalgalı kanal girişinde artarak bir tepe noktası oluşturmakta ve daha sonra azalarak devam etmektedir. Yüzey sürtünmeleri, 0.6 m'den önce hafif bir tepe noktası daha oluşturmaktadır. 0.6 m ile 0.8 m aralığında yüzey boyunca sürtünme katsayısı dalgalı bir şekilde artma eğilimindedir.



Şekil 8. Farklı Re için yüzey boyunca (a) yerel ısı transfer katsayısı, (b) yüzey sürtünme katsayısı.
Figure 8. *(a) Local heat transfer coefficient, (b) surface friction coefficient along the surface for different Re.*

Şekil 9, içerisinde dairesel engellerin olmadığı (d=0) kanalda, farklı dalga genlikleri için Reynolds sayısı ile (a) Nusselt sayısının, (b) ısı transfer iyileşme oranının, (c) basınç düşüşünün, (d) sürtünme faktörünün, (e) relatif sürtünme faktörünün ve (f) performans faktörünün değişimini göstermektedir. Şekil 9a, farklı dalga genliklerinde Reynolds sayısı ile Nusselt sayısının değişimini düz kanal ile karşılaştırarak vermektedir. Kanal

genliğin artması Nusselt sayısını artırmaktadır. Çünkü artan dalga genliği, ısı transfer yüzey alanını artırmakta ve dalgalı kanal geometrisi nedeniyle akıştaki salınım etkilerinin artmasına neden olmaktadır (Şekil 6 ve 7). Dalgalı kanalın tüm genlik değerlerinde elde edilen Nusselt sayıları düz kanaldan daha yüksektir. Tüm kanallar için en yüksek Nusselt sayısı Re=8000'de, düz kanal için Nu=26.57, s=20 mm dalga genliği için Nu=30.70, s=30 mm dalga genliği için Nu=34.45 ve s=40 mm dalga genliği için Nu=38.94 olarak elde edilmiştir.



Şekil 9. Farklı dalga genlikleri için Re ile (a) Nu, (b) iyileşme oranı, (c) basınç düşüşü, (d) sürtünme faktörü, (e) relatif sürtünme faktörü, (f) PF **(**d=0).
Figure 9. *(a) Nu, (b) enhancement ratio, (c) pressure drop, (d) friction factor, (e) relative friction factor, (f) PF (d=0) with Re for different wave amplitudes.*

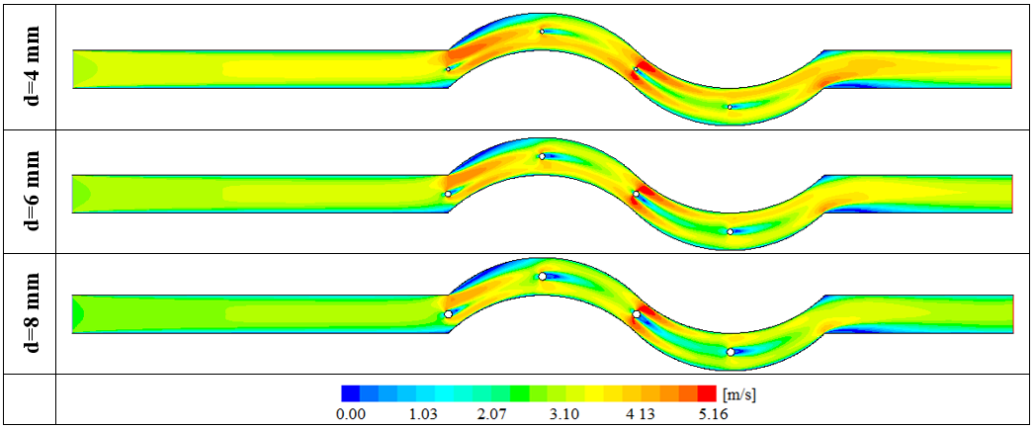
Şekil 9b'de, farklı genliklere sahip dalgalı kanalların düz kanala göre ısı transfer iyileşme oranı gösterilmiştir. Düz kanal referans kabul edilmiş ve değeri 1 olarak gösterilmiştir. Tüm genlikler için ısı transfer iyileşme oranı, tüm Reynolds sayılarında düz kanaldan yüksektir. Artan Reynolds sayılarında iyileşme oranı da artma eğilimindedir. Ayrıca kanal genliğin artması ısı transfer iyileşme oranını artırmaktadır. Düz kanala göre en yüksek ısı transfer iyileşme oranı Re=8000 değerinde, s=20mm dalga genliği için ER=1.15, s=30mm dalga genliği için ER=1.30, ve s=40mm dalga genliği için ER=1.47 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 9c, farklı dalga genliklerinde Re ile basınç düşüşünün değişimini düz kanal ile karşılaştırarak göstermektedir. Tüm kanallar için Re ve kanalın dalga genliğin artması basınç düşüşünü artırmaktadır. Basınç düşüşü, tüm dalga genliklerinde düz kanaldan daha yüksektir. Tüm kanallarda en yüksek basınç düşüşü, Re=8000 değerinde düz kanal için ΔP=1.92 Pa, s=20mm dalga genliği için ΔP =2.93 Pa, s=30mm dalga genliği için ΔP =3.42 Pa ve s=40mm dalga genliği için ΔP =4.67 Pa olarak bulunmuştur. Şekil 9d, farklı dalga genliklerinde Re ile sürtünme faktörünün değişimini vermektedir. Tüm genliklerde sürtünme faktörünün tüm Reynolds sayıları için düz kanala göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Artan Reynolds sayılarında sürtünme faktörü azalma

eğilimindedir. Ayrıca kanal genliğin artması da sürtünme faktörünü artırmaktadır. En yüksek sürtünme faktörü, Re=3000'de s=40 mm dalga genliği için f=0.11 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 9e'de, farklı dalga genliklerinde Re ile relatif sürtünme faktörünün değişimi verilmektedir. Düz kanal referans kabul edilmiş ve değeri 1 alınmıştır. Tüm genliklerde kanalın relatif sürtünme faktörü tüm Reynolds sayıları için düz kanaldan yüksektir. Artan Reynolds sayılarında ve genlik değerlerinde, relatif sürtünme faktörü de artmaktadır. Relatif sürtünme faktörü, Re=8000 değerinde ve s=40mm dalga genliği için en yüksek değerine (f_{rel} =2.44) ulaşmıştır. Şekil 9f, farklı dalga genlikleri için Reynolds sayısı ile performans faktörünün değişimini göstermektedir. Düz kanal referans kabul edilmiştir. Dalga genliği s=20 mm olan dalgalı kanalda performans faktörü, referans değerin altında kalmıştır (Re=8000 hariç). Dalga genliği s=30 mm durumunda performans faktörü, Re=3000 hariç referans değerin üzerinde bulunmuştur ve Reynolds sayısının artması ile artış göstermiştir. s=30 mm için en yüksek PF değeri, Re=8000'de 1.07 olarak elde edilmiştir. Dalga genliği s=40 mm durumunda performans faktörü Re=4000'de hafif bir tepe noktası oluşturmuş, diğer Reynolds sayılarında birbirine yakın elde edilmiştir. En yüksek PF, s=40 mm ve Re=4000'de 1.10 olarak elde edilmiştir. Performans faktörünün referans değerin üzerinde elde edilmesi kanal içinde ısı transferi iyileşmesinin sürtünme faktöründen daha yüksek olduğunu göstermektedir.

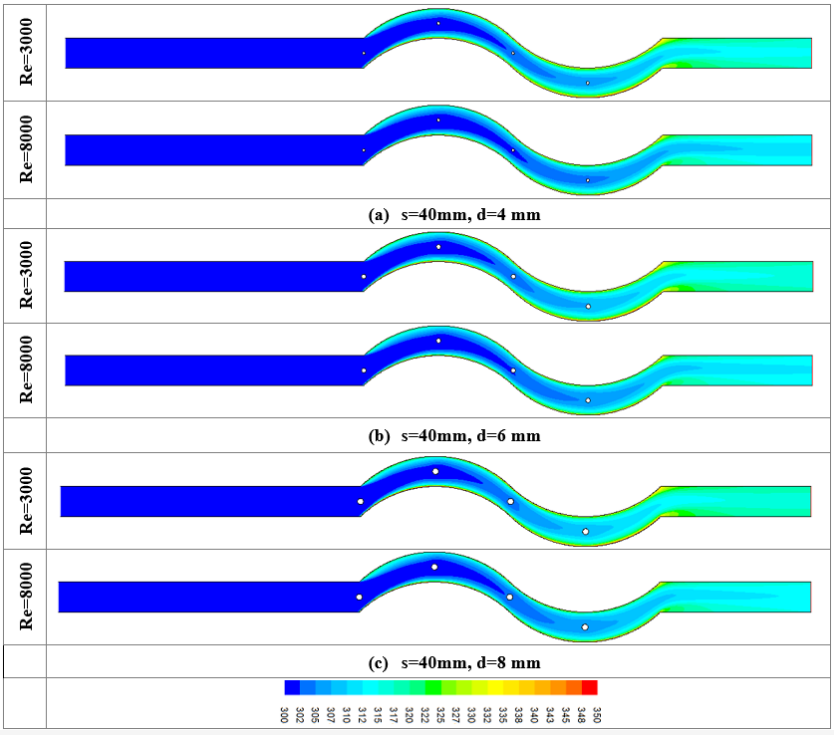
3.2. Dairesel engellerin ısı transferine ve akışkan akışına etkisi
3.2. Effect of circular obstacles on heat transfer and fluid flow

Kanala ilave edilen engeller, türbülans etkilerini artırarak akış karışımını iyileştirebilir. Bu nedenle bu çalışmada, pasif ısı transferi iyileştirme yöntemlerinden olan dalgalı kanallar ve dairesel engellerin birlikte kullanımı ile daha yüksek ısı transferi amaçlanmıştır. Bu bölümde, dalga genliği s=40 mm sabit tutularak kanalın merkezine yerleştirilen dört adet dairesel engellerin üç farklı çap değerlerinde (d: 4mm, 6mm ve 8mm) akış ve ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Şekil 10, Re=7000 için s=40 mm sabit bir dalga genliğinde farklı dairesel engel çaplarının hız alanlarına etkisini göstermektedir. Dairesel engellerin çapının, hız alanları üzerinde etkili olduğu açıkça görülmektedir. Engellerin çapının artması, akışkanın dalgalı yüzeylere daha iyi temasını sağlamaktadır. Dairesel engeller ayrıca akışta türbülans etkilerini artırarak homojen bir akış karışımına neden olmaktadır. Homojen bir akış, ısı transferi açısından önemli bir rol üstlenmektedir.



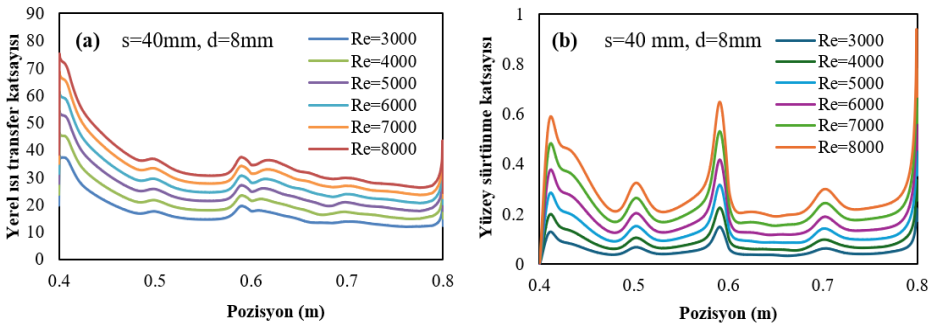
Şekil 10. Dairesel engellerin farklı çapları için hız görüntüleri (Re=7000 ve s=40mm).
Figure 10. *Velocity images for different diameters of circular obstacles (Re=7000 and s=40mm).*

Şekil 11, sabit bir dalga genliğinde (s=40mm) Reynolds sayısının ve dairesel engellerin çapının sıcaklık alanları üzerindeki etkilerini göstermektedir. Düşük Reynolds sayılarında dalgalı yüzeylerdeki sıcaklık farkının oldukça fazla olduğu ve Reynolds sayısının artması ile sıcaklık farkının da düştüğü gözlenmektedir. Reynolds sayısının artması ile kanal yüzeyinden akışkana olan ısı transferi nedeniyle yüzey sıcaklığı azalmaktadır. Re=8000'de dalgalı yüzeylerin sıcaklığının Re=3000'e göre belirgin bir şekilde düştüğü gözlenmektedir. Dairesel engellerin çapının sıcaklık alanları üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Engellerin çapının artması yüzey sıcaklığını düşürmektedir. Bunun nedeni, daha büyük çaptaki engellerin ana akışı kanal duvarlarına doğru yönlendirmesi ve akışta oluşturduğu çalkantılardır.



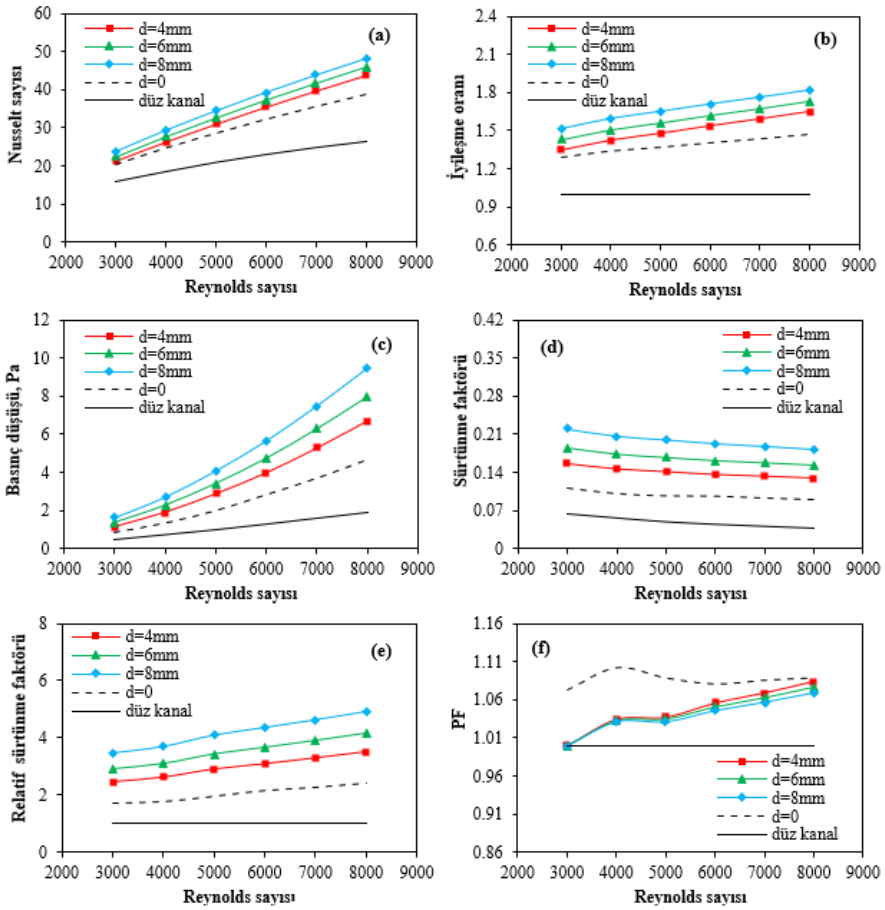
Şekil 11. Re ve dairesel engel çaplarının sıcaklık alanlarına etkisi, (a) d=4 mm, (b) d=6 mm (c) d=8 mm.
Figure 11. *Effect of Re and circular obstacle diameters on temperature fields (a) d=4 mm, (b) d=6mm, (c) d=8 mm.*

Şekil 12'de, s=40 mm ve d=8mm için Re ile yerel ısı transfer katsayısının (a) ve yüzey sürtünme katsayısının (b) değişimi verilmiştir. Re'nin artması, yüzey boyunca yerel ısı transfer katsayısını artırmaktadır. Sabit bir Re değerinde, yerel ısı transfer katsayısı dalgalı yüzey boyunca azalma eğilimindedir. Ancak 0.6m'den hemen önce ısı transfer katsayısının küçük bir tepe noktası oluşturduğu gözlenmiştir. Bu durumun kanal geometrisi ve dairesel engellerin varlığı nedeniyle akışın yön değiştirirken türbülans etkilerini artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 12b'de, Re ve dairesel engel çapının artması yüzey sürtünme katsayısını artırdığı görülmektedir. Yüzey sürtünme katsayısı, 0.4m'den hemen sonra ve 0.6m'den hemen önce belirgin birer tepe noktaları oluşturmuştur ve bu tepe noktalarına ilave olarak 0.5m ve 0.7m'de ise daha küçük tepe noktalarının varlığı dikkat çekmektedir. Bu tepe noktaları Re artması ile daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum Reynolds sayısının artması ile kanal yüzeyindeki sürtünmelerin arttığını göstermektedir.



Şekil 12. Farklı Re'de (a) yerel ısı transfer katsayısı, (b) yüzey sürtünme katsayısı.
Figure 12. *(a) Local heat transfer coefficient, (b) surface friction coefficient at different Re.*

Şekil 13'te, sabit bir dalga genliğinde (s=40mm) farklı dairesel engel çapları için Reynolds sayısı ile Nusselt sayısının (a), ısı transfer iyileşme oranının (b), basınç düşüşünün (c), sürtünme faktörünün (d), relatif sürtünme faktörünün (e) ve performans faktörünün (f) değişimi verilmektedir. Ayrıca sonuçlar, s=40mm dalga genliğinde içerisinde dairesel engellerin olmadığı (d=0) dalgalı kanal ve düz kanal ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 13. Farklı dairesel engel çaplarında Re ile (a) Nu, (b) iyileşme oranı, (c) basınç düşüşü, (d) sürtünme faktörü, (e) relatif sürtünme faktörü ve (f) PF.
Figure 13. *(a) Nu, (b) enhancement ratio, (c) pressure drop, (d) friction factor, (e) relative friction factor and (f) PF with different circular obstacle diameters versus Re.*

İçerisinde dairesel engellerin olduğu kanallarda elde edilen Nu, dairesel engellerin olmadığı (d=0) kanal ve düz kanalda elde edilen Nusselt sayılarından daha yüksektir. Tüm kanallar için Re ve dairesel engellerin çapının artması, Nusselt sayısını artırmaktadır. Yüksek Re değerinde akışkanın kütlesel debisi ve kanal içindeki atalet kuvvetleri artmaktadır. Dolayısı ile yüksek Reynolds sayılarında kanala daha fazla miktarda soğuk akışkanın girişi sağlanmaktadır. Dairesel engellerin çapının artması ile daha soğuk olan ana akış, dalgalı yüzeylere daha iyi nüfuz etmekte ve sıcak yüzeylerin soğumasında daha etkili olmaktadır (Şekil 11). Bu durum Nusselt sayısının artmasına neden olmaktadır. Re=8000 değerinde en yüksek Nusselt sayısı, düz kanal için Nu=26.57, d=0 için Nu=38.94, d=4mm için Nu=43.73, d=6mm için Nu=45.97 ve d=8mm için Nu=48.33 olarak elde edilmiştir. Kanal içerisine ilave edilen dairesel engellerin ısı transferini artırmada önemli bir etkisinin olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 13a). Şekil 13b, farklı dairesel engel çapları için Re ile ısı transfer iyileşme oranının değişimini vermektedir. Düz kanal referans olarak kabul edilmiştir. Tüm dairesel engel çaplarındaki dalgalı kanalın ısı transfer iyileşme oranı, tüm Re için referans değerin ve s=40mm ve d=0 durumundaki kanalın üzerinde bulunmuştur. Reynolds sayısının ve engel çaplarının artması, ısı transfer iyileşme oranını kayda değer şekilde artırmıştır. Düz kanala göre en yüksek ısı transfer iyileşme oranı, tüm kanallarda Re=8000 değerinde elde edilmiş ve içerisinde dairesel engellerin olmadığı (s=40mm ve d=0) dalgalı kanal için ER=1.47, d=4mm için ER =1.64, d=6mm için ER =1.73 ve d=8mm için ER =1.82 olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 13c, farklı dairesel engel çapları için Re ile basınç düşüşünün değişimini göstermektedir. İçerisinde dairesel engellerin olduğu kanallarda elde edilen basınç kaybı, engel bulunmayan (s=40mm ve d=0) dalgalı kanaldan ve düz kanalda elde edilen basınç kaybından daha yüksektir. Tüm kanallar için Reynolds sayısının ve dairesel engellerin çapının artması ile basınç kaybı artmaktadır. En yüksek basınç düşüşü, Re=8000'de düz kanal için ΔP=1.92 Pa, içerisinde dairesel engellerin olmadığı (s=40mm ve d=0) dalgalı kanal için ΔP =4.67 Pa, d=4mm için ΔP =6.71 Pa, d=6mm için ΔP =7.96 Pa ve d=8mm için ΔP =9.45 Pa olarak elde edilmiştir.

Kanal içerisine ilave edilen dairesel engeller, ısı transferini artırmada önemli bir potansiyele sahiptir ancak bununla birlikte basınç kaybında bir miktar artış kaçınılmaz olmaktadır. Şekil 13d'de, dairesel engellerin olduğu kanallarda elde edilen sürtünme faktörünün, içerisinde dairesel engel bulunmayan (s=40mm ve d=0) dalgalı kanaldan ve düz kanaldan daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Tüm kanallar için artan Re ile sürtünme faktörü azalma eğilimindedir. Kanala ilave edilen dairesel engellerin çapının artması sürtünme faktörünü artırmaktadır. Tüm kanallarda en yüksek sürtünme faktörü, Re=3000'de ve d=8mm dairesel engellere sahip kanal için f =0.22 olarak bulunmuştur. Şekil 13e'de, tüm dairesel engel çapları için relatif sürtünme faktörü tüm Reynolds sayılarında, s=40mm ve d=0 durumundan ve düz kanaldan daha yüksek bulunmuştur. Artan Reynolds sayıları ve dairesel engel çapları, relatif sürtünme faktörünü artırmıştır. En yüksek relatif sürtünme faktörünün Re=8000'de ve d=8mm için f_{rel} =4.93 olduğu tespit edilmiştir.

Dalgalı kanalların genliğinin artması ve kanal içerisine ilave edilen engellerin çapının artması ısı transferini artırmaktadır. Ancak bu kanallarda dalga genliğinin ve dairesel engellerin çapının artması basınç düşüşünü artırmaktadır. Bu nedenle ısı transferi iyileşmesini basınç düşüşü ile değerlendirmek için performans faktörü tanımlanmıştır (Eşitlik 18). Şekil 13f, s=40mm sabit dalga genliğine sahip içerisinde farklı çapta dairesel engellerin olduğu dalgalı kanalda, Re ile performans faktörünün değişimini vermektedir. Düz kanal referans kabul edilmiş ve değeri 1 olarak alınmıştır. Re=3000'de tüm dairesel engel çapları için PF, referans değere yakın elde edilmiştir. Diğer Reynolds sayılarında, Re artması ile PF artmaktadır. Ayrıca dairesel engellerin çapının artması performans faktörünün düşmesine neden olmuştur. PF, tüm kanallarda Re=4000'de hafif bir tepe noktası oluşturmuştur. s=40mm dalga genliğinde içerisinde dairesel engellerin olmadığı (d=0) dalgalı kanalın PF değeri, içerisinde engellerin olduğu diğer kanallardan daha yüksek elde edilmiştir. Çünkü d=0 durumunda basınç düşüşü, dairesel engellerin olduğu kanallara göre daha düşüktür. Dairesel engellerin ısı transferini artırmasına rağmen basınç düşüşünü de artırması nedeniyle PF, d=0 durumuna göre daha düşük elde edilmiştir. Dairesel engellerin varlığında en yüksek PF, Re=8000 ve d=4mm durumunda PF=1.08 olarak bulunmuştur. Bu çalışma, içerisinde engellerin olduğu dalgalı bir kanalda uygun geometrik parametrelerin ve akış şartlarının belirlenmesi halinde termo-hidrolik performansın artabileceğini göstermiştir.

Sonuç
Conclusion

Bu çalışmada, sinüzoidal dalgalı bir kanalda üç farklı dalga genliğinin (s: 20mm, 30mm, 40mm) 3000≤Re≤8000 aralığındaki Reynolds sayılarında türbülanslı akış ve ısı transferi sayısal olarak araştırılmıştır. Daha sonra dalga genliği sabit (s=40mm) tutularak kanalın merkezine eklenen dört adet dairesel engellerin üç farklı çapı (d: 4mm, 6 mm, 8mm) için akış ve ısı transferi davranışı incelenmiştir. Çalışma sonuçları düz kanal ile karşılaştırılmıştır. Kanal geometrisinin, kanalın genliğinin, dairesel engel çaplarının ve Reynolds sayısının akış ve ısı transferi üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. İçerisinde dairesel engellerin olmadığı (d=0) kanallarda, kanalın dalga genliğinin ve Reynolds sayısının artması ile Nu ve ısı transfer iyileşme oranı artmıştır. En yüksek Nu, Re=8000'de s=40mm dalga genliğinde 38.94 olarak elde edilmiştir. Aynı parametreler için ısı transferinin düz kanala göre 1.47 kat iyileştiği tespit edilmiştir. Dairesel engellerin olmadığı (d=0) kanallarda, dalga genliğinin ve Reynolds sayısının artması basınç düşüşü artırmıştır. En yüksek basınç kaybı Re=8000 ve s=40mm için ΔP =4.67 Pa olarak bulunmuştur. Sürtünme faktörü, Re=8000 ve s=40mm dalga genliğinde düz kanala göre f_{rel} =2.44 kat artmıştır. d=0 durumunda en yüksek PF, s=40mm ve Re=4000'de PF=1.10 olarak elde edilmiştir. İçerisinde dairesel engellerin olduğu dalgalı kanallarda, Re ve dairesel engel çapının artması Nusselt sayısını, ısı transfer iyileşme oranını, basınç düşüşünü ve relatif sürtünme faktörünü artırmıştır. En yüksek Nu, Re=8000'de ve d=8mm engel çapı için 48.33 olarak elde edilmiştir. Aynı parametreler için ısı transferi düz kanala göre 1.82 kat iyileşmiş ancak sürtünme faktörü f_{rel} =4.93 kat artmıştır. Dairesel engellerin çapının artması ile PF değerlerinde azalma görülmüştür. Dairesel engellerin varlığında en yüksek PF, Re=8000 ve d=4mm durumunda 1.08 olarak elde edilmiştir.

Öneriler: Bu çalışma sonuçları, verilen geometri ve çalışılan Reynolds sayısı aralığı ile sınırlıdır. İleriki çalışmalarda, kanal içerisindeki dairesel engellerin farklı düzenlemelerinin (asimetrik vb.) ve farklı geometriye sahip engellerin akış ve ısı transferi üzerindeki etkileri araştırılabilir.

Yazar katkısı
Author contribution

E. Çelik: Literatür çalışması; Görüntüleme, *S. Akçay*: Metodoji; Yorumlama; Veri analizi; Doğrulama; Yazma; Danışmanlık

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Abed, A. M., Alghoul, M. A., Sopian, K., Mohammed, H. A., & Al-Shamani, A. N. (2015). Design characteristics of corrugated trapezoidal plate heat exchangers using nanofluids. *Chem. Eng. Process. Process Intensif., 87*, 88–103. https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.11.005

Ahmed, M., Yusoff, M., Ng, K., & Shuaib, N. (2014). Effect of corrugation profile on the thermal–hydraulic performance of corrugated channels using CuO–water nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering*, *4*, 65-75. https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.07.001

Ajarostaghi, S. S., Zaboli, M., Javadi, H., Badenes, B., & Urchueguia, J. F. (2022). A review of recent passive heat transfer enhancement methods. *Energies*, *15*(3), 986. https://doi.org/10.3390/en15030986

Ajeel, R. K., Saiful-Islam, W., & Hasnan, K. B. (2018). Thermal and hydraulic characteristics of turbulent nanofluids flow in trapezoidal-corrugated channel: Symmetry and zigzag shaped. *Case Studies in Thermal Engineering, 12*, 620-635. https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.08.002

Ajeel, R. K., Salim, W. I., & Hasnan, K. (2019). Design characteristics of symmetrical semicircle- corrugated channel on heat transfer enhancement with nanofluid. *Int. J. Mech. Sci*., *151*, 236–250. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.022

Ajeel, R. K., Sopian, K., & Zulkifli, R. (2021). A novel curved-corrugated channel model: thermal-hydraulic performance and design parameters with nanofluid. *Int. Comm. Heat Mass Transf*., *120*, 105037. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.105037

Akcay, S. (2023a). Numerical study of turbulent heat transfer process in different wavy channels with solid and perforated baffles. *Heat Transfer Research*, *54*(18), 53-82. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2023046621

Akcay, S. (2023b). Heat transfer analysis of pulsating nanofluid flow in a semicircular wavy channel with baffles. *Sādhanā, 48*, 57. https://doi.org/10.1007/s12046-023-02119-x

Alfellag, M. A., Ahmed, H. E., Jehad, M. G., & Farhan, A. A. (2022). The hydrothermal performance enhancement techniques of corrugated channels: A review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *147*, 10177-10206. https://doi.org/10.1007/s10973-022-11247-1

Choudhary, T., Sahu, M. K., Shende, V., & Kumar, A. (2022). Computational analysis of a heat transfer characteristic of a wavy and corrugated channel. *Material Today: Proceedings*, *56*, 263-273. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.121

Feng, C-N., Liang, C-H., & Li, Z-X. (2022). Friction factor and heat transfer evaluation of cross-corrugated triangular flow channels with trapezoidal baffles. *Energy & Buildings*, *257*, 111816. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111816

Kanchan, B. K., Chandan, G. K., & Kumar, J. (2024). Effect of obstacle configuration in sinusoidal bfsc on hydrothermal performance and irreversibility characteristics: A numerical study. *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng*., *48*, 145–162. https://doi.org/10.1007/s40997-023-00649-7

Khan, M., Alsaduni, I. N., Alluhaidan, M., Xia, W-F., & Ibrahim, M. (2021). Evaluating the energy efficiency of a parabolic trough solar collector filled with a hybrid nanofluid by utilizing double fluid system and a novel

corrugated absorber tube. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 124,* 150-161. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.04.045

Khoshvaght-Aliabadi, M. (2014). Influence of different design parameters and Al_2O_3-water nanofluid flow on heat transfer and flow characteristics of sinusoidal-corrugated channels. *Energy Convers. Manag.*, *88*, 96–105. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.042

Krishnan, E. N., Ramin, H., Guruabalan, A., & Simonson, C. J. (2021). Experimental investigation on thermo-hydraulic performance of triangular cross-corrugated flow passages. *International Communications in Heat and Mass Transfer, 122,* 105160. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105160

Kurtulmus, N., & Sahin, B. (2019). A review of hydrodynamics and heat transfer through corrugated channels. *Int. Commun.Heat Mass Transf., 108,* 104307. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104307

Li, Z-X., Sung, S-Q., Wang, C., Liang, C-H., Zeng, S., Zhong, T., Hud, W-P., & Feng, C-N. (2022). The effect of trapezoidal baffles on heat and flow characteristics of a cross-corrugated triangular duct. *Case Studies in Thermal Engineering*, *33*, 101903. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101903

Naderifar, A., Nikian, M, Javaherdeh, K., & Borji, M. (2022). Numerical investigation of the effect of fins on heat transfer enhancement of a laminar non-newtonian nanofluid flow through a corrugated channel. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *147*, 9779-9791. https://doi.org/10.1007/s10973-022-11222-w

Nakhchi, M. E. (2019). Experimental optimization of geometrical parameters on heat transfer and pressure drop inside sinusoidal wavy channels. *Ther. Sci. Eng. Prog.*, *9*, 121–131. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.11.006

Nitturi, L. K., Kapu, V. K. S., Gugulothu, R., Kaleru, A., Vuyyuri, V., & Farid, A. (2023). Augmentation of heat transfer through passive techniques. *Heat Transfer, 52*(6), 4422-4449, https://doi.org/10.1002/htj.22877

Raza, A., Hasnain, J., Shah, S. S., Haq, R. U., & Alhushaybari, A. (2024). Influence of solid cylinders on fluid flow and thermal analysis in a curved channel with constant magnetic field. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *158*, 107887. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107887

Salami, M., Khoshvaght-Aliabadi, M., & Feizabadi, A. (2019). Investigation of corrugated channel performance with different wave shapes. *J. Therm. Anal. Calorim*, *138*(5), 3159–3174. https://doi.org/10.1007/s10973-019-08361-y

Shahsavar, A., Alimohammadi, S. S., Askari, I. B. & Ali, H. M. (2021). Numerical investigation of the effect of corrugation profile on the hydrothermal characteristics and entropy generation behavior of laminar forced convection of non-Newtonian water/CMC-CuO nanofluid flow inside a wavy channel. *Int. Commun. Heat and Mass Transfer, 121,* 105117. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105117

Uysal, D., & Akçay, S. (2024). Numerical study of thermal and hydrodynamic characteristics of turbulent flow in hybrid corrugated channels with different wave profiles. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, *18*(2), 10026–10045. https://doi.org/10.15282/jmes.18.2.2024.5.0792

Zhang, J., Zhu, X., Mondejar, M. E., & Haglind, F. (2019). A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers. *Renew. Sustain. Energy Reviews*, *101*, 305-328. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.017

Zhang, L., & Che, D. (2011). Influence of corrugation profile on the thermalhydraulic performance of cross-corrugated plates. *Numeric. Heat Transfer, Part A: Appl*., *59* (4) 267–296. https://doi.org/10.1080/10407782.2011.540963

Zheng, Y., Yang, H., Mazaheri, H., Aghaei, A., Mokhtari, N., & Afrand, M. (2021). An investigation on the influence of the shape of the vortex generator on fluid flow and turbulent heat transfer of hybrid nanofluid in a channel. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *143*,1425–1438. https://doi.org/10.1007/s10973-020-09415-2

Zontul, H., Hamzah, H., Kurtulmuş, N., & Şahin, B. (2021). Investigation of convective heat transfer and flow hydrodynamics in rectangular grooved channels. *Int. Commun. Heat and Mass Transfer, 126,* 105366. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105366

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 51-63 doi: 10.17714/gumusfenbil.1549410 Research Article

AppleCNN: A new CNN-based deep learning model for classification of apple leaf diseases

AppleCNN: Elma yaprak hastalıklarının sınıflandırılabilmesi için CNN tabanlı yeni bir derin öğrenme modeli

İbrahim ÇETİNER*

Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Vocational School of Technical Sciences, 15100, Burdur, Türkiye

• Received: 13.09.2024 • Accepted: 30.12.2024

Abstract

Day by day, the world's population is increasing and the land people use for food is decreasing. Fruit trees in existing agricultural lands are under constant threat from numerous pathogens and insects. Therefore, continuous monitoring is important to ensure maximum yield. Apple is a very important fruit both in terms of consumer demand and global trade. However, apple growth, quality and yield can be affected by a number of diseases. The key to successful disease management and prevention of further outbreaks in apples is early and accurate identification of the disease. If apple foliar disease is not identified early, it can lead to overuse or underuse of chemicals. This can lead to increased production costs and adverse effects on the environment and health. Apple leaf diseases are grouped into 4 different classes: apple scab, cedar apple rust, healthy apple and complex disease symptoms (more than one disease on the leaf). A new CNN model is proposed by using pre-trained VGG19, DenseNet169, MobileNetV2, Xception and NASNetLarge architectures as input layer. This proposed CNN model consists of 23 layers based on computer vision preprocessing techniques and deep learning. With the proposed CNN model, 98% success rate is achieved for apple fruit disease class.

Keywords: Apple leaf disease, CNN, Computer vision, Deep learning architecture, DenseNet169, NASNetLarge

Öz

Gün geçtikçe dünya nüfusu artmakta ve insanların gıda için kullandıkları alanlar azalmaktadır. Mevcut tarım arazilerindeki meyve ağaçları çok sayıda patojen ve böcek nedeniyle sürekli tehdit altındadır. Bundan dolayı sürekli takip edilmesi, maksimum seviyede verim alınabilmesi için önem arz etmektedir. Hem tüketici talebi hem de küresel ticaret açısından elma oldukça önemli bir meyvedir. Bununla birlikte, elmanın gelişimi, kalitesi ve verimi birtakım hastalıklardan etkilenebilir. Başarılı hastalık yönetiminin ve elmalarda başka salgınların önlenmesinin anahtarı, hastalığın erken ve kesin olarak tanımlanmasıdır. Elma yapraklarındaki hastalık erken teşhis edilemez ise aşırı kimyasal kullanımı veya yetersiz kullanımına sebep olabilir. Bu gibi sebepler üretim maliyetlerinin armasına ve çevre, sağlık durumunu olumsuz etki edebilir. Elma yaprak hastalıkları; elma kabuğu, sedir elma pası, sağlıklı elma ve karmaşık hastalık belirtileri (yaprakta birden fazla hastalık) olmak üzere 4 farklı sınıfa gruplandırılmıştır. Önerilen CNN modeli önceden eğitilmiş VGG19, DenseNet169, MobileNetV2, Xception ve NASNetLarge mimarileri giriş katmanı olarak kullanılarak yeni bir CNN model öne sürülmüştür. Bu öne sürülen CNN modeli bilgisayar görünün ön işleme teknikleri ile derin öğrenme tabanlı 23 katmandan oluşmaktadır. Önerilen CNN modeli ile elma meyvesi hastalık sınıfı %98 başarı oranı elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: *Elma yaprak hastalığı, CNN, Bilgisayar görü, Derin öğrenme mimarisi, DenseNet169, NASNetLarge*

*İbrahim ÇETİNER; icetiner@mehmetakif.edu.tr

1. Introduction

As the world's population grows, so does the demand for agricultural products. Naturally, this situation will continue in the future (Sunil et al., 2023). The increase in the human population in the areas where people live leads to an increase in the need for food for this population. The limited agricultural land in the world also increases the importance of agricultural crops grown in these areas. The increasing need for crops day by day has made it necessary to harvest crops with less loss (Sharif et al., 2018). Food security and sustainable agricultural production are being interrupted due to many reasons such as wars in the world, sudden changes in air temperatures, decreases in water resources caused by climate, increasing urbanization, and opening up of agricultural lands to construction (Sharif et al., 2018). It is reported that sustainable agriculture and food security are severely damaged by insects and weeds, as well as various plant pathogens, bacteria and viruses (Abbas et al., 2021). In general, insects, weeds, bacteria, viruses, and weeds prevent production estimates and can lead to unexpectedly large costs (Sengar et al., 2018).

In order to get the highest yield from the limited agricultural lands, the trees and plants here must be constantly controlled. During these controls, it is important to detect diseases that may occur due to different reasons early. These diseases can be caused by spraying at the wrong time and in the wrong way. To eliminate or minimize these causes, deep learning techniques have gained popularity with advances in computer science (Çetiner, 2022). With computer vision operations, image classification, object detection, object tracking, object identification, and extracting meaning from images from many different perspectives can be performed (Liu et al., 2018; Zhai, 2016). These methods have increased the accuracy of detection and diagnosis by prioritizing field data rather than local research data (Wang et al., 2024).

Apples, which have a very high nutritional value, are affected by leaf diseases such as black spot and apple rust (Sengar et al., 2018). Small brown to olive green spots can be seen on apple leaves. In addition, when the infections are intense, the leaves deteriorate and curl. It is reported that when such diseases and infections progress, they negatively affect apple production and cause the entire harvest to be lost (Sapna et al., 2024). In order to avoid unexpected situations due to the reasons mentioned, early detection systems that can eliminate the negative effects on agricultural production need to be developed and improved. The accuracy performance of traditional error detection and classification methods that require intensive labor and effort is not sufficient. For these reasons and factors, it is important to automate the monitoring of products that create added value in the agricultural industry, especially apples, in order to detect diseases early. It directly affects the product obtained and its quantity. It increases competitiveness in the national and international market. In this article, the classification process is realized by utilizing the powerful convolution layers of deep learning (Pak & Kim, 2017). Apple trees are sprayed according to the drugs determined according to the leaf disease class. In order for this spraying to be economical, it must be done on time and sufficiently. Developments in the field of artificial intelligence enable deep learning-based applications to determine the class of apple leaf disease with minimum error. In this article, it is aimed to increase the amount of harvest according to early detection of apple leaf disease with deep learning methods (Aslam et al., 2024; Çetiner, 2021). The information in the color channels is used to determine the apple disease type based on the leaf image of the apple tree (Tu et al., 2018). In order to determine the apple leaf disease class, the apple images must first be resized to the same size. Then they are preprocessed to extract features (Zhai, 2016).

With this paper, different contributions to the literature are presented in the determination of the class of apple leaf diseases. Some of these contributions are given below.

- The performance of the proposed CNN-based deep learning model and different pre-trained methods were analysed.
- It is thought that the system to be realized according to the performance results of image processing, deep learning, machine learning and artificial neural networks will help farmers.
- The pre-trained methods were pre-processed and extracted attributes from pre-processed plant disease images. According to these attributes, which method is effective in plant leaf disease detection is determined according to performance values.
- A proposed convolutional neural network (AppleCNN) model is used to predict the disease type from the test image.
- With the widespread use of early detection in agricultural lands, higher yields are expected to be obtained from smaller areas.
- With the proposed deep learning model, 98% train accuracy rates were achieved.

The following sections of the paper consist of three parts. In the first section, detailed information about the apple leaf image dataset used in the paper is given. In the second section, experimental studies and performance results are presented to determine the quality class of apple leaf diseases. In the last part of the article, the study is concluded with the results obtained from the disease classification processes from apple leaf images.

2. Material and method

2.1. Material

In this paper, it is aimed to perform disease detection from apple leaf images with deep learning based models. In this sense, a database of 3651 high quality images containing various apple leaf diseases is used (Thapa et al., 2020). This dataset consists of real-life fruit tree symptom images. Sample images are shown in Figure 1. These images were acquired manually with varying illumination, angle, surface and noise (Thapa et al., 2020). In an expert annotated image subset, 4 different groups of cedar apple rust, apple bark, complex disease symptoms (multiple diseases on one leaf at the same time) and healthy leaf images were analysed. This dataset has been used to develop and implement deep learning-based automatic plant disease classification algorithms to quickly perform disease detection from apple leaf images.

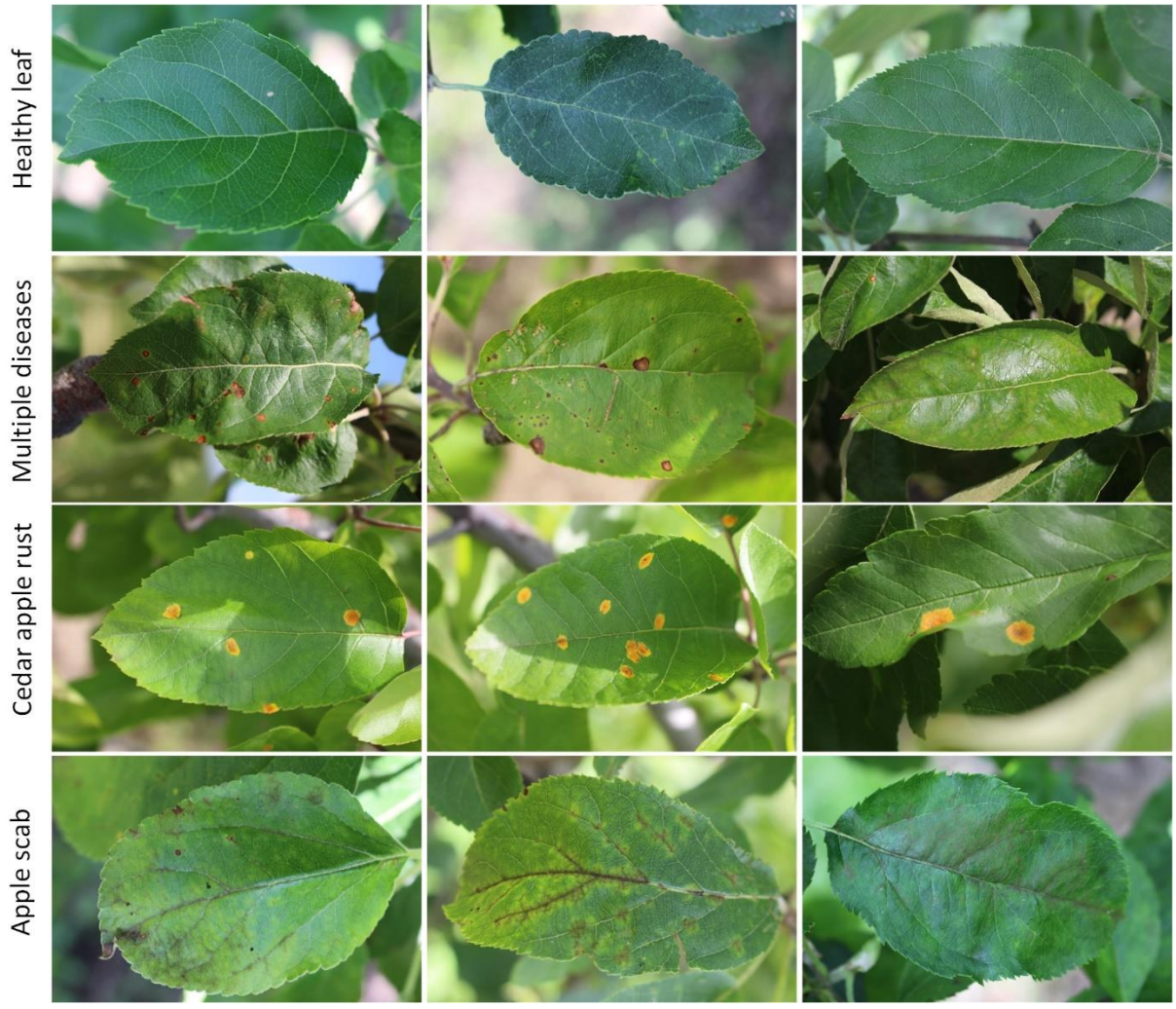


Figure 1. Sample images from the dataset

There is serious yield loss in some apple orchards in the United States. This yield loss is thought to be due to different reasons such as stress. The dataset prepared to reduce or prevent yield loss has a non-homogeneous background and the lighting conditions are not the same. The dataset consisting of images of apple leaves obtained at different times of the day is a very complex dataset with no equal distribution between classes. It can be said that the dataset containing images with more than one disease, having a complex background, and high textural similarities between class types negatively affect the classification performance of the model. Of

the 3651 RGB images, apple bark (1200), cedar apple rust (1399), leaves with complex disease symptoms (187) and healthy leaves (865). Seven duplicate images were found among the 3651 RGB images in the initial dataset and the last image was deleted from the dataset. The final dataset consisted of approximately 80% training dataset of 2921 images and approximately 20% testing dataset of 723 images (Thapa et al., 2020).

In order to prevent the rapid spread of diseases in fruit trees, they must be detected quickly and in a timely manner. Especially pathogens can reproduce themselves rapidly in favourable environments. In addition, damage and disease caused by small insects can occur. These damages and diseases can become a costly problem that cannot be met over time. Misdiagnosis of diseases causes wrong spraying. These wrong pesticides cause excessive exposure of the environment to chemicals and chemical pollution. As a result, resistant pathogens can breed and cause serious epidemics. Vulnerable apple orchards can be exposed to these epidemics and pathogens. This can lead to the destruction of fruit trees in vulnerable apple orchards (Peil et al., 2009). Early detection of diseases is important for the removal of infected trees and pruning of infected tree branches to protect trees in the whole orchard. Early detection of diseases can reduce the likelihood of outbreaks and enable efficient metered pesticide application (Delalieux et al., 2007; Norelli & Borejsza-Wysocka, 2000). Computer and biological sciences provide opportunities to solve agricultural problems in terms of sustainability by increasing food security as a result of disciplinary collaborations in the field of agriculture (Mutembesa et al., 2019).

Fungal structures on the fruit and leaf surface are typical symptoms of apple scab disease (Oerke et al., 2011). Swollen olive-brown black lesions on the vascular tissue surface of the leaf are formed during the initial infection. Chlorotic spore lesions appear later. Fruit and leaves are affected by apple scab. Apple scab can cause fruit and leaf dropping and deformation. Sharp-edged, mushroomy, dark and brown lesions can be seen on infected fruits and leaves. Basidiomycota fungi and Gymnosporangium yamadae fungi cause cedar apple rust. The disease first appears as small light-yellow spots on the leaves. These spots then enlarge and turn bright orange. The diseased fruit leaves swell, expand and curl at the edges. Depending on the severity of the disease, leaf fall may occur. Susceptible apple trees exposed to rust pathogen outbreaks for two to three years may be severely damaged or even die (Giddings & James, 1915).

2.2. Development of a standardised CNN for the classification of diseases.

A new CNN model is proposed for the classification of apple leaf diseases using a dataset of 3651 high quality images containing various apple leaf diseases. In this model, the network weights are fine-tuned.

The flow diagram of the steps for the development of AppleCNN-based deep learning models for disease detection on fruit tree leaves based on labelled leaf images is shown in Figure 2. According to the flow diagram, apple leaf disease classification is based on disease symptoms. These symptoms are seen on leaf images. These images are classified and labelled by experts. According to this label information, they are grouped into 4 different classes as "apple scab, cedar apple rust, healthy apple and complex disease symptoms (more than one disease on the leaf)". The images in the dataset are in RGB format, consisting of cedar apple rust, healthy, apple scab and complex disease symptoms leaves. Approximately 80% of this dataset constituted the training dataset while 20% constituted the test dataset (Thapa et al., 2020). For the proposed CNN model, a new CNN model is proposed using the pre-trained VGG19, DenseNet169, MobileNetV2, Xception and NASNetLarge architectures as the input layer. This proposed AppleCNN model is a deep learning model consisting of 23 layers. These layers generally consist of convolutional neural network, pooling layer, dropout layer, fully connection layer and classification layer. This model is trained and then tested and finalized with performance metrics.

2.3. CNN-based model for apple leaf disease classification

Transfer learning-based models prepared using millions of data can be applied by making fine adjustments according to the desired dataset (LeCun et al., 2015). These algorithms are deep learning algorithms that can extract important features with minimal preprocessing.

The proposed CNN architecture predicts the apple disease class based on different pre-trained architectures. The pre-trained architectures are VGG19, DenseNet169, MobileNetV2, Xception and NASNetLarge. By modifying the layers of these architectures, they can be used on different datasets.

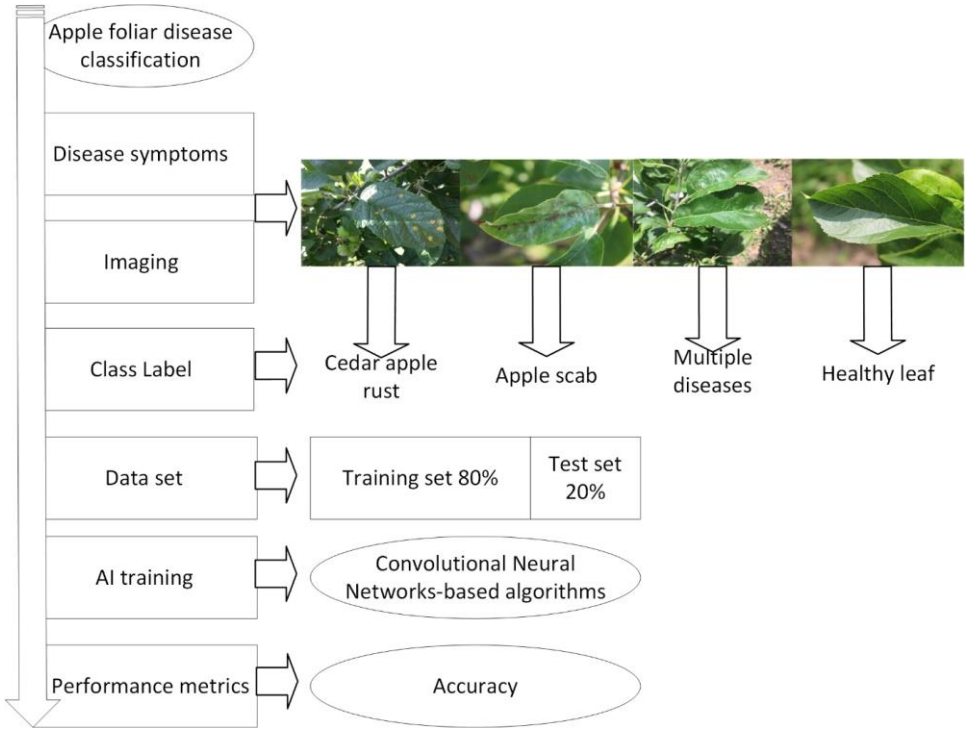


Figure 2. Deep learning model development steps flow diagram

Pre-trained CNN algorithms are given as the general input layer. The convolutional neural network is usually followed by an activation function and a pooling layer each (Gholamalinezhad & Khosravi, 2020). The rectified linear units (ReLU) layer interacts with the linear component of the model (Dittmer et al., 2020). The pooling layer is widely used in CNNs to reduce the spatial dimensionality of the feature maps of the hidden layers (Singh et al., 2020) and consists of four block layers consisting of dropout layers to avoid memorization. These layers are followed by classification layers (Dense Layer).

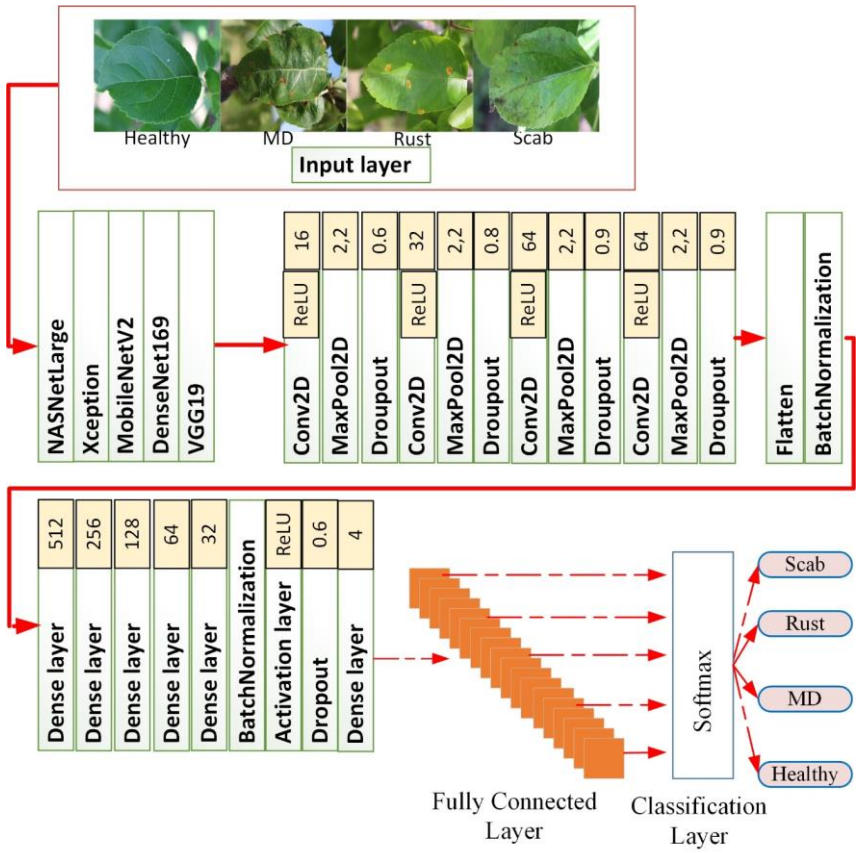


Figure 3. Proposed CNN-based apple leaf disease classification model AppleCNN based on transfer learning

3. Experiment analysis and discussion

The performance metric plays an important role in classifier evaluation (Miao & Zhu, 2022). The parameters such as epoch, batchsize of the pre-trained architectures used in the proposed network were set to be the same. The network was trained according to these settings and the results were obtained.

For the performance evaluation of the proposed method, basic evaluation metrics are calculated from a confusion matrix. The confusion matrix of binary classifiers has four outcomes: true positives (TP), true negatives (TN), false positives (FP) and false negatives (FN) (Foody, 2023). In this study, performance measurements were carried out with Accuracy, Precision, F-Score and Recall formulae commonly used in the literature. Table 1 summarizes the formulas for these metrics.

These pre-trained networks are given as input to the proposed CNN model. This process is called Transfer Learning. Transfer Learning is a machine learning technique that involves transferring knowledge acquired from the source domain to complete relevant tasks in the target domain. By leveraging the knowledge learned from the source domain, transfer learning can help overcome the challenges of limited labelled data in the target domain (Ma et al., 2024).

Table 1. Key evaluation metrics used in the confusion matrix

Metrics	Formula
Accuracy	$\frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$
Precision	$\frac{TP}{TP+FP}$
Recall	$\frac{TP}{TP+FN}$
F1 Score	$2x\frac{\text{Precision}x\text{Recall}}{\text{Precision}+\text{Recall}}$

Table 2. Classification results of the proposed CNN algorithm

Transfer learning	Type	Accuracy	F1 score	Precision
Proposed VGG19	Train	0.63	0.58	0.74
Proposed VGG19	Test	0.64	0.70	0.89
Proposed DenseNet169	Train	0.95	0.95	0.95
Proposed DenseNet169	Test	**0.95**	**0.95**	**0.95**
Proposed MobileNetV2	Train	0.97	0.97	0.97
Proposed MobileNetV2	Test	0.94	0.94	0.94
Proposed Xception	Train	0.97	0.97	0.97
Proposed Xception	Test	0.91	0.91	0.91
Proposed NASNetLarge	Train	**0.98**	**0.98**	**0.98**
Proposed NASNetLarge	Test	0.90	0.90	0.90

According to these results, the highest accuracy value was obtained with NASNetLarge architecture. NasNetLarge architecture is formed by adjusting normal and reduction cells using reinforcement learning method. Designed for training very large training sets, the architecture provided very good results in training performance in this study (Chaturvedi et al., 2020). In providing these results, it is important that it is designed for large data sets and that the 23-layered proposed model is in good harmony with the other layers. However, as stated in the studies in the literature, NasNetLarge, although it gives very good results on very large training data, did not provide as much performance as other pre-trained architectural models in the test results. The test accuracy value was obtained from the DenseNet169 architecture. Unlike other pre-trained architectures used in this study, the DenseNet169 architecture has a total of 164 convolution layers with 1x1 and 3x3 windows of 6, 12, and 32 sets (Dalvi et al., 2023). This feature in the DenseNet169 architecture has enabled detailed

features to be obtained with the layers in the proposed model, allowing for detailed features to be obtained for different patterns on plant leaves. This feature has enabled the model based on the DenseNet169 architecture to achieve higher test accuracy performance than other models. The proposed CNN model was compiled with the adam optimization method. The training and test performance results obtained after training as a result of this compilation are given below.

Figure 4 shows the training and test validation loss and accuracy graphs of the proposed DenseNet169 model. When Figure 4 is analysed, it is seen that the accuracy value starts from 0.48 and reaches 0.94 and 0.95 values. "val_accuracy" values start at 0.73 and reach 0.94 and 0.95 values. It is seen that "loss" values start at 1.19 and reach 0.14 and 0.11. It is seen that "val_loss" values start at 0.61 and reach 0.26 and 0.20 values. DenseNet169 architecture, with the power of the convolution layers it contains, has produced very consistent and widespread results in both validation and training. In this sense, the 95% training and test performance criteria obtained make this architecture stand out from other architectures.

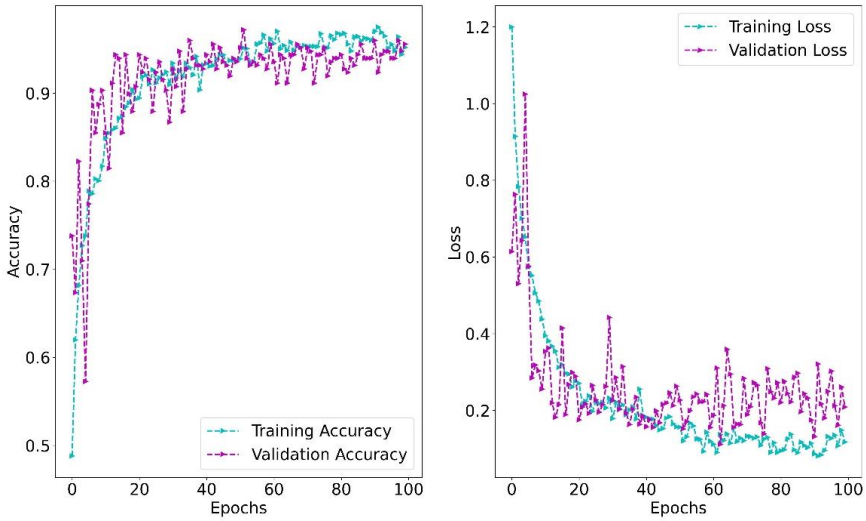


Figure 4.Training and test validation loss and accuracy graphs of the proposed DenseNet169 model

Figure 5 shows the training and test validation loss and accuracy graphs of the proposed MobilNetV2 model. When Figure 5 is analyzed, it is seen that the "accuracy" value starts from 0.49 and reaches 0.97 and 0.97 values. "val_accuracy" values start at 0.66 and reach 0.95 and 0.94 values. It is seen that "loss" values start at 1.20 and reach 0.07 and 0.08 values. It is seen that "val_loss" values start at 0.88 and reach 0.44 and 0.46 values In terms of the difference between training and test results, the best performance result after the proposed DenseNet169 model was obtained in the proposed MobileNetV2 model. Considering that the MobileNetV2 architecture is more compatible with portable devices than other architectures, this performance result is quite valuable.

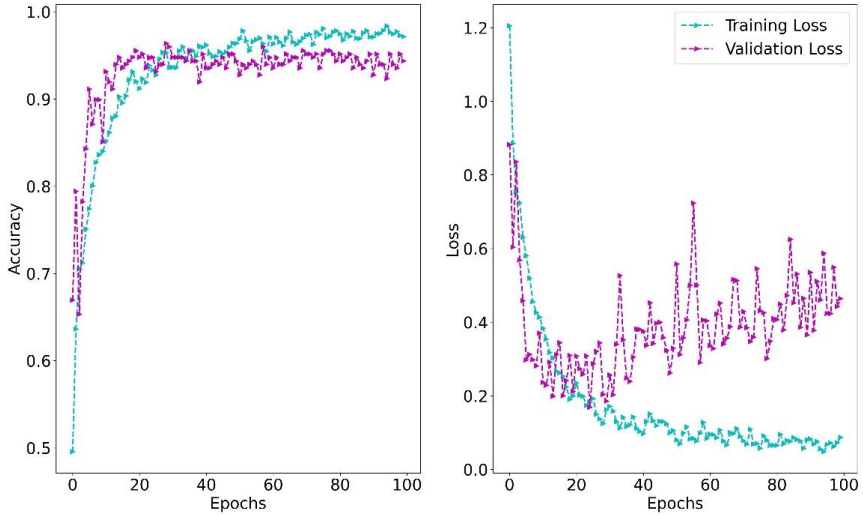


Figure 5. Training and test validation loss and accuracy graphs of the proposed MobilNetV2 model

Figure 6 shows the training and test validation loss and accuracy graphs of the proposed CNN algorithm for NASNetLarge. When Figure 6 is analyzed, it is seen that the "accuracy" value starts from 0.47 and reaches 0.97 and 0.98 values. "val_accuracy" values start at 0.60 and reach 0.92 and 0.90 values. It is seen that "loss" values start at 1.22 and reach 0.06 and 0.06 values. It is seen that "val_loss" values start at 0.94 and reach 0.40 and 0.49 values. The proposed NasNetLarge model, on the other hand, shows an increasing graph in training performance, while it experiences a downward break towards the end in validation graphs. For the reason stated, DenseNet169 has become the third-most performing model after MobileNetV2 architectures.

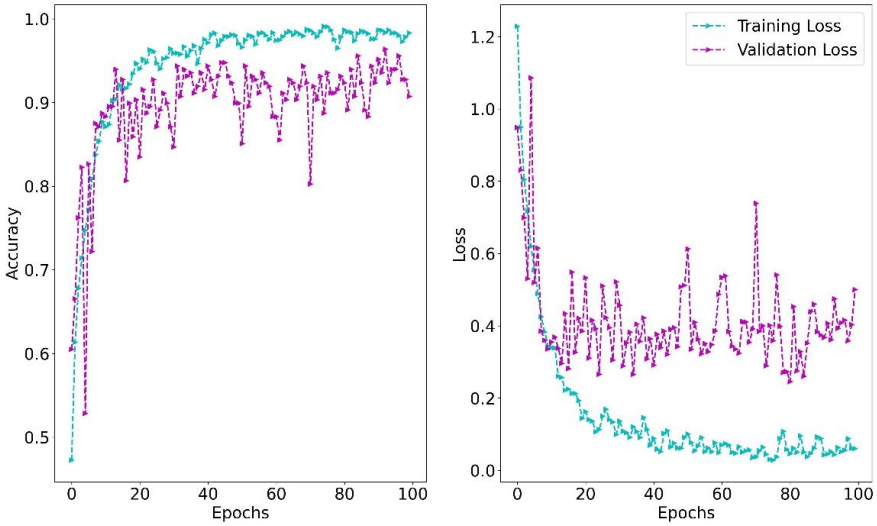


Figure 6. Training and testing validation loss and accuracy graphs for NASNetLarge of the proposed CNN algorithm

Figure 7 shows the training and test validation loss and accuracy graphs of the proposed CNN algorithm for VGG19. When Figure 7 is analysed, it is seen that the "accuracy" value starts at 0.29 and reaches 0.61 and 0.63 values. "val_accuracy" values start at 0.75 and reach 0.73 and 0.64 values. It is seen that "loss" values start at 1.39 and reach 0.85 and 0.84 values. It is seen that "val_loss" values start at 0.98 and reach 0.66 and 0.77 values.

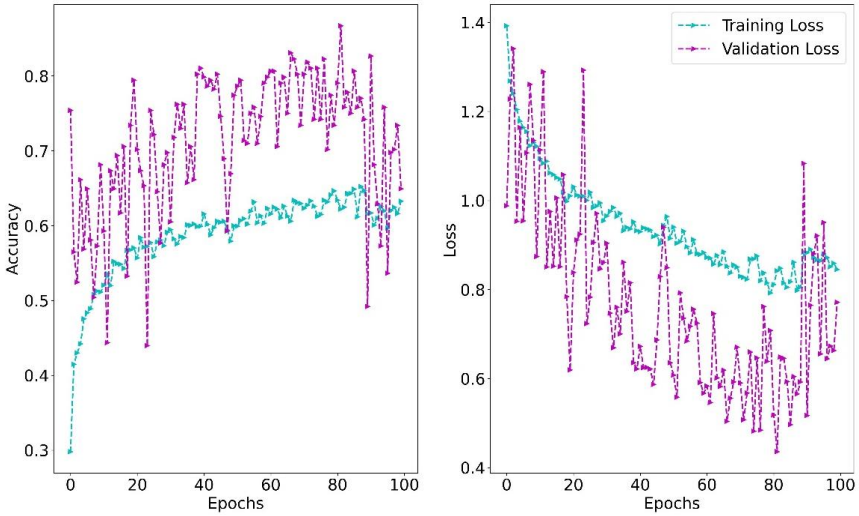


Figure 7. Training and testing validation loss and accuracy graphs of the proposed CNN algorithm for VGG19

Compared to other models, the proposed VGG19 shows a very poor performance. VGG19 includes small pooling layers ranging from 64 channels to 512 channels, consisting of 19 layers. Although good results have been obtained in plant classification with VGG19 in the literature, it is thought that in this study, good results were not obtained because the fine tuning of the pre-trained architecture did not match the layers placed on it (Senthil et al., 2024). VGG19, which contains three fully connected and five block convolutional layers, shows high performance in classifying many plants (Udayananda et al., 2022). The main reason why good results

were not obtained in this study compared to other models is that the layers added to the model are not fully compatible.

Figure 8 shows the training and test validation loss and accuracy graphs of the proposed Xception algorithm. When Figure 8 is analyzed, it is seen that the "accuracy" value starts at 0.47 and reaches 0.97 and 0.97 values. "val_accuracy" values start at 0.52 and reach 0.95 and 0.91 values. It is seen that "loss" values start at 1.20 and reach 0.06 and 0.06 values. It is seen that "val_loss" values reach 0.34 and 0.46 values starting from 1.06. The Xception architecture with separable convolution showed good performance in apple leaf classification (Pradhan et al., 2022). In the validation results, it gave an average success result in general, despite the increase in zigzag operations towards the last epoch.

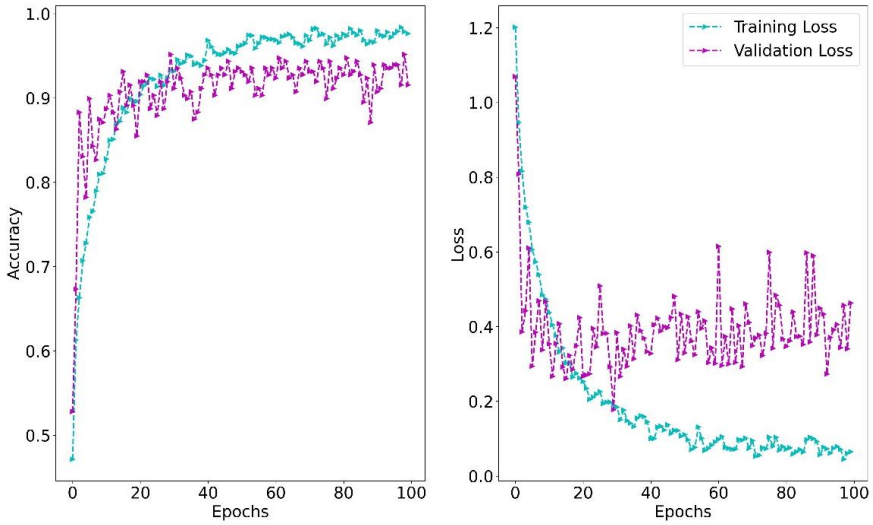


Figure 8. Training and testing validation loss and accuracy graphs for proposed Xception algorithm

When the network structure of the developed CNN models is analysed, it is seen that the learning process starts from a point close to zero and this ratio increases up to 0.98. Minority oversampling technology (SMOTE) method was used to balance the original data (Zhang et al., 2022). Classification was performed on this balanced dataset.

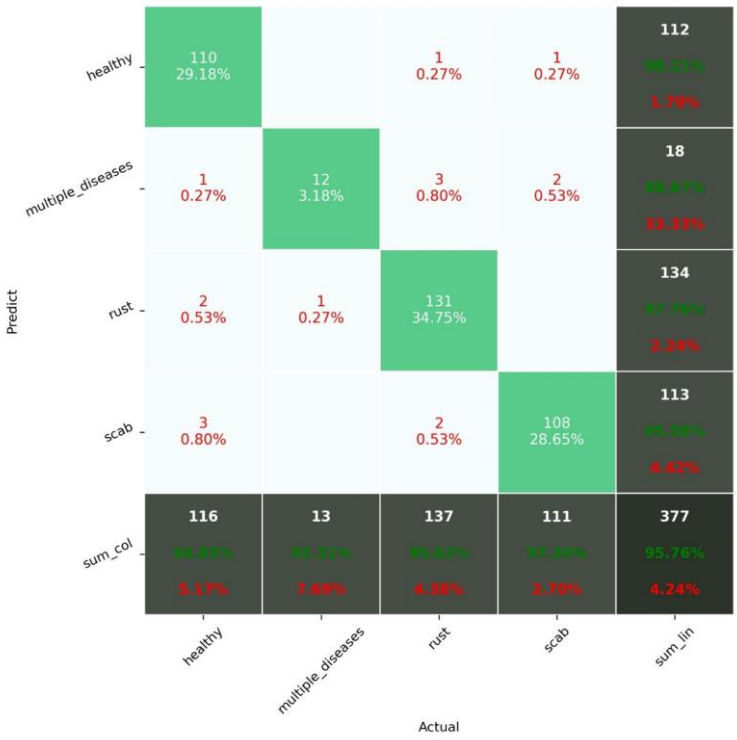


Figure 9. The confusion matrix of the proposed DenseNet169 model

The confusion matrix result of the proposed DenseNet169 model is given in Figure 9. This model provided better performance in terms of training and test results than the other models used in the study. The fact that the training and test results of the model are very close to each other means that the model is free from overfitting and underfitting (Eelbode et al., 2021). In the dataset where independence is high, the best and most reliable performance result was obtained in the proposed DenseNet169 model, where 98.21%, 66.67%, 97.76%, 95.58% and 95.76% validation accuracy performance results were achieved in the healthy, muptiple_diseases, rust, scab classes based on class. Among these performance rates, the classification performance that reduces the average is not good in the case of more than one disease on a leaf. In order to improve this rate, improvement can be made by classifying the lesion in the relevant segment after segmentation with segmentation methods. The limitation of the proposed DenseNet169 model within the scope of the study is that it does not have a good recognition rate on leaves with more than one disease. According to Figure 9, the order from the class with the most errors to the least is multiple_classes, scab, rust, healthy.

Table 3. Comparison table with studies using the same dataset in the literature

Model	Method	Train Accuracy	Test Accuracy
AppleCNN	NASNetLarge	0.98	0.90
AppleCNN	DenseNet169	0.95	0.95
Bansal et al. (Bansal et al., 2021)	DenseNet121	-	0.92
Zhong ve Zhao (Zhong & Zhao, 2020)	DenseNet121	-	0.92
Liu et al. (Liu et al., 2018)	AlexNet	-	0.91
HOG+SVM (Fan et al., 2022)	SVM	-	0.82
Deep Feature (Fan et al., 2022)	Deep Feature	-	0.91

According to the comparison table in Table 3, it is seen that the proposed AppleCNN model is competitive with existing studies. Bansal et al. conducted a study for classifying apple leaf diseases with DenseNet121, EfficientNetB7 architectures (Bansal et al., 2021). Among these architectures, it is reported that the DenseNet121 model makes classification with less error than the EfficientNetB7 architecture. Zhong and Zhao conducted an experimental study on this dataset, which they selected in order to provide an example solution to the oversampling and undersampling issues. They reached a test accuracy of around 92% with the DenseNet121 model they used in their experimental studies. Liu et al., on the other hand, carried out a study to measure the effects of factors such as direction distortion and light distortion on performance in classifying apple leaf diseases, influenced by the superior infrastructure of the AlexNet architecture (Liu et al., 2018). Fan et al. conducted an apple leaf disease classification study to show that experimental studies on the InceptionV3 architecture in different feature spaces can outperform other architectures (Fan et al., 2022). InceptionV3 architecture has been tested with fine tuning to measure the effect of different features on performance, from the classification of features extracted with HOG, one of the manual feature extraction methods, to the classification of deep features by extraction. The proposed DenseNet169 model provided better performance criteria than other studies using the same dataset in the literature. The limitation of the proposed DenseNet169 model is the complexity of the model. The proposed NasNetLarge model yielded high training performance results, confirming Chaturvedi et al. (2020) who stated that the NasNetLarge architecture provided high success in training modeling. However, it lags behind its competitors in test accuracy. It is seen that the other layers added to the proposed model have little effect on improving the test performance of this model. In terms of the dataset, the fact that the categories are very similar to each other and that there are leaves that contain more than one disease at the same time are seen as the basis of the problems experienced in leaf recognition (Fan et al., 2022). In order for the model to work on lightweight devices or portable devices in further studies, the idea that it should be focused on creating lighter and more portable models inspired by their architectural structures has emerged.

4. Conclusions

Accurate and reliable classification of apple leaf diseases has an effective role in precision agriculture and sustainable fruit tree management. In this sense, a new CNN algorithm is proposed that utilizes the capabilities of VGG19, DenseNet169, MobileNetV2, Xception, and NASNetLarge architectures on preprocessed apple leaf images. Using the advances in information technology, from 2000 to 2017, the total apple production in China increased from 20.4 to 41.4 million tons and in the world from 59.1 to 83.1 million tons (Zhu et al., 2021). In this sense, apple production is expected to increase. It was observed that the CNN architecture using NASNetLarge architectures achieved 98% accuracy compared to other algorithms. The DenseNet169 architecture achieved the highest test accuracy of 95%. A 98% test accuracy was achieved with the new CNN

model obtained by training on a dataset with 3651 RGB images. This gives us confidence that this approach can be used for disease classification.

Among the architectures used in experimental studies, the DenseNet169 model is the consistent architectural model with very little difference between both training and test results. However, this model is also limited in terms of computational complexity. If a real-time system is targeted for lightweight and portable devices in future studies, new CNN models with very few parameters should be created from the best features of the relevant architectures. Considering the diversity and scarcity of images in apple leaf disease data sets in the literature, it is clear that some operations should be done for future studies. In this sense, a new apple leaf data set can be created. It is important that the created data set consists of high diversity and type of images collected at the most appropriate time determined by following the ecological cycle of the apple. It is thought that this obtained data set will make a significant contribution to the literature because it is larger than the existing data sets and has a higher number of images.

Author contribution

The entire process of the article was carried out by the corresponding author.

Declaration of ethical code

The author(s) declare that this study does not require ethical committee approval or any legal permission.

Conflicts of interest

The author(s) declare no competing interests.

References

Abbas, A., Jain, S., Gour, M., & Vankudothu, S. (2021). Tomato plant disease detection using transfer learning with C-GAN synthetic images. *Computers and Electronics in Agriculture, 187,* 106279.

Aslam, M., Sana, M. U., Kiren, T., & Irshad, M. J. (2024). Classification of Apple Plant Leaf Diseases Using Deep Convolutional Neural Network. *The Asian Bulletin of Big Data Management*, *4*(02).

Bansal, P., Kumar, R., & Kumar, S. (2021). Disease Detection in Apple Leaves Using Deep Convolutional Neural Network. *In Agriculture, 11*(617), 1-23.

Chaturvedi, S. S., Tembhurne, J. V, & Diwan, T. (2020). A multi-class skin Cancer classification using deep convolutional neural networks. *Multimedia Tools and Applications*, *79*(39), 28477–28498.

Çetiner, H. (2021). Classification of Apple Leaf Diseases Using The Proposed Convolution Neural Network Approach. *Journal of Engineering Sciences and Design*, *9*(4), 1130–1140.

Çetiner, H. (2022). Citrus disease detection and classification using based on convolution deep neural network. *Microprocessors and Microsystems*, *95*(104687), 1–10.

Dalvi, P. P., Edla, D. R., & Purushothama, B. R. (2023). Diagnosis of Coronavirus Disease From Chest X-Ray Images Using DenseNet-169 Architecture. *SN Computer Science*, *4*(3), 214.

Delalieux, S., van Aardt, J., Keulemans, W., Schrevens, E., & Coppin, P. (2007). Detection of biotic stress (Venturia inaequalis) in apple trees using hyperspectral data: Non-parametric statistical approaches and physiological implications. *European Journal of Agronomy*, *27*(1), 130–143.

Dittmer, S., King, E. J., & Maass, P. (2020). Singular Values for ReLU Layers. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, *31*(9), 3594–3605.

Eelbode, T., Sinonquel, P., Maes, F., & Bisschops, R. (2021). Pitfalls in training and validation of deep learning systems. *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, *52–53*, 101712.

Fan, X., Luo, P., Mu, Y., Zhou, R., Tjahjadi, T., & Ren, Y. (2022). Leaf image based plant disease identification using

transfer learning and feature fusion. *Computers and Electronics in Agriculture*, *196*, 106892.

Foody, G. M. (2023). Challenges in the real world use of classification accuracy metrics: From recall and precision to the Matthews correlation coefficient. *PLOS ONE*, *18*(10), 1-27.

Gholamalinezhad, H., & Khosravi, H. (2020). *Pooling Methods in Deep Neural Networks, a Review*.

Giddings, Nahum James, & A. B. (1915). Apple Rust, *West Virginia Agricultural and Forestry Experiment Station Bulletins. 154* .

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, *521*(7553), 436–444.

Liu, B., Zhang, Y., He, D., & Li, Y. (2018). Identification of Apple Leaf Diseases Based on Deep Convolutional Neural Networks. *Symmetry*, *10*(1), 11.

Ma, Y., Chen, S., Ermon, S., & Lobell, D. B. (2024). Transfer learning in environmental remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, *301*, 113924. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113924

Miao, J., & Zhu, W. (2022). Precision–recall curve (PRC) classification trees. *Evolutionary Intelligence*, *15*(3), 1545–1569.

Mutembesa, D., Mwebaze, E., Nsumba, S., Omongo, C., & Mutaasa, H. (2019). Mobile community sensing with smallholder farmers in a developing nation; A scaled pilot for crop health monitoring. *arXiv preprint arXiv:1908.07047*.

Norelli, J.L., E. Borejsza-Wysocka, J.-P. R. and H. S. A. (2000). Transgenic 'Royal Gala' Apple Expressing Attacin E Has Increased Field Resistance To Erwinia Amylovora (Fire Blight). *Proc. EUCARPIA Symp. on Fruit Breed. and Genetics Eds M. Geibel, M. Fischer & C. Fischer Acta Hort.*, 538.

Oerke, E.-C., Fröhling, P., & Steiner, U. (2011). Thermographic assessment of scab disease on apple leaves. *Precision Agriculture*, *12*(5), 699–715.

Pak, M., & Kim, S. (2017). A review of deep learning in image recognition. *2017 4th International Conference on Computer Applications and Information Processing Technology (CAIPT)* (pp. 1-3), Bali.

Peil, A., Bus, V. G. M., Geider, K., Richter, K., Flachowsky, H., & Hanke, M.-V. (2009). Improvement of fire blight resistance in apple and pear. *International Journal of Plant Breeding*, *3*(1), 1–27.

Pradhan, P., Kumar, B., & Mohan, S. (2022). Comparison of various deep convolutional neural network models to discriminate apple leaf diseases using transfer learning. *Journal of Plant Diseases and Protection*, *129*(6), 1461–1473.

Sapna, S., Sandhya, S., Acharya, V., & Ravi, V. (2024). Apple foliar leaf disease detection through improved capsule neural network architecture. *Multimedia Tools and Applications*, *83*(16), 48585–48605.

Sengar, N., Dutta, M. K., & Travieso, C. M. (2018). Computer vision based technique for identification and quantification of powdery mildew disease in cherry leaves. *Computing*, *100*(11), 1189–1201.

Senthil, P., Jerin, B. S., & Jeciyazhini, J. (2024). Medicinal Plant Classification Using VGG-19. *2024 Second International Conference on Advances in Information Technology (ICAIT)*, *1*, 1–5.

Sharif, M., Khan, M. A., Iqbal, Z., Azam, M. F., Lali, M. I. U., & Javed, M. Y. (2018). Detection and classification of citrus diseases in agriculture based on optimized weighted segmentation and feature selection. *Computers and Electronics in Agriculture*, *150*, 220–234.

Singh, P., Raj, P., & Namboodiri, V. P. (2020). EDS pooling layer. *Image and Vision Computing*, *98*, 103923.

Sunil, C. K., Jaidhar, C. D., & Patil, N. (2023). Systematic study on deep learning-based plant disease detection or classification. *Artificial Intelligence Review*, *56*(12), 14955–15052.

Thapa, R., Zhang, K., Snavely, N., Belongie, S., & Khan, A. (2020). The Plant Pathology Challenge 2020 data set to classify foliar disease of apples. *Applications in Plant Sciences*, *8*(9), e11390–e11390.

Tu, S., Xue, Y., Zheng, C., Qi, Y., Wan, H., & Mao, L. (2018). Detection of passion fruits and maturity classification using Red-Green-Blue Depth images. *Biosystems Engineering*, *175*, 156–167.

Udayananda, G. K. V. L., Shyalika, C., & Kumara, P. P. N. V. (2022). Rice plant disease diagnosing using machine learning techniques: a comprehensive review. *SN Applied Sciences*, *4*(11), 311.

Wang, Y., Feng, K., Sun, L., Xie, Y., & Song, X. (2024). Satellite-based soybean yield prediction in Argentina: A comparison between panel regression and deep learning methods. *Computers and Electronics in Agriculture*, *221*, 108978.

Yu, H., Cheng, X., Chen, C., Heidari, A. A., Liu, J., Cai, Z., & Chen, H. (2022). Apple leaf disease recognition method with improved residual network. *Multimedia Tools and Applications*, *81*(6), 7759–7782.

Zhai, H. (2016). Research on image recognition based on deep learning technology. *2016 4th International Conference on Advanced Materials and Information Technology Processing (AMITP 2016)* (pp. 266–270), Guilin.

Zhang, Z., Liu, H., Chen, D., Zhang, J., Li, H., Shen, M., Pu, Y., Zhang, Z., Zhao, J., & Hu, J. (2022). SMOTE-based method for balanced spectral nondestructive detection of moldy apple core. *Food Control*, *141*, 109100.

Zhong, Y., & Zhao, M. (2020). Research on deep learning in apple leaf disease recognition. *Computers and Electronics in Agriculture*, *168*, 105146.

Zhu, X., Hu, R., Zhang, C., & Shi, G. (2021). Does Internet use improve technical efficiency? Evidence from apple production in China. *Technological Forecasting and Social Change*, *166*, 120662.

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 64-74 doi: 10.17714/gumusfenbil.1551941 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Geri dönüştürülmüş plastik ve cam tozu ile üretilen kompozit malzemenin seçili özellikleri üzerine dolgu oranının etkisi

Effect of filler ratio on selected properties of composite material produced with recycled plastic and glass powder

Bekir Cihad BAL*[1], Nasır NARLIOĞLU[2]

[1]*Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Malzeme Bölümü, Kahramanmaraş*

[2]*İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, İzmir*

• Geliş tarihi / *Received*: 17.09.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 17.01.2025

Öz

Doğada kısa sürede bozunmayan malzemelerin geri dönüşümü son yıllarda oldukça ilgi görmüş, bu ilgi sonucunda plastik, metal ve cam gibi malzemelerin geri dönüşümü önemli ölçüde artmıştır. Bu çalışmada, plastik sandalye atıkları ve cam şişe atıklarının geri dönüştürülmesiyle kompozitler üretildi. Kompozit üretimi için plastiğe eklenen atık cam tozu dolgusu, ağırlıkça %0-15-30-45-60 oranlarında belirlendi. Atık plastik ve cam tozunun ekstrüderde karıştırılmasıyla elde edilen karışımlar granül haline getirildi. Sonra, granüller sıcak preste kalıplanarak levha formuna dönüştürüldü. Ardından, levhaların bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanı sıra termal özellikleri belirlendi. Elde edilen verilere göre, kompozit karışımındaki cam tozu dolgusu arttıkça levhaların eğilme ve çekme dirençlerinin yanı sıra kopmada uzama değerleri azalmış, buna karşılık yoğunluğu, eğilme modülü ve çekme modülü artmıştır. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi sonuçlarına göre, polimer matris olarak kullanılan atık plastik sandalyenin doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (DDYPE) ve polipropilenden (PP) karışımı olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, karışımdaki cam tozu oranı artışına bağlı olarak entalpi değerleri genel olarak azalmıştır. Termogravimetrik analiz (TGA) sonuçlarına göre, plastik içerisine cam tozu eklenmesi termal ayrışma sıcaklıklarını bir miktar azaltmıştır.

Anahtar kelimeler: Atık cam, Atık plastik, Geri dönüşüm, Kompozit, Mekanik özellik, Termal özellik

Abstract

The recycling of materials that do not decompose quickly in nature has attracted considerable attention in recent years, and as a result of this interest, the recycling of materials such as plastic, metal, and glass has significantly increased. In this study, composites were produced by recycling plastic chair waste and glass bottle waste. The waste glass powder filler added to the plastic for composite production was determined at the rates of 0-15-30-45-60% by weight. The resulting mixtures were broken into granules after mixing waste plastic and glass powder in the extruder. Then, the granules were molded into sheet form in a hot press. Then, selected mechanical properties of the sheets and their thermal properties were determined. According to the obtained data, as the glass powder increased, the bending and tensile strengths of the sheets as well as the elongation values decreased whereas density, bending modulus and tensile modulus increased. According to the results of differential scanning calorimetry (DSC) analysis, it was understood that the waste plastic chair used as the polymer matrix was a mixture of linear low density polyethylene (LLDPE) and polypropylene (PP). In addition, enthalpy values generally decreased due to the increase in glass powder ratio in the mixture. According to thermogravimetric analysis (TGA) results, the addition of glass powder into plastic slightly reduced thermal decomposition temperatures.

Keywords*: Waste glass, Waste plastic, Recycling, Composite, Mechanical property, Thermal property*

*Bekir Cihad BAL; bcbal@hotmail.com

1. Giriş
1. Introduction

Poliolefin grubu polimerler ile üretilen kompozit malzemelerin kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Bu malzemelerin üretiminde farklı amaçlar için partikül yapıda veya lifli yapıda dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Üretim maliyetlerini azaltmak için polimer kullanımını azaltmak bu hedeflerden birisidir. Geçmişte farklı dolgu maddeleri kullanılarak üretilen polimer kompozit malzemeler üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu bilimsel çalışmaların çoğunda, lifli yapıdaki odun unu (OU) ve bir polimer malzeme kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiş ve üretilen malzemenin değişik teknolojik özellikleri araştırılmıştır. Örneğin; Stark & Matuana (2004), çam odunu unu ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kullanarak ürettikleri malzemenin yaşlanma testi sonrası mekanik özelliklerini, fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizini ve foto degradasyonunu araştırmışlardır. Çavuş (2020), maun OU ve polipropilenden ile üretilen kompozitlerde OU oranı arttıkça eğilme dayanımı ve eğilme modülünün arttığını, çekme dayanımının azaldığını, ancak çekme modülünün arttığını ve kopma anındaki uzama yüzdesinin azaldığını belirtmiştir. Narlıoğlu vd., (2018), OU ve PP kullanılarak üretilen kompozit levhaların OU oranı arttıkça çekme direnci ve darbe direncinin azaldığını, eğilme direncinin arttığını rapor etmişlerdir. Bal (2022a), Tetra Pak® kutuları ve çam OU geri dönüştürülmüş polietilenle karıştırarak kompozit levhalar üretmiş ve daha sonra levhaların seçilmiş bazı özelliklerini araştırmıştır.

Odun unu gibi lifli yapıdaki organik maddeler kullanılarak yapılan çalışmalara ek olarak, tanecik yapıdaki bazı mineral maddelerin dolgu maddesi olarak kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Örneğin; Essabir vd., (2014), HDPE, talk ve kayısı kabuğu unu kullanarak odun-plastik kompozit (OPK) üretmişler ve ürettikleri OPK'lerin bazı mekanik ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Awad vd., (2019), mermer ve granit tozu dolgulu HDPE kompozitlerinin termal ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Dolgu miktarı arttıkça kompozit malzemenin bazı mekanik ve termal özelliklerinin iyileştiğini, parçacık boyutu arttıkça bazı mekanik özelliklerin olumsuz etkilendiğini belirlemişlerdir. Mustapha (2020), kalsit ve yumurta kabuğu ile doldurulmuş PP esaslı kompozit malzemenin mekanik özelliklerini araştırmış ve bu dolgu maddelerinin mekanik özellikleri iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Sun vd., (2014), grafit dolgulu HDPE ve etilen vinil asetat kompozitlerindeki grafit parçacık boyutunun kompozitlerin termal kararlılığı, yanıcılığı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Grafit parçacık boyutu azaldıkça çekme dayanımının arttığı bildirilmiştir. Başka bir çalışmada Zhang vd., (2011), parçacık boyutu ve içeriğinin alüminyum oksit dolgulu HDPE kompozitlerin ısıl iletkenliği ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmış ve parçacık boyutu azaldıkça kompozitlerin ısıl iletkenliğinin ve çekme dayanımının arttığını bildirmişlerdir. Bu çalışmalara ek olarak, bazı önceki çalışmalarda atık cam tozu dolgulu polimer kompozitlerin bazı özellikleri de araştırılmıştır. Heriyanto vd. (2018), odun unu ve cam tozu ile doldurulmuş PP esaslı kompozit malzemenin bazı özelliklerini araştırmıştır. Dolgu maddesi olarak cam tozu kullanılan grupların bazı mekanik özelliklerinin, odun unu kullanılan gruplara göre daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Sadik ark., (2021), ürettikleri atık cam tozu dolgulu HDPE kompozitlerdeki cam tozu miktarı arttıkça kompozitlerin mekanik özelliklerinin azaldığını bildirmiştir. Bhaskar (2021), cam tozu dolgu miktarının polyester kompozitlerin bazı mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırma sonucunda, cam tozu dolgusunun başlangıçta mekanik özellikleri artırdığı, cam tozu oranı arttıkça bazı mekanik özelliklerin azaldığını bildirilmiştir. Altuntaş & Arıkan (2022), OPK üretiminde genleştirilmiş perlit kullanımının etkisini araştırmışlardır. Yapılan bir başka çalışmada ise Bal & Ayata (2024), cam tozu dolgulu PP kompozit malzemenin bazı renk ve parlaklık özelliklerini araştırılmış ve cam tozu dolgu oranının artması ile renk ve parlaklık değerlerinde önemli değişikliklerin meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Kullanılmış atık haldeki cam şişe ve plastik sandalye atıklarının öğütüldükten sonra bir ekstrüderde birbiriyle karıştırarak yeni bir kompozit malzeme üretilmesi üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı; atık haldeki plastik sandalyelerin geri dönüşümünden elde edilen plastiği polimer matris olarak ve öğütülmüş cam tozunu dolgu maddesi olarak kullanarak kompozit levha üretmek ve üretilen bu levhaların bazı mekanik ve termal özellikleri üzerinde dolgu maddesi oranının etkisini araştırmaktır.

2. Materyal ve metot
2. Material and method

2.1. Materyal
2.1. Material

Bu çalışmada, atık haldeki plastik sandalyelerden elde edilen geri dönüştürülmüş plastik, kompozit malzeme üretimi için polimer matris olarak kullanılmıştır. Atık haldeki plastik sandalyeler öncelikle şerit testerede parçalanmış (Şekil 1-A) ve sonra küçük parçalara ayrılmıştır (Şekil 1-B).

Çalışmada dolgu maddesi olarak kullanılan cam tozu, evsel kullanımlar sonucunda oluşan içecek şişelerin (Şekil 1-C) çekiçle kırılmış ve sonrasında laboratuvar tipi öğütücüde (Brader 1500) öğütülmüş halidir. Elde edilen bu cam tozları kompozit üretimine uygun boyutlarda elenmiştir. Eleme sonunda elde edilen gruplardan, 80 mesh üzerinde kalan cam tozu, kompozit malzeme üretimi için dolgu maddesi olarak kullanılmıştır (Şekil 1-D).



Şekil 1. Atık sandalye parçaları (A-B), atık cam şişeler (C) ve öğütülmüş cam tozu (D)
Figure 1. *Waste chair parts (A-B), waste glass bottles (C) and ground glass powder (D)*

2.2. Metot
2.2.Method

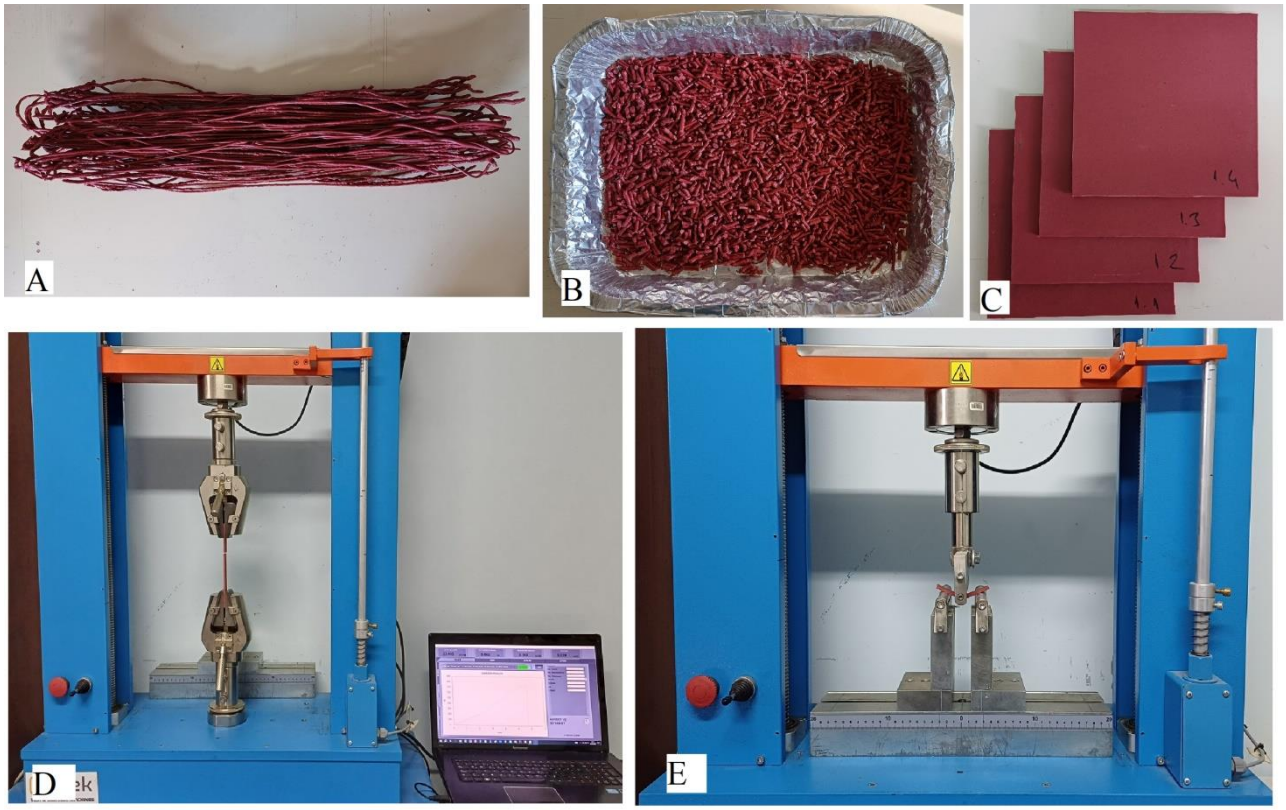
2.2.1.Kompozit levhaların üretimi
2.2.1.Production of composite panels

Elde edilen küçük atık sandalye parçaları ve cam tozu Tablo 1'de verilen oranlara göre karıştırılmış ve 1 kontrol ve 4 farklı deney grubu oluşturulmuştur. Atık plastik ve cam tozu karışımı kovan sıcaklığı 150 °C, 165 °C ve 175 °C olan tek vidalı ekstrüderde karıştırılmıştır.

Tablo 1. Kompozit malzemelerin ağırlıkça karışım oranları
Table 1. *Mixing ratios of composite materials by weight*

	Kontrol grubu	**Deney grupları**			
	Grup 1	Grup 2	Grup 3	Grup 4	Grup 5
Atık plastik (%)	100	85	70	55	40
Atık cam tozu (%)	0	15	30	45	60

Ekstrüderde işlem gören karışım, ekstruder çıkışındaki 3 mm çapındaki nozüldan filament halinde alınarak masa üzerinde soğumaya bırakılmıştır (Şekil 2-A). Daha sonra, bu flamentler parçalanarak küçük peletler elde edilmiştir (Şekil 2-B). Daha sonra bu peletler tekrar ekstruderden geçirilmiş, tekrar masa üzerinde soğutulmuş ve tekrar kırılarak küçük peletler elde edilmiştir. Homojen bir karışım elde etmek için malzeme ekstrüderde iki kez işlem görmüştür. Bu peletler metal bir kalıba yerleştirilmiş ve 180 °C sıcaklıkta elektrikle ısıtılan sıcak prese aktarılmıştır. Yapışmayı önlemek için, metal plaka yüzeyleri yağlanmıştır. Metal kalıp 12 d boyunca ısıtılmış ve malzeme eritilmiştir. Bu süre sonunda eriyen karışım metal kalıp ile beraber sıcak presten çıkarılarak hemen soğuk pres içerisine yerleştirilmiştir. Soğuk preste 5 d boyunca toplam 5 t basınç uygulanmıştır. Presleme işleminden sonra kompozit plaka metal kalıptan çıkarılarak 3.5 mm x 175 mm x 175 mm (kalınlık x genişlik x uzunluk) boyutlarında levhalar elde edilmiştir (Şekil 2-C). Her grup için 4 adet levha olmak üzere toplam 20 levha üretilmiştir.



Şekil 2. Soğutulan filamentler (A), peletler (B), grup 1 levhaları (C), çekme testi (D), eğilme testi (E)
Figure 2*. Cooled filaments (A), pellets (B), group 1 sheets (C), tensile test (D), bending test (E)*

2.2.2. Mekanik Özellikler
2.2.2. Mechanical properties

Kompozitlerin yoğunluk testleri ASTM D792'ye göre, çekme testleri ASTM D638'e göre Şekil 2-D'de görüldüğü gibi ve eğilme testleri ASTM D 790'a göre Şekil 2-E'de görüldüğü gibi yapılmıştır. Yoğunluk testleri 3.5 x 20 x 20 mm ölçülerindeki test numunelerinin havadaki ağırlıklarının sudaki hacimlerine bölünmesiyle belirlenmiş ve Tablo 2'de sonuçlar verilmiştir. Eğilme testi örnekleri 3.5 x 20 x 80 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Eğilme testlerini belirlemek için her gruptan 16 adet test örneği üzerinde ölçüm yapılmıştır. Eğilme testinde ön yük 2N, mesnet açıklığı 56 mm, test hızı 2 mm/dk olarak belirlenmiştir. Eğilme testlerinde, test sonunda ölçülen maksimum deformasyon miktarı Tablo 3'te eğilmede deformasyon olarak gösterilmiştir. Çekme deneyi sonunda elde edilen maksimum uzama yüzdesi de hesaplanmıştır. Bu değer Tablo 4'te kopmada uzama olarak verilmiştir. Çekme deneylerinde her grup için 16 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Çekme deney numuneleri 3.5 x 20 x 165 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Çekme deneyleri için köpek kemiği şeklindeki numuneler CNC freze tezgahında hazırlanmıştır. Çekme deneyi sırasında ön yükleme 5N, deney hızı ise 2 mm/dk olarak ayarlanmıştır.

2.2.3. Termal özellikler
2.2.3. Thermal properties

Malzemelerin termal özelliklerini belirlemek için Shimadzu TGA-50 cihazı kullanılarak 50 mL/dk azot gazı akışı altında, 10 °C/dk ısıtma hızında ve 30-600 °C sıcaklık aralığında termo gravimetrik analizler (TGA) gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, 50 mL/dk azot gazı akışı altında, 10 °C/dk ısıtma hızında ve 30-200 °C sıcaklık aralığına ayarlı Shimadzu DSC-60 cihazı kullanılarak malzemelerin diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizleri yapılmıştır. Termal analizlerin tamamında 5-10 mg örnekler kullanılarak testler yapılmıştır.

2.2.4. İstatistiksel analiz
2.2.4. Statistical analyze

Fiziksel ve mekanik testler sonrasında elde edilen veriler üzerinde SPSS istatistik programı kullanılarak tek yön varyans (ANOVA) analizi ve Duncan testleri yapılmış ve sonuçlar ilgili tablolarda (Tablo 2-3-4) gösterilmiştir.

3. Bulgular ve tartışma
3. Results and discussion

Levhaların yoğunluk değerlerine ait veriler ve istatistik hesaplamaların sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir. Tablodaki veriler incelendiğinde, en küçük yoğunluk değerinin kontrol grubu olan Grup 1'de ve en yüksek yoğunluk değerinin ise Grup 5'te ölçüldüğü görülmektedir. Grupların yoğunluk değerleri arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak anlamlıdır (P <0.001). Ayrıca, Duncan testi sonuçlarına göre, tüm gruplar arasında önemli farklılıklar vardır. Kompozit levhaların içeriğindeki cam tozu oranı arttıkça yoğunluk değerleri de artış göstermiştir. Bunun en önemli sebebi cam tozunun yoğunluğunun geri dönüşümden elde edilen plastiğin yoğunluğundan çok daha fazla olmasıdır. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar genel olarak bilinen kompozit kuralı ile uyum içerisindedir. Kompozit malzemenin özelliği kompoziti oluşturan bileşenlere benzerlik gösterir. Termoplastik esaslı kompozit malzemeler ile ilgili çalışmalarda da diğer araştırmacılar tarafından benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Matuana & Stark 2015; Çavuş, 2020; Bal, 2022a, 2022b).

Tablo 2. Grupların yoğunluk değerleri ve istatistik test sonuçları
Table 2. *Density values of groups and statistical test results*

		Gruplar					
		1	2	3	4	5	P değeri
Yoğunluk (kg/m^3)	x	983**A***	1079**B**	1162**C**	1313**D**	1400**E**	P < 0.001
	ss	8.6	11.5	15.4	19.6	45.7	

x: aritmetik ortalama, ss: standart sapma, *Duncan testi sonuçlarıdır ve A en küçük değeri göstermektedir. Aynı harfle kodlanan değerler arasında istatistiksel bir farklılık belirlenmemiştir.

Tablo 3'te eğilme direnci testi sonuçları, ANOVA P değerleri ve Duncan testi sonuçları gösterilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi en yüksek eğilme direnci değeri kontrol grubunda 44.1 N/mm^2, en küçük eğilme direnci değeri ise Grup 5'te 22.3 N/mm^2 olarak belirlenmiştir. Gruplar arasındaki farklar istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlıdır (P<0.001). Kompozit içerisindeki dolgu maddesi miktarı arttıkça eğilme direnci değeri azalmıştır. Eğilme direnci değeri, eğilme kuvveti tesiri altında olan bir malzemenin eğilirken bir arada kalabilme yeteneğidir. Dolgu maddesi olarak kullanılan cam tozu kohezyon dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu etki eğilme direnci değerinin azalmasına neden olmaktadır. Daha önce bu konuda yapılan çalışmalarda da kullanılan polimer malzemeden bağımsız olarak, dolgu maddesi (lifli yapıda veya partikül yapıda) miktarı arttıkça eğilme direncinin azaldığı belirlenmiştir (Berger & Stark, 1997; Özmen vd., 2014; Matuana & Stark, 2015; Altuntaş vd., 2017; Narlıoğlu vd., 2018; Narlıoğlu, 2021; Bal, 2022a, 2022b).

Kompozit gruplarının eğilmede elastikiyet modülü değerleri, eğilme direnci değerlerinin tersi olarak belirlenmiştir. En küçük eğilmede elastikiyet modülü değeri Grup 1'de 1488 N/mm^2, en büyük değer ise Grup 5'te 2381 N/mm^2 olarak elde edilmiştir. Kompozit malzemedeki dolgu maddesi miktarı arttıkça elastikiyet modülü de artış göstermiştir. Grup 1 ile Grup 2 arasındaki fark Duncan testine göre istatistiksel olarak önemsizdir. Ancak diğer gruplar arasındaki farklar istatistiksel olarak ileri düzeyde önemlidir ($p<0.001$). Eğilmede elastikiyet modülü, eğilme kuvveti tesiri altındaki bir malzemenin eğilme deformasyonuna karşı ne kadar iyi karşı koyabildiğini gösterir. Cam malzemenin elastikiyet modülü değeri, plastiklerden daha yüksektir. Bu nedenle, kompozit malzemenin eğilmede elastikiyet modülü, cam tozu dolgusu arttıkça artış göstermiştir. Önceki çalışmalarda da benzer sonuçlar rapor edilmiştir. (Berger & Stark, 1997; Altuntaş vd., 2017; Narlıoğlu vd., 2018; Bal, 2022a, 2022b).

Eğilme deneyinden elde edilen eğilmede deformasyon değerleri de Tablo 3'te verilmiştir. En yüksek eğilmede deformasyon değeri Grup 1'de 17.0 mm, en küçük değer ise Grup 5'te 13.3 mm olarak elde edilmiştir. Gruplar arasındaki farklar istatistiksel olarak anlamlıdır ($p<0.001$). Eğilmede deformasyon değerleri, kompozit malzemenin eğilme kuvveti altında deformasyon yeteneğini gösterir. Yüksek deformasyon değerleri, malzemenin sünek olduğunu gösterir. Buna karşılık, düşük deformasyon değerleri, malzemenin gevrek olduğunu gösterir. Buna göre, Grup 1 test numuneleri diğer gruplara kıyasla daha sünektir. Yapılan önceki çalışmalarda da eğilmede deformasyon değerleri hakkında benzer sonuçlar bildirilmiştir (Fiore vd., 2014; Bal, 2022a, 2022b).

Tablo 3. Grupların eğilme testi verileri ve istatistik test sonuçları
***Table 3**. Bending test data of groups and statistical test results*

		Gruplar					
		1	2	3	4	5	P değeri
Eğilme Direnci (N/mm^2)	x	44.1**E**	36.6**D**	31.3**C**	26.6**B**	22.3**A**	P<0.001
	ss	2.6	1.7	1.4	1.3	1.1	
Elastikiyet modülü (N/mm^2)	x	1488**A**	1499**A**	1763**B**	2044**C**	2381**D**	P<0.001
	ss	100	113	87	120	120	
Eğilmede Deformasyon (mm)	x	17.0**B**	16.9**B**	16.5**B**	15.8**B**	13.3**A**	P<0.001
	ss	1.9	2.0	2.3	2.1	1.9	

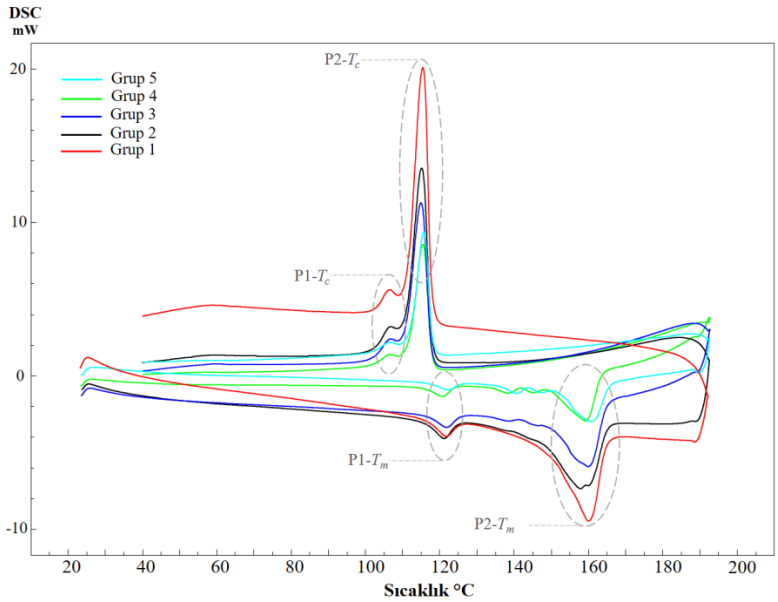
Tablo 4'te çekme testi ile ilgili veriler, Duncan testi sonuçları ve ANOVA P değerleri gösterilmiştir. Tablo 4'te görüldüğü gibi kompozit malzemedeki dolgu maddesi oranı arttıkça çekme direnci değerleri azalmıştır. Kontrol grubunun çekme dayanımı 15.5 N/mm^2 iken, Grup 5'in çekme dayanımı 8.0 N/mm^2 olarak belirlenmiştir. Grup 1 ve Grup 2 arasındaki fark hariç diğer gruplar Duncan testine göre birbirlerinden farklıdır ($p<0.001$). Cam tozu dolgu maddesinin malzemelerin çekme dayanımı üzerindeki etkisi negatiftir. Kopmada uzama değeri için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kompozit malzeme içeriğindeki cam tozu dolgu maddesi oranı arttıkça kopmada uzama değeri azalmıştır. Ancak, Grup 1, Grup 2 ve Grup 3 arasındaki farklar önemsizdir.

Cam tozunun çekmede elastikiyet modülü üzerindeki etkisi pozitiftir. Çekmede elastikiyet modülü, dolgu maddesi içeriği arttıkça artmıştır. Grup 1'in çekmede elastikiyet modülü 401 N/mm^2 iken, Grup 5'in çekmede elastikiyet modülü ise 610 N/mm^2 olarak belirlenmiştir. Grup 5 ile diğer gruplar arasındaki farklar istatistiksel olarak anlamlıdır ($p<0.001$). Ancak, Grup 1, 2, 3 ve 4 arasında bir fark yoktur. Polimer esaslı kompozit malzemeler ile ilgili yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Çavuş, 2020; Bal, 2022a, 2022b; Altuntaş & Arıkan, 2022).

Tablo 4. Grupların çekme testi verileri ve istatistik test sonuçları
Table 4. *Tensile test data of groups and statistical test results*

		Gruplar					P değeri
		1	2	3	4	5	
Çekme direnci (N/mm^2)	x	15.5**D**	15.1**D**	11.9**C**	9.7**B**	8.0**A**	P<0.001
	ss	2.1	1.1	0.7	0.7	0.3	
Elastikiyet modülü (N/mm^2)	x	401**A**	397**A**	382**A**	409**A**	610**B**	P<0.001
	ss	69	30	58	65	119	
Kopmada uzama (mm)	x	5.4**B**	5.4**B**	4.9**B**	4.1**A**	3.6**A**	P<0.001
	ss	0.7	0.9	1.1	0.9	0.8	

Şekil 3'te atık plastiğin (Grup 1) ve bu plastikle karıştırılmış atık cam tozu katkılı kompozitlerin (Grup 2-3-4-5) DSC eğrileri gösterilmiştir. Malzemelerin DSC eğrilerinin incelenmesi sonucunda bu çalışmada kullanılan atık plastiğin iki faklı polimerin (P1 ve P2) karışımı olduğu anlaşılmıştır. DSC analizi sonuçlarının önceki çalışmalarda (Saikrishnan vd., 2020; Scoppio vd., 2022; Sirin vd., 2022) yapılan DSC analizi sonuçları ile kıyaslanması sonucunda; bu çalışmada kullanılan polimerlerle referans çalışmalarda kullanılan polimerlerin birbirine benzer oldukları anlaşılmıştır. Bu çalışmada elde edilen DSC eğrileri (Şekil 3) ve analiz değerlerinden (Tablo 5), ilk (P1) erime ve/veya kristalizasyon pikinin doğrusal düşük yoğunluklu polietilenin (DDYPE) termal özellikleri ile benzer olduğu, ikinci (P2) erime ve/veya kristalizasyon pikinin ise polipropilenin (PP) termal özellikleri ile benzer olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Kompozitlerin DSC eğrileri
Figure 3. *DSC curves of composites*

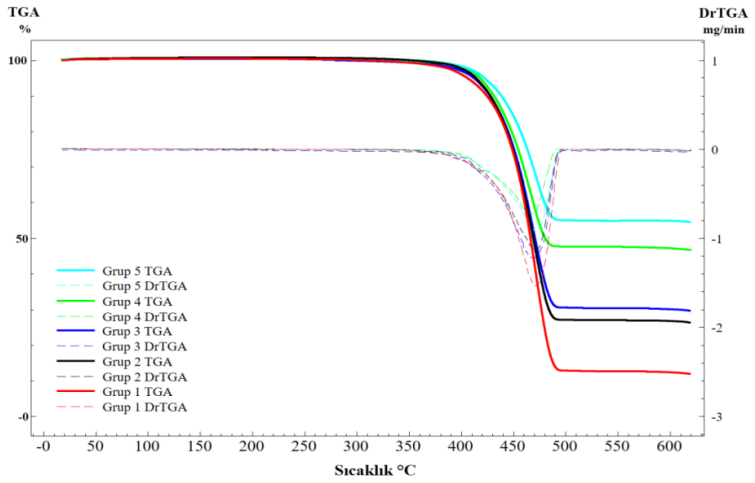
Atık plastik ve atık cam tozu karışımı kompozitlerin DSC analizi sonrasında elde edilen erime sıcaklığı (T_m), kristalizasyon sıcaklığı (T_c) ve kristalizasyon entalpisi (E_c) değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir. Atık plastik içerisine eklenen atık cam tozu P1 (DDYPE) polimerinin erime ve kristalizasyon sıcaklıklarını çok fazla etkilememiştir. Atık plastiğe atık cam tozunun ağırlıkça %15'ten daha fazla oranda eklenmesi durumunda ise P1 polimerinin kristalizasyon entalpisi azalmıştır. Atık plastik içerisine cam tozu eklenmesinin P2 (PP) polimerinin erime ve kristalizasyon sıcaklıkları üzerinde genel olarak çok fazla etkisi olmamıştır. DSC analizlerinde sadece %15 atık cam tozu katkılı kompozite ait ikinci polimerin (P2) erime ve kristalizyon değerlerinde çok az değişiklik olmuştur. Cam tozu dolgusuz grubun (Grup 1) P2 erime sıcaklığı 160.02 °C, kristalizasyon entalpisi 1.88 J/g olarak belirlenmiş, diğer yandan atık plastiğin %15 atık cam tozu ile karıştırılmasıyla elde edilen kompozitin (Grup 2) erime sıcaklığı 157.92 °C, kristalizasyon entalpisi 2.13 J/g

olarak belirlenmiştir. Burada görülen çok az farklılığın kompozit karışımını oluşturan bileşenlerin atık malzemeler olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Polimer ve karışımlarının termal özelliklerinin incelendiği bazı çalışmalarda DDYPE'nin erime sıcaklığının yaklaşık 120 °C, PP'nin erime sıcaklığının yaklaşık ise 160 °C olduğu bildirilmiştir (Sirin vd., 2022; Scoppio vd., 2022; Bal vd., 2023). Bunlara ek olarak grupların kristalizasyon entalpilerinin cam tozu katılım oranına bağlı olarak ilk önce çok fazla etkilenmediği, cam tozu katılım oranın artışı ile birlikte entalpi değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, hızlı soğuma nedeniyle polimerlerin entalpilerinin birbiri ile örtüşebildiği bildirilmiştir (Fonseca & Harrison, 1998).

Tablo 5. Kompozitlerin DSC analiz sonuçları
***Table 5**. DSC analysis results of composites*

Gruplar	P1			P2		
	T_m (°C)	T_c (°C)	E_c (J/g)	T_m (°C)	T_c (°C)	E_c (J/g)
1	121.87	106.46	0.11	160.02	115.42	1.88
2	121.23	106.65	0.11	157.92	115.24	2.13
3	121.89	106.73	0.05	159.94	115.08	1.42
4	120.80	106.35	0.05	159.21	115.48	1.22
5	122.24	106.62	0.05	160.34	115.74	0.68

Şekil 4'te atık plastik (Grup 1) ve atık cam tozu katkılı kompozitlerin (Grup 2-3-4-5) TGA ve türev termo gravimetrik analiz (DrTGA) eğrileri gösterilmiştir. TGA analizleri sonucunda elde edilen termogram eğrilerine göre malzemelerin tamamının tek bozunma bölgesinde gerçekleştiği görülmüştür. Bu bozunma eğrisinin ise poliolefinlerin TGA analizleri sonucu görülen tipik bozunma eğrileri ile benzer oldukları anlaşılmıştır. Gruplara ait termogram eğrilerinin incelenmesi sonucunda çalışmada kullanılan polimerin içerisinde termal olarak kararlı bir maddenin veya inorganik bir maddenin olduğu anlaşılmıştır. Önceki çalışmalarda plastik sandalye üretiminde dolgu malzemesi olarak genellikle kalsiyum karbonat gibi inorganik maddelerin kullanıldığı bildirilmiştir (Xanthos, 2005; Srivabut vd., 2021; Aliev vd., 2023). Bu çalışmada kullanılan polimerin plastik sandalye atıkları olması ve plastik sandalye üretiminde de kalsiyum karbonat gibi inorganiklerin dolgu maddesi amacıyla kullanılmaları, TGA analizi sonrasında arta kalan madde miktarının saf polimerlerinkine kıyasla daha fazla görülme nedenidir. TGA sonrasında elde edilen termogram eğrilerinden kompozit karışımındaki atık cam tozu miktarının artışına bağlı olarak kalan madde miktarlarının da arttığı görülebilmektedir.



Şekil 4. Kompozitlerin TGA eğrileri
***Figure 4**. TGA curves of composites*

Atık plastik ve atık cam tozu katkılı kompozitlere ait TGA değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Atık polimerin atık cam tozu ile karıştırılması sonucunda malzemelerin bozunma sıcaklıklarının genel olarak azaldığı görülmüştür. Cam tozu içermeyen atık plastiğe ait TGA değerlerinin incelenmesi sonucunda T_{max} değerinin 462.16 °C ve bozunma sonrası arta kalan madde miktarının ise yaklaşık %12 olduğu tespit edilmiştir. Tablo 6'da verilen bozunma oranlarından görülebileceği gibi kompozit karışımındaki atık cam tozu miktarının artışı ile bozunmadan kalan madde miktarlarının arttığı belirgin bir şekilde görülmektedir.

Tablo 6. Kompozitlerin TGA değerleri
Table 6*. TGA values of composites*

Gruplar	T_{max} (°C)	T_{onset} (°C)	T_{endset} (°C)	Bozunma (%)
1	462.16	449.44	485.64	87.93
2	458.74	430.44	483.96	73.83
3	458.69	430.98	483.59	70.26
4	454.49	431.57	477.48	53.31
5	459.18	432.47	483.39	45.58

4. Sonuçlar
4. Conclusions

Bu çalışmada, kompozit malzeme üretimi amacıyla atık plastik mobilya parçaları ve atık cam tozu kullanılarak beş farklı üretim parametresi belirlenmiş ve bu üretim parametrelerine göre kompozit malzemeler başarıyla üretilmiştir. Üretilen malzemelerin özelliklerinin tespiti için yapılan bazı fiziksel ve mekanik testler ile birlikte termal (DSC ve TGA) analizler sonrasında elde edilen verilere göre şu sonuçlar özetlenmiştir; kompozit malzemenin yoğunluk değeri, dolgu maddesi olan cam tozu miktarı arttıkça kontrol grubuna göre artmıştır. Gruplar arasındaki farklar istatistiksel olarak anlamlıdır. Kompozit malzemedeki dolgu maddesi miktarı arttıkça eğilme direnci ve eğilmede deformasyon azalmış, ancak eğilmede elastikiyet modülü artmıştır. Çekme testi sonunda elde edilen çekme direnci ve kopmada uzama değeri cam tozu miktarı arttıkça azalmış, ancak çekmede elastikiyet modülü artmıştır. DSC analizi sonuçlarına göre kompozit malzeme üretiminde kullanılan atık plastiğin iki farklı polimerin (DDYPE ve PP) karışımı olduğu anlaşılmıştır. TGA sonuçlarına göre plastik içerisine atık cam tozu eklenmesi, malzemelerin termal ayrışma sıcaklıklarını kısmen azaltmıştır. TGA sonuçlarına göre kompozit karışımındaki cam tozu oranının artışına bağlı olarak bozunmadan kalan madde miktarı kademeli olarak artmıştır.

Yazar katkısı
Author contribution

Bekir Cihad BAL: Araştırma konusunun belirlenmesi, çalışma planının oluşturulması, fiziksel ve mekanik testlerin yapılması, verilerin elde edilmesi, makalenin yazılması, makalenin yayınlanması. **Nasır NARLIOĞLU:** Araştırma konusunun belirlenmesine ve çalışma planının oluşturulmasına yardımcı olmak, termal testlerin yapılması, verilerin elde edilmesi, makalenin yazılması ve makalenin düzenlenmesi.

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Bu çalışmanın yazarları, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Kaynaklar
References

Aliev, S., Egamberdiev, E., Turabdjanov, S., Rashidov, S., Juraev, A. (2023). Role of fillers in the production of wood-polymer composites. In E3S Web of Conferences (Vol. 434, p. 02030). EDP Sciences, doi: 10.1051/e3sconf/202343402030

Altuntaş, E., ve Arıkan, A. K. (2022). Odun-plastik kompozit malzemelerde genleştirilmiş perlit kullanımının araştırılması. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 142-154. doi:10.33725/mamad.1208112

Altuntaş, E., Yılmaz, E., Salan, T. (2017), Investigation of the effect of high-fibrous filling material on the mechanical properties of wood plastic composites. *Turkish Journal of Forestry*, 18(3), 258-263.

ASTM D 638., (2004). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA. 1–24s.*

ASTM D 790., (2004). *Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, PA. 1–9s.*

ASTM D 792, (2004), *Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, ASTM D 792, Annual Book of American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards, Philadelphia (2007).*

Awad, A. H., Abd El-Wahab, A. A., El-Gamsy, R., & Abdel-latif, M. H. (2019). A study of some thermal and mechanical properties of HDPE blend with marble and granite dust. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(2), 353-358. doi: 10.1016/j.asej.2018.08.005

Bal B.C. ve Ayata Ü. (2024). Atık cam unu ve geri dönüştürülmüş polipropilen ile üretilen kompozit malzemeler üzerinde bazı yüzey özelliklerinin araştırılması, *Avrasya 10th international conference on applied sciences, 2-5. 05.2024.*Tiblis, Gürcistan.

Bal, B. C. (2022a). Mechanical Properties of Wood-plastic Composites Produced with Recycled Polyethylene, Used Tetra Pak® Boxes, and Wood Flour, *BioResources,* 17(4), 6569-6577. doi: 10.15376/biores.17.4.6569-6577

Bal, B. C. (2022b). Lineer düşük yoğunluklu polietilen (LDYPE) ve odun unu ile üretilen kompozit malzemenin bazı mekanik özellikleri üzerine bir araştırma. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 5(1). 40-49. doi: 10.33725/mamad.1126534

Bal, B. C., Altuntaş, E., Narlıoğlu, N. (2023). Some selected properties of composite material produced from plastic furniture waste and wood flour. *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 6(2). 233-244. doi: 10.33725/mamad.1384214

Berger, M. J., & Stark, N. M. (1997). Investigations of species effects in an injection-molding-grade, wood-filled polypropylene, *In The fourth international conference on wood fiber-plastic composites (pp. 19-25)*.

Bhaskar, K. B., Devaraju, A., & Paramasivam, A. (2021). Experimental investigation of glass powder reinforced polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 39, 484-487.

Çavus, V. (2020. Selected properties of mahogany wood flour filled polypropylene composites: the effect of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP). *BioResources,* 15(2), 2227-2236. doi: 10.15376/biores.15.2.2227-2236

Essabir, H., Bensalah, M. O., Bouhfid, R., & Qaiss, A. (2014). Fabrication and characterization of apricot shells particles reinforced high density polyethylene based bio-composites: mechanical and thermal properties. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 8(3), 344-351. doi: 10.1166/jbmb.2014.1447

Fiore, V., Botta, L., Scaffaro, R., Valenza, A., & Pirrotta, A. (2014). PLA based biocomposites reinforced with Arundo donax fillers. *Composites Science and Technology*, 105, 110-117. doi: 10.1016/j.compscitech.2014.10.005

Fonseca, C. A., & Harrison, I. R. (1998). An investigation of co-crystallization in LDPE/HDPE blends using DSC and TREF. Thermochimica Acta, 313(1), 37-41. doi: 10.1016/S0040-6031(97)00465-6

Heriyanto, Pahlevani, F., & Sahajwalla, V. (2018). Waste glass powder–Innovative value-adding resource for hybrid wood-based products. Journal of cleaner production, 195, 215-225, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.205

Matuana, L. M., Stark, N. M. (2015). The use of wood fibers as reinforcements in composites, in: Biofiber Reinforcements in Composite Materials, Woodhead Publishing, Swaston, UK, pp. 648-688.

Mustapha, K., Ayinla, R., Ottan, A. S., & Owoseni, T. A. (2020). Mechanical properties of calcium carbonate/eggshell particle filled polypropylene Composites. *MRS Advances*, 5(54-55), 2783-2792.

Narlıoğlu, N. (2021). Gürgen (Carpinus betulus L.) odunu zımpara tozunun termoplastik kompozit üretiminde değerlendirilmesi. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 4(1), 9-18. doi:10.33725/mamad.927157

Narlıoğlu, N., Çetin, N. S., & Alma, M. H. (2018). Karaçam testere talaşının polipropilen kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 38-45. doi: 10.33725/mamad.433532

Özmen, N., Çetin, N. S., Narlıoğlu, N., Çavuş, V., Altuntaş, E. (2014). MDF atıklarının odun plastik kompozitlerin üretiminde değerlendirilmesi. *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, 15, 65-71.

Sadik, W. A., El-Demerdash, A. G. M., Abokhateeb, A. E., & Elessawy, N. A. (2021). Innovative high-density polyethylene/waste glass powder composite with remarkable mechanical, thermal and recyclable properties for technical applications. Heliyon, 7(4), doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06627

Saikrishnan, S., Jubinville, D., Tzoganakis, C., & Mekonnen, T. H. (2020). Thermo-mechanical degradation of polypropylene (PP) and low-density polyethylene (LDPE) blends exposed to simulated recycling. *Polymer Degradation and Stability*, 182, 109390, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109390

Scoppio, A., Cavallo, D., Müller, A. J., & Tranchida, D. (2022). Temperature modulated DSC for composition analysis of recycled polyolefin blends. *Polymer Testing*, 113, 107656, doi:10.1016/j.polymertesting.2022.107656

Sirin, M., Zeybek, M. S., Sirin, K., & Abali, Y. (2022). Effect of gamma irradiation on the thermal and mechanical behaviour of polypropylene and polyethylene blends. *Radiation Physics and Chemistry*, 194, 110034, doi: 10.1016/j.radphyschem.2022.110034

Srivabut, C., Ratanawilai, T., Hiziroglu, S. (2021). Statistical modeling and response surface optimization on natural weathering of wood -plastic composites with calcium carbonate filler. J*ournal of Material Cycles and Waste Management*, 23(4), 1503-1517, doi: 10.1007/s10163-021-01230-7

Stark, N. M., & Matuana, L. M. (2004). Surface chemistry and mechanical property changes of wood-flour/high-density-polyethylene composites after accelerated weathering. *Journal of Applied Polymer Science*, 94(6), 2263-2273.

Sun, Z., Ma, Y., Xu, Y., Chen, X., Chen, M., Yu, J., Hu, Shuchun., & Zhang, Z. (2014). Effect of the particle size of expandable graphite on the thermal stability, flammability, and mechanical properties of high-density polyethylene/ethylene vinyl-acetate/expandable graphite composites. *Polymer Engineering & Science*, 54(5), 1162-1169. doi:10.1002/pen.23659

Xanthos, M. (2005). Calcium carbonate. Functional Fillers for Plastics. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 271-284, doi: 10.1002/3527605096

Zhang, S., Cao, X. Y., Ma, Y. M., Ke, Y. C., Zhang, J. K., & Wang, F. S. (2011). The effects of particle size and content on the thermal conductivity and mechanical properties of Al2O3/high density polyethylene (HDPE) composites. *Express Polymer Letters*, 5(7), 581-590.

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 75-92 doi: 10.17714/gumusfenbil.1488145 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Kısa dönem güneş ışınım tahmininde farklı hibrit yöntem oluşturma stratejilerinin başarılarının karşılaştırılması

Comparison of successes of different hybrid method formation strategies in short-term solar radiation prediction

Nazmiye BOZOK*[1], Emre AKARSLAN[1], Said Mahmut ÇINAR[1]

[1]*Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar*

• Geliş tarihi / *Received*: 22.05.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 17.01.2025

Öz

Güneş ışınım değeri, güneşten sağlayabileceğimiz enerji miktarı konusunda önemli bir bilgi taşır ve uygun bir planlama için ışınımın gelecek değerinin kestirilebilmesi gerekir. Bu kapsamda çok farklı tahmin modelleri geliştirilmiş olup, son dönemde, farklı modellerin üstünlüklerinden faydalanmak amacıyla geliştirilen hibrit modeller ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada farklı hibrit model oluşturma stratejilerinin güneş ışınım tahminindeki başarısı incelenmiştir. Bu kapsamda iki regresyon modeli (AR ve RIDGE) ile iki yapay zekâ yöntemi (Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Elman Sinir Ağı (ENN)) referans yöntemler olarak seçilmiştir. Bu dört yöntemden farklı hibrit model oluşturma stratejileri kullanılarak 4 farklı hibrit model oluşturulmuştur. Güneş ışınım verileri önce her bir yöntem bireysel kullanılarak modellenmiş sonra aynı süreç oluşturulan hibrit modeller ile gerçekleştirilmiştir. Hibrit modeller ile elde edilen sonuçlar hem birbirleri ile hem de bireysel modellerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve performansları değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Güneş ışınımı, Hibrit strateji, Regresyon modeli, Yapay sinir ağı modeli

Abstract

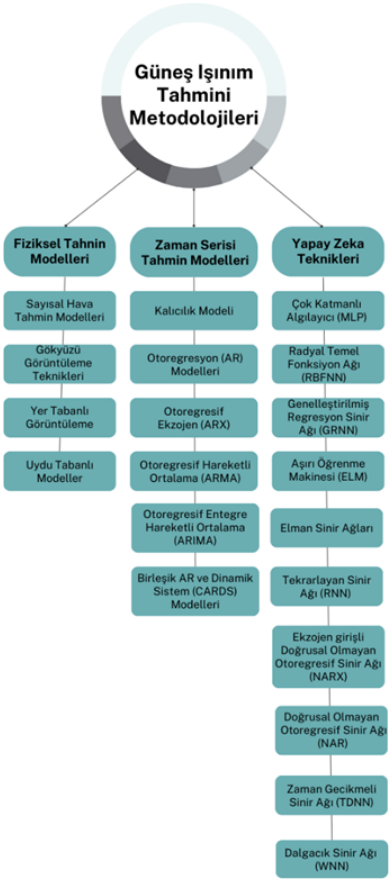
The solar radiation value carries important information about the amount of energy we can obtain from the sun, and predicting the future value of radiation is necessary for proper planning. In this context, various prediction models have been developed, and recently, hybrid models developed to take advantage of the strengths of different models have come to the forefront. This study examines the success of different hybrid model formation strategies in solar radiation prediction. Two regression models (AR and RIDGE) and two artificial intelligence methods (Artificial Neural Network (ANN) and Elman Neural Network (ENN)) were selected as reference methods. Four different hybrid models were created using different hybrid model formation strategies from these four methods. Solar radiation data were first modeled individually using each method and then the same process was carried out using the created hybrid models. The results obtained with the hybrid models were compared both with each other and with the results obtained from individual models, and their performances were evaluated.

Keywords*: Solar radiation, Hybrid strategy, Regression model, Artificial neural network model*

*Nazmiye BOZOK; nazmiyebozok@gmail.com

1. Giriş
1. Introduction

Son yıllarda, sanayileşme, nüfus artışı ve yaşam standardındaki gelişmeler gibi etkenlerden dolayı küresel enerji talebi önemli ölçüde artmıştır (Vecan & Özerdem, 2011). Günümüzde, enerji üretimi modern sanayileşmiş toplumlar için hâlâ sınırlı kaynaklara bağlıdır. Bununla beraber enerji talebi gün geçtikçe artmaktadır ve yapılan projeksiyonlara göre artmaya da devam edecektir. Bu durum, alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasını günümüzde önemli bir konu haline getirmiştir. Fosil yakıtların azalması ile güneş ışığı, rüzgâr, su, gelgit ve jeotermal ısı gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim sağlanmıştır (Al-Shamisi vd., 2013). Artan enerji talebinin yanı sıra çevre bilincinin gelişmesi de yenilenebilir enerjiyi ön plana çıkarmıştır (Akarslan vd., 2014). Son yıllarda özellikle de fosil kaynakların kullanılmasından kaynaklanan atmosfer sıcaklığının artması ile oluşan sera etkisinin azaltılması çalışmalarında, yenilenebilir enerji önemli bir rol üstlenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi çeşitli üstünlükleri sebebiyle ön plana çıkmaktadır (Akarslan & Hocaoglu, 2016). Güneş enerjisinin düşük fiyatı ve evrensel bulunabilirliği bu üstünlükler arasında sayılabilir (El-Amarty vd., 2023). Güneş enerjisi, fotovoltaik güneş pilleri ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi gibi çeşitli yöntemlerle elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Türkiye'de güneş enerjisinde gelinen son noktaya bakıldığında; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre, 2018 yılında 5063 MW olan güneş enerjisi kurulu gücü, Haziran 2022 itibariyle 8479 MW seviyelerine yükselmiştir. Aynı dönemde güneş enerjisinin Türkiye'deki toplam elektrik üretimi içindeki yüzdelik payı da artarak 2018 yılında %5,72'den, 2022 yılı itibariyle %8.35'e çıkmıştır. Bu artışlar, Türkiye'nin güneş enerjisi alanındaki büyümesini ve bu temiz enerji kaynağının elektrik üretim portföyündeki önemini vurgulamaktadır. Güneş enerjisinden daha etkili bir şekilde yararlanabilmek için güneş ışınımının özellikleri ile belirli bir zaman ve yerdeki miktarını bilmek gerekir (Vecan & Özerdem, 2011). Güneş ışınımı, değişken atmosferik koşullara, özellikle bulutlara ve aerosollere bağlı olarak oldukça stokastik bir olgudur (Thaker & Höller, 2022). Bu sebeple belirli bir zaman ve yerdeki miktarını belirlemek oldukça güçtür. Bu alanda literatürde gerçekleştirilmiş birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda farklı teknikler kullanılmış olup, bu tekniklerin sınıflandırılmasına ilişkin bir şema Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Tahminleme metodolojileri
Figure 1. *Forecasting methodologies*

Literatürde, geliştirilen güneş ışınım tahmini yöntemlerini inceleyen birçok önemli araştırma bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şu çalışmaları kapsamaktadır:

(Deniz & Kemal, 2007) ele aldığı çalışmada, güneş ışınımı şiddetini tahmin etmek için yapay sinir ağları (YSA) ve regresyon analiz yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, Zonguldak iline ait 1995 ile 2004 yılları arasındaki aylık ortalama veriler kullanılarak regresyon analiz yöntemi ve YSA ile modeller geliştirilmiştir. Regresyon analiz yöntemleri kullanıldığında ölçülen ve hesaplanan değerler arasında %1.28'lik bir ortalama bağıl hata belirlenirken, YSA kullanımında ise bu hata oranının %3.25 olduğu tespit edilmiştir. Al-Shamisi ve ark. (Al-Shamisi vd., 2013) tarafından yapılan bu çalışma yatay bir yüzeydeki aylık küresel güneş radyasyonunu tahmin etmek için bir YSA yaklaşımı sunmaktadır. YSA modelleri, 1995 ile 2007 yılları arasında 13 yıllık ölçülen meteorolojik veriler üzerinde uygulanmıştır. Modelleme için çok katmanlı algılayıcı (MLP) ve radyal tabanlı fonksiyon (RBF) sinir ağları kullanılmıştır. Elde edilen tahmin sonuçları regresyon modelleri ile karşılaştırılmıştır, sonuçlara göre YSA modeli diğer modellere göre daha iyi tahmin yaptığı görülmektedir. Akarslan ve ark. (Akarslan vd., 2014) tarafından ele alınan bir diğer çalışmada saatlik güneş radyasyonu tahmini için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Yıl boyunca saatlik olarak ölçülen ortam sıcaklığı ve dünya dışı ışınım verileri 2 boyutlu görüntü formlarına dönüştürülmüştür. Daha sonra veri noktaları görüntülerin pikselleri olarak değerlendirilmiştir. Ardından farklı MD (Çok Boyutlu) doğrusal tahmin filtre modelleri tasarlanmıştır. Sıcaklık, dünya dışı ışınım ve bu verilerin türevlerinin önerilen MD doğrusal tahmin filtrelerine dahil edilmesiyle tahmin doğruluğunun arttırılmasının mümkün olduğu gösterilmiştir. Çalışmada 14 farklı model ve 9 farklı filtre-musluk konfigürasyonu tasarlanmış ve test edilmiştir. Sonuçlar daha önce geliştirilen doğrusal tahmin filtre modelleri ve geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında farklı MD modelleri için %1 ila %30 aralığında daha iyi tahmin doğruluğu sağladığını göstermektedir. Gutierrez-Corea ve ark. (Gutierrez-Corea vd., 2016) tarafından yapılan bir diğer YSA tabanlı tahminleme modelinde, 900'e kadar girdiyle Yapay Sinir Ağları kullanılarak mekânsal-zamansal kısa vadeli güneş ışınım tahmininin modellenmesi, ilgili çalışmalarda elde edilen hata oranlarını azaltarak %20'nin altında doğruluk seviyesi elde etmiştir. Akarslan ve Hocaoglu (Akarslan & Hocaoglu, 2017) tarafından gerçekleştirilen yeni bir kısa vadeli güneş ışınımı tahmin metodolojisi ile geçmiş veri kayıtlarını kullanarak istenilen saatlere ait güneş ışınımı değerleri tahmin edilmiştir. Tahmin için, geçmişteki tahmin gününe benzer bir gün aranmış ve tahmin saatine kadar ölçülen güneş ışınımı verilerini içeren bir arama vektörü oluşturulmuştur. Daha sonra, benzer bir güne ait verilerin sapma bilgileri kullanılarak tahmin gerçekleştirilmiştir. Cho ve ark. (Cho vd., 2020) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise mevcut enerji üretim verilerine dayanarak, güneş radyasyonu ve sistem dönüştürme verimliliği ile Paralel Elman Sinir Ağını (PENN) kullanan saatlik alan güneş enerjisi tahmin modeli önerilmektedir. K-ortalama değerlendirmesi ve ters mesafe ağırlıklandırmayı içeren yerleşik değerlendirme algoritması kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen PENN algoritmasının RMSE ve MAPE açısından Geri Yayılım Yapay Sinir Ağı (BP-NN) ve ENN den daha iyi olduğu görülmektedir. Guher ve ark. (Guher vd., 2020) ele aldığı çalışmada, Kahramanmaraş ve Isparta illerinin saatlik ışınımını tahmin etmek için Makine Öğrenmesi (ML) algoritmaları aynı enlemdeki iki coğrafi konumun saatlik ortalama güneş ışınımını tahmin etmek için kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Gabralı ve Arslan (Gabralı vd., 2020) ise İstanbul Büyükçekmece İlçesi Eskice Bölgesine ait 2016 yılı meteorolojik verilerini kullanarak güneş radyasyonu için ileriye yönelik kısa ve orta vadeli bir tahmin çalışması yapmıştır. Modellemede YSA kullanılmıştır. Sonuçlar, güneş radyasyonu tahmininde YSA modellerinin diğer regresyon modelinden daha başarılı olduğunu göstermektedir. Arseven ve Çınar (Arseven & Çınar, 2023) tarafından yapılan bu çalışmada, Oto Regresif Entegreli Hareketli Ortalama (ARIMA), Ridge ve Lasso regresyon modelleri ile, 1 saatlik zaman ufkunda güneş ışınımı tahmini işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Dünya Dışı Işınım Filtresinin (DDIF) kullanılan yönteme entegrasyonu ile tahmin sonuçları iyileştirilmiştir. (Gök vd., 2019) tarafından ele alınan çalışmada Kahramanmaraş'taki GES üretimleri Yapay Sinir Ağları (YSA) tabanlı Levenberg-Marquardt algoritmasıyla eğitilmiş ve bulutluluk tahmin verileri ile geçmiş üretim verileri kullanılarak test edilmiştir. Analizler sonucunda, bulutluluk tahmini eklenen modelin, sadece geçmiş üretim verilerini kullanan modele göre daha başarılı olduğu bulunmuştur. (Alkan vd., 2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada rüzgâr ve güneş enerjisi santralleri için kısa dönem enerji üretim tahmin modelleri geliştirilmiş ve doğrulukları test edilmiştir. RMSE ve R2 gibi metriklerle yapılan analizlerde, tahmin modellerinin %99 güvenilir olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, MAPE değerinin %10'un altında çıkması, modellerin doğruluğunu teyit etmiştir. (Demirgül vd., 2024) yaptığı bu çalışmada Türkiye'deki 3600 grid noktasına ait solar radyasyon değerleri MARS ve LSSVR makine öğrenmesi teknikleriyle tahmin edilmiştir. Bu yöntemlerin, geleneksel yöntemlere kıyasla daha kolay ve alternatif bir çözüm sunduğu gösterilmiştir. (Çevik vd., 2017) tarafından ele alınan bu çalışmada, Trabzon'da gün öncesi güneş radyasyonu tahmini için bir yapay sinir ağı (YSA) geliştirilmiş ve benzer gün seçimi algoritması kullanılmıştır. MATLAB'da eğitilen YSA,

yağışlı ve bulutlu hava koşullarında güneş ışınımını kabul edilebilir hata oranıyla tahmin edebilmiştir. %9,88 OMYH ve 0,94 korelasyon katsayısı ile başarı değerlendirilmiş, bağıl nem ve sıcaklık verileri kullanılarak tahmin doğruluğu artırılmıştır.

Yukarıdaki sunulan literatür incelendiğinde, yapay zekâ yöntemleri ile regresyon yöntemlerinin güneş ışınım tahmini alanında sıkça kullanıldığı ve bu yöntemlerle başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bununla beraber daha başarılı sonuçlar elde etmek hedefiyle, literatürde, iki veya daha fazla farklı teknik veya yaklaşımın entegrasyonunu içeren hibrit yöntemlerin geliştirildiği görülmektedir. Bu modeller, her modelin gücünü ve faydalarını birleştirerek farklı tahmin problemleri için bağımsız bir modelden daha iyi performans sağlama yetenekleri nedeniyle son zamanlarda oldukça önemli hale gelmiştir (El-Amarty vd., 2023). Tahminde hibrit modelin temel fikri, verilerdeki farklı kalıpları yakalamak için her modelin benzersiz özelliğini kullanmaktır. Hem teorik hem ampirik bulgular, farklı modellerin birleştirilmesinin tahmin performansını iyileştirmenin etkili bir yolu olabileceğini göstermektedir (Ji & Chee, 2011). Literatürde hibrit yöntemlerin kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur ve bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Ji ve Chee (Ji & Chee, 2011) tarafından yapılan çalışmada saatlik güneş ışınım serisini tahmin etmek için Otoregresif ve Hareketli Ortalama (ARMA) modeli ile tartışmalı Zaman Gecikmeli Sinir Ağı (TDNN)'nı birleştiren hibrit bir model kullanılmıştır. Sonuç olarak güneş ışınımının değişken bileşenleri sebebiyle, bu hibrit modelin hem ARMA hem de TDNN'nin avantajlarından yararlanabileceğini göstermektedir. (Benmouiza, Cheknane, & Management, 2013)'ın ele aldığı çalışmada k -means algoritması ile Doğrusal Olmayan Otoregresif (NAR) ağını birleştiren yeni bir hibrit yöntem önerilmiş ve bu yöntem ile saatlik küresel güneş radyasyonu zaman serisinin birkaç saat önceden tahmini yapılmıştır. Sonuçlar yöntemin oldukça başarılı bir performans ortaya koyduğu göstermektedir. Akarslan ve Hocaoglu (Akarslan & Hocaoglu, 2016) yaptıkları çalışmada, saatlik güneş radyasyonu tahmini için iki farklı uyarlanabilir yaklaşım geliştirmiş ve test etmiştir. İlk yaklaşımda veriler mevsimlere ayrılmış ve doğrusal ve ampirik yöntemler kullanılmıştır. İkinci yaklaşımda açıklık indeksi, doğrusal yöntemin mi yoksa ampirik yöntemin mi daha başarılı olacağına karar vermek adına kullanılmıştır. Her iki stratejiyi de içeren yöntemin, doğrusal tahmin filtre yaklaşımından daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir. Gairaa ve ark. (Gairaa vd., 2016) tarafından ele alınan bir diğer hibrit yöntemde günlük küresel güneş ışınımını tahmin etmek için ARMA modeli ile doğrusal olmayan YSA modelini birleştiren yeni bir model önerilmiştir. Gözlemlenen ve tahmin edilen verilerin ARIMA ve YSA ile karşılaştırılması, hibrit modelin başarılı bir model olduğunu ortaya koymuştur. Hocaoglu ve Serttaş (Hocaoglu & Serttas, 2017) tarafından yapılan çalışmada, Mycielski ve Markov modellerini kullananan yeni bir hibrit yöntem önermişlerdir. Mycielski modeli geçmişte tekrarlana en uzun diziye bağlı olarak gelecek ışınım değerini belirlerken, Markov modeli, Mycielski modelinin kararsızlık oluşan durumları için olasılıksal bir çözüm sunmaktadır. Önerilen yaklaşımın güneş ışınım tahmininde yüksek bir performans sağladığı görülmektedir. Mukaram ve Yusof (Mukaram vd., 2017), Malezya'ya ait aylık ortalama güneş radyasyonu verileri Mevsimsel Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (SARIMA) modeli, YSA modeli ile hibrit yöntem kullanarak modellemiştir. SARIMA modeli mevsimsel verileri tahmin etmede güvenilir bir araç iken, YSA modelinin doğrusal olmayan verileri tahmin etmede iyi bir model olduğu kanıtlanmıştır. Her iki modeli birleştirerek daha doğru bir model elde edilmiştir.

Sansa ve ark. (Sansa vd., 2021) tarafından ARMA ve NARX olmak üzere iki modeli birleştiren yeni bir güneş radyasyonu tahmin yaklaşımı sunulmuştur. Önerilen model, haftalık güneş ışınımı ortalamalarını tahmin etmedeki etkinliğini yansıtan bazı farklı araştırmalarla karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar göstermiştir. Maham ve Akarslan (Maham & Akarslan, 2022) tarafından yapılan çalışmada, saatlik güneş ışınım tahmini için yeni bir hibrit yaklaşım önerilmiştir. Önerilen hibrit yöntemde, ilk olarak bulutluluk indeksi hesaplanarak yapay sinir ağları ile tahmin edilmiş ve buna göre kullanılacak yönteme karar verilmiştir. Bu kapsamda YSA, NARX ve RR yöntemleri baz alınarak geliştirilen hibrit yöntemin performansı, aynı veri setinde her bir yöntemin bireysel performansı ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda hibrit yöntemin daha başarılı sonuçlar sağladığı gösterilmiştir. Rangel ve ark. (Rangel-Heras vd., 2022), NARX modeli ve Düzeltici Vektör Çarpanı (CVM) modelini güneş ışınımı tahmini için hibrit bir model olarak kullanmıştır. Hibrit NARX-CVM modeli, doğrusal olmayan bir otoregresif sinir ağı ve kalıcılık modeliyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, hibrit modelin daha başarılı olduğunu göstermektedir. Yalçın ve Herdem (Yalçın & Herdem, 2022), hava durumu parametreleri ile güneş ışınımını tahmin etmek için bir LSTM (Uzun Kısa Süreli Bellek) -CNN (Evrişimli Sinir Ağı) hibrit derin öğrenme modeli önermiştir. Önerilen algoritma Python kodlama dilinde gerçeklenmiş ve mevcut LSTM ve CNN tabanlı algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre önerilen yöntem en az hata oranına sahiptir. Belmahdi ve ark. (Belmahdi vd., 2023) tarafından yapılan çalışmada, iki şehirdeki günlük

küresel güneş radyasyonunun tahmini, MATLAB simülasyon platformunda modellenen FFBP (İleri Beslemeli Geri Yayılım), ARIMA, ARMA, hibrit ARMA-FFBP ve hibrit ARIMA-FFBP gibi beş yaklaşımla değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar; hibrit ARIMA-FFBP modelinin, hibrit ARMA-FFBP ve diğer modellere nazaran daha başarılı bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir.

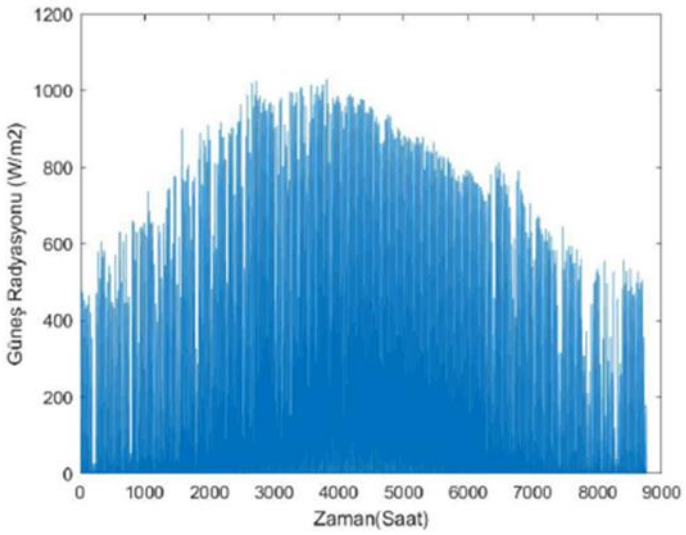
Literatürden elde edilen veriler ışığında güneş ışınımı tahmininde hibrit yöntemlerin başarısının yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu kapsamda sunulan bu çalışmada, farklı hibrit model oluşturma stratejilerinin saatlik güneş ışınımının tahminindeki başarısı incelenmiştir. Sunulan çalışmada değerlendirilen hibrit yöntemlerde kullanılan bireysel yöntemlerin tamamı aynı amaç (aynı değeri tahmin etmek) için kullanılmaktadır. Bütün bireysel yöntemler aynı değeri tahmin etmeye çalışırken, hibrit yöntem ya bunların ortalaması üzerinden bir tahmin değeri üretir ya da yöntemlerden birinin sonucunu seçer. Bu kapsamda, kullanılan güneş ışınım verileri, Meteoroloji Genel müdürlüğünden alınmış olup Van iline ait 2013 ve 2014 yıllarını kapsayan iki senelik verilerdir. Bu verileri modellemek için, doğrusal olan AR (Auto Regressive), Ridge Regresyon ve stokastik olan Yapay Sinir Ağları (YSA), Elman Sinir Ağları (ENN) olmak üzere dört yöntem seçilmiştir. Daha sonra veriler her bir yöntem ile modellenerek başarısı gözlemlenmiştir. Ardından model çıktılarının ortalama ve ağırlıklandırılmış ortalamalarının alınarak tahminlerin gerçekleştirildiği hibrit bir model stratejisi uygulanmıştır. Sonrasında veri seti mevsimlere ve aylara göre ayrılıp her bir yöntemin ilgili mevsim ve aydaki tahmin başarısı karşılaştırılmıştır. Her mevsim ve aydaki yüksek performansa sahip modelleri belirleyerek uygun modeli seçen hibrit bir strateji uygulanarak nihai tahminler gerçekleştirilmiştir. Uygulanan dört farklı hibrit yöntem stratejisi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sunulan makalenin akışı şu şekilde kurgulanmıştır; ikinci bölümde kullanılan veriler ve özellikleri sunularak tahmin için kullanılan modeller açıklanmış ve sonuçları değerlendirmede kullanılan değerlendirme kriterleri sunulmuştur. Üçüncü bölümde gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları detaylıca anlatılıp sonuçlar paylaşılmıştır. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve tartışılmıştır.

2. Materyal ve metot
2. Material and method

Bu bölümde, öncelikle çalışmada kullanılan Van iline ait güneş ışınımı veri setine ilişkin bilgiler sunulmuştur. Ardından çalışmada kullanılan AR, Ridge Regresyon, Yapay Sinir Ağları ve Elman Sinir Ağları tahmin modelleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Güneş ışınım verisinin doğrusal ve doğrusal olmayan karakteristikleri içeren doğası sebebiyle çalışmada, doğrusal olmayan karakteristikli veriyi modellemedeki başarısı dikkate alınarak yapay zeka yöntemleri (Yapay Sinir Ağları ve Elman Sinir Ağları) ve doğrusal karakteristikli veriyi modellemedeki başarısı dikkate alınarak regresyon yöntemleri (AR ve Ridge Regresyon) seçilmiştir. Sonrasında çalışmada kullanılan hibrit model oluşturma stratejileri anlatılarak, yöntemlerin başarılarını yorumlamada kullanılacak değerlendirme kriterlerinden bahsedilmiştir.

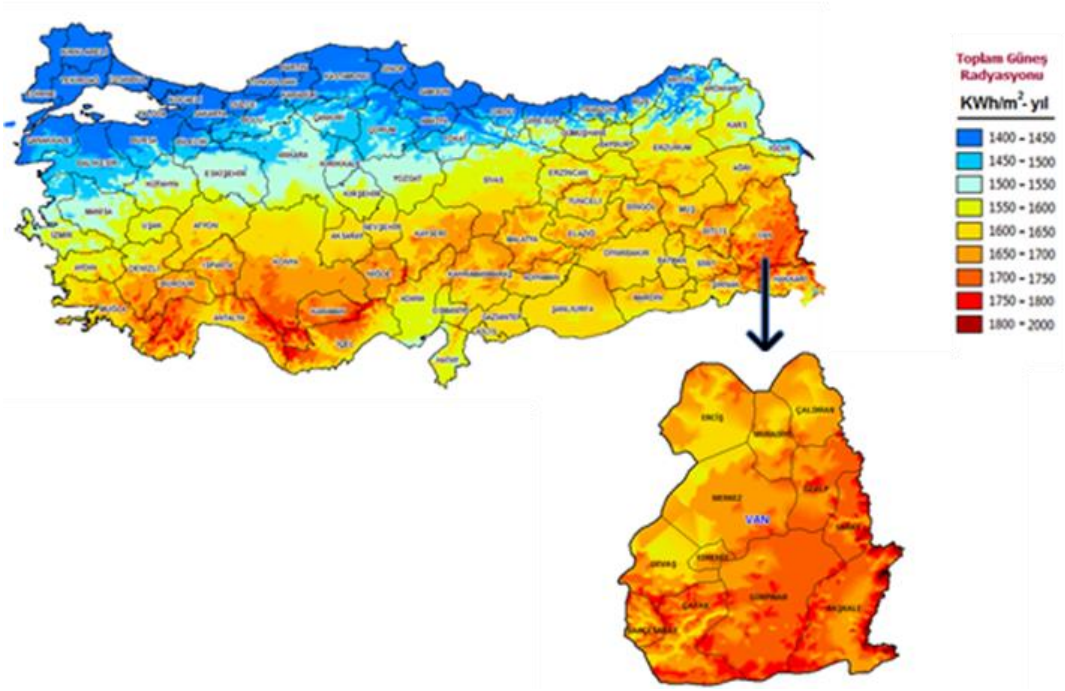
2.1. Kullanılan veriler
2.1.Data used

Bu çalışmada, kullanılan veri seti, Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan Van ili 2013 ve 2014 yıllarına ait saatlik güneş ışınım verilerini kapsamaktadır. Van ili; Türkiye'nin doğusunda, 38,48914° kuzey enlemi ve 43,40889° doğu boylamında konumlanmış olup deniz seviyesinden 1727 metre yüksekliktedir. Van iline ait ölçülen bir yıllık güneş ışınım değerinin değişim grafiği Şekil 2'de verilmiştir. Şekilden görüleceği gibi özellikle kış ve bahar aylarında değişkenliğin oldukça fazla olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3'te Türkiye'ye ilişkin güneşlenme haritası sunulmuştur. Haritadan da anlaşılacağı üzere Van, ülkemiz geneline kıyasla güneş enerjisi potansiyeli oldukça yüksek bir ildir. Güneş enerjisi üzerine yatırımlar genellikle güneş potansiyelinin yüksek olduğu bölgelerde yoğunlaşır ve ister yatırım planlama amacıyla olsun ister yönetim amacıyla olsun, bu bölgeler için farklı ölçeklerde tahmin çalışmalarına ihtiyaç duyulur. Sunulan çalışmada güneşlenme potansiyeli yüksek bir bölge olması sebebiyle Van iline ait veriler kullanılmıştır.



Şekil 2. 2013 yılı güneş ışınım değerleri
Figure 2. *2013 solar radiation values*

Bu çalışmada 2013 yılına ait 8760 adet güneş ışınım verisi (1 Ocak 2013- 31 Aralık 2013) eğitim için kullanılırken, 2014 yılına ait 8760 adet güneş ışınım verisi ise (1 Ocak 2014- 31 Aralık 2014) tahmin modellerinin yeteneğini test etmek amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada doğrusal model olarak otoregresif ve ridge regresyon olmak üzere iki model, stokastik model olarak ise ileri besleme geri yayılmalı yapay sinir ağları (YSA) ve elman sinir ağları kullanılmıştır.



Şekil 3. Güneş enerjisi potansiyeli haritası Van ili (GEPA) (EİGM)
Figure 3. *Solar energy potential map Van province (GEPA) (EİGM)*

2.2. Otoregresif (AR) model
2.1.1. Autoregressive (AR) model

Otoregresif (AR) modeli, bir zaman serisi analizi yöntemidir ve bir değişkenin geçmiş değerlerinin, kendisiyle lineer bir ilişkisi olduğunu varsaymaktadır. Bu model, bir değişkenin geçmiş gözlemlerine dayanarak gelecekteki değerleri tahmin etmeye çalışan ve zaman serileri analizinde yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir araçtır. Aynı zamanda durağan zaman serileri için oldukça doğru tahminler sağlamakta ve az veriye ihtiyaç

duymaktadır. AR modelleri, birçok avantaja sahiptir: AR modelleri, diğer zaman serisi modellerine kıyasla daha basit bir yapıya sahiptir ve kullanımı kolaydır. AR modelleri, diğer zaman serisi modellerine kıyasla daha az veriye ihtiyaç duyar. AR(p) modeli, p geçmiş değeri kullanarak bir sonraki zaman adımının değerini tahmin etmeye çalışır. Otoregresif model denklem (1) ile hesaplanmaktadır (Filik & Filik, 2017; Zhen-Yu & Lian-Wen, 2008).

$$y(t) = c + \Sigma\left(\varphi(i)\, y(t-i)\right) + \varepsilon(t) \tag{1}$$

Bu denklemde y(t) değişkenin t anındaki değerini, c Sabit terimi, $\varphi(i)$ birinci gecikme için katsayıyı, $y(t-i)$ değişkenin $t-i$ zamanındaki değerini ve $\varepsilon(t)$ t zamanındaki hata terimini temsil etmektedir.

2.3. Ridge regresyon
2.3. Ridge regression

Ridge regresyon (RR) yöntemi ilk defa 1970 yılında Technometrics dergisinde yayınladıkları iki makale ile Hoerl ve Kennard tarafından geliştirilmiştir (Büyükuysal, 2010) Amaç, regresyon katsayılarını küçültmek veya sınırlamak suretiyle modelin aşırı uyum (overfitting) sorununu çözmektir. Regresyon modellerinde amaç, bağımlı değişkeni (tahmin edilmek istenen değişkeni) en iyi açıklayan katsayıları bulmaktır. Ridge regresyonda, En Küçük Kareler yöntemiyle hesaplanan regresyon katsayılarına bir ceza eklenir. Katsayıların karelerinin toplamı modelin hata fonksiyonuna eklenir. Bu cezalandırma, katsayıların çok büyük değerlere ulaşmasını engeller, böylece daha genel, dayanıklı ve daha iyi genelleme yeteneğine sahip bir model elde edilir. Bu ceza, katsayıların büyüklüğünü sınırlayarak modelin karmaşıklığını azaltır. Bu sayede, modelin varyansını düşürerek aşırı uyumu azaltır ve daha genelleştirilebilir bir model elde edilir. Ridge regresyonun formülü denklem (2) de verilmektedir.

$$L_{ridge}(\beta) = \arg\min\{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^{P} x_{ij}\beta_j)^2 + \lambda\sum_{j=1}^{P}\beta_j{}^2\} \tag{2}$$

L_{ridge} Ridge regresyonu ile tahmin edilen regresyon katsayıları vektörünü ifade ederken

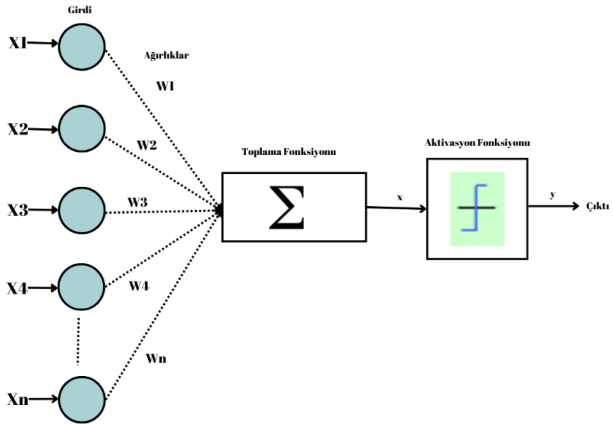
$\sum_{i=1}^{N}(y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^{p} x_{ij}\beta_j)^2$ ifadesi En Küçük Kareler yöntemi tarafından minimize edilen hatanın karesini belirtmektedir. λ ise Ridge regresyonunun düzenleme parametresi veya katsayısıdır.

Ridge regresyon, özellikle bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağımlılıkların olduğu durumlarda ve aşırı uyumun olduğu durumlarda faydalıdır. Bu yöntem, modelin kararlılığını artırır ve genelleme performansını iyileştirir.

2.4. Yapay Sinir Ağları (YSA)
2.4. Artificial Neural Networks (ANN)

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin bilgi işleme süreçlerine benzer bir yapıya sahip matematiksel modellerdir. Bu modeller, yapay nöron adı verilen temel işlem birimlerinden oluşur ve bu nöronlar katmanlar halinde düzenlenir. YSA'ların temelinde, giriş verilerini işleyerek çıktı üreten karmaşık bir ağ yapısı bulunur. Bu ağ yapısı genellikle üç ana katmandan oluşur: giriş katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı. Giriş katmanı, dış dünyadan gelen bilgileri alırken, çıktı katmanı ise sonuçları sunar. Aradaki gizli katmanlar ise karmaşık ara hesaplamaları gerçekleştirir ve bilgiyi işler (Belmahdi vd., 2023).

Yapay sinir ağları, belirli bir öğrenme algoritması kullanılarak veri örneklerinden öğrenirler ve ağırlıklarını bu öğrenme süreci boyunca güncellerler. Bu sayede, girdi verilerinden çıktı tahminleri yapabilirler (Benmouiza et al., 2013). Yapay sinir ağları, geniş bir uygulama alanına sahiptir ve modelleme, tahminleme ve kontrol gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle de YSA'lar karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleme konusunda önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. Şekil.4'te YSA'nın genel modeli gösterilmektedir.



Şekil 4. YSA matematiksel modeli
Figure 4. *ANN mathematical model*

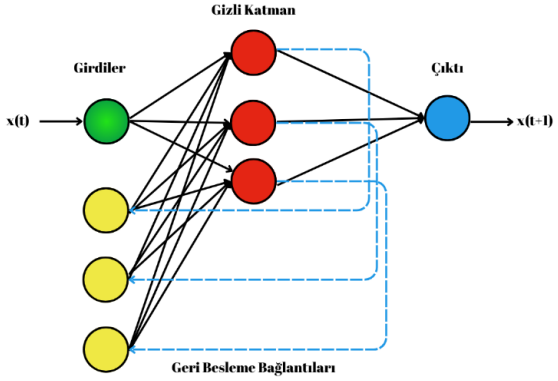
Giriş verileri $x = (x_1, x_2, x_3, ...x_n)$ doğrudan giriş katmanına verilir. Her bir gizli katmandaki her bir sinir hücresi, giriş verilerinden ve önceki katmandaki sinir hücrelerinden gelen ağırlıklı toplamı alır, ardından bir aktivasyon fonksiyonuna (genellikle sigmoid, ReLU, tanh vb.) uygular. Her bir sinir hücresinin çıktısı, bir sonraki katmandaki sinir hücrelerine giriş olarak kullanılır. Son gizli katmandan gelen çıktılar, çıktı katmanına beslenir. Çıktı katmanındaki her bir sinir hücresi, gizli katmandaki sinir hücrelerinden gelen ağırlıklı toplamı alır ve yine bir aktivasyon fonksiyonuna uygular. Matematiksel gösterimi denklem (3) de verilmektedir.

$$z = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b \tag{3}$$

Z ağırlıklı girdi toplamını, *wi* girişlerin ağırlıklarını, *xi* giriş değerlerini, *b* sinir hücresinin sapmasını (bias), *n* ise giriş sayısını belirtmektedir.

2.5. Elman Sinir Ağları
2.5. Elman neural networks

Elman sinir ağları, yapay sinir ağlarının bir türüdür ve geri beslemeli (recurrent) yapılara sahip bir sinir ağıdır (Cho et vd., 2020). Bu yapı, geçmiş zamandaki durumları hatırlayarak mevcut girdiyi işlemek için kullanılmaktadır. Elman sinir ağlarının mimarisi genel olarak dört katmandan oluşur: giriş, gizli katman, geri besleme bağlantıları ve gizli katman (Jallal et vd., 2019). Giriş katmanından gelen bilgiler gizli bir katmana iletilir ve ardından bir çıktı katmanı tarafından işlenir. Elman ağlarının gizli katmanında, her bir birim, önceki zaman adımlarında alınan çıktıları saklamak için bir bağlam birimi ile birleştirilir. Bu bağlam birimi, giriş katmanından gelen bilgilerle birleştirilerek ağın gizli katmanına geri besleme yapar. Bu yapı, ağın önceki zaman adımlarında aldığı bilgileri mevcut işlem için kullanmasını sağlar, böylece zaman serileri gibi zaman bağımlı verileri işleyebilir. ENN; dil işleme, zaman serileri tahmini ve kontrol uygulamaları gibi birçok alanda başarıyla kullanılmaktadır. Şekil.5'te Elman sinir ağlarının modeli sunulmaktadır.



Şekil 5. Elman sinir ağları
Figure 5. *Elman neural networks*

Genel olarak, bir Elman sinir ağı formülü denklem (4) ile hesaplanmaktadır.

$$h_t = f(W_{ih}x_t + W_{hh}h_{t-1} + b_h) \quad (4)$$
$$y_t = g(W_{h0}h_t + b_0)$$

Bu denklemlerde h_t t zaman adımındaki gizli katman çıktısı, x_t t zaman adımındaki girdi vektörü, W_{ih} girdi katmanı ile gizli katman arasındaki ağırlık matrisi, W_{hh} gizli katman içindeki geri besleme bağlantıları için ağırlık matrisi, W_{h0} Gizli katman ile çıktı katmanı arasındaki ağırlık matrisi, b_h ve b_0 sırasıyla gizli ve çıktı katmanlardaki bias terimleri ve f ve g aktivasyon fonksiyonları olarak tanımlanmaktadır.

2.6. Hibrit yöntem
2.6. Hybrid method

Bu çalışmada; saatlik güneş radyasyonunu tahmin etmek için AR, Ridge Regresyon, YSA ve ENN modelleri kullanılarak farklı hibrit model oluşturma stratejileri ile hibrit yöntemler oluşturulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak dört model ile bireysel tahminler yapılıp sonuçlar değerlendirilmiştir. İlk hibrit model oluşturma stratejisinde kullanılan yöntemlerden elde edilen tehmin değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak tahminler gerçekleştirilir. İkinci hibrit modelde ise eğitim aşamasındaki hata oranları dikkate alınarak her bir modelden elde edilen sonuçlar ağırlıklandırılıp ortalama değer alınarak tahmin değeri elde edilmiştir. Ağırlıklandırılma yapılırken en başarılı yöntemin en yüksek ağırlığa sahip olacak şekilde ağırlıklar belirlenmiş ve bu ağırlıklarla çarpılıp ortalaması alınarak ağırlıklı ortalama tahmin değeri elde edilmiştir. Üçüncü modelde kullanılan her bir yöntemin farklı mevsimlerdeki eğitim seti üzerindeki performansları incelenerek, her bir mevsimde en başarılı yöntemler belirlenmiştir. Mevsimlerde güneş karakteristiği birbirinden farklılık göstereceği için farklı modeler farklı mevsimlerde başarılı olabilirler. Bunu dikkate alarak mevsime dayalı bir hibrit yapma yöntemi kullanılmıştır. Tahmin aşamasında ise eğitim setinden elde edilen bilgiler kullanılarak, her mevsimde o mevsimde en başarılı yöntemin çıktısı hibrit yöntemin tahmini olarak belirlenmiştir. Dördüncü strateji de ise benzer bir yaklaşım aylık bazda değerlendirilmiştir. Eğitim setinde bireysel yöntemlerin her bir aydaki tahmin performansları incelenerek, her ay için en başarılı yöntem belirlenmiştir. Tahmin aşamasında her ay için, o aya ilişkin en başarılı yöntemin çıktısı hibrit yöntemin çıktısı olarak atanmıştır. Şekil 6'da sürece ilişkin bir prensip şema sunulmuştur.



Şekil 6. Geliştirilen yaklaşımın prensip şeması
Figure 6. *Principle diagram of the developed approach*

2.7. Değerlendirme kriterleri
2.7. Evaluation criteria

Bu çalışmada, kullanılan modellerin başarısını değerlendirmek için üç farklı değerlendirme kriteri kullanılmıştır: Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE), Korelasyon Katsayısı (r) ve Ortalama Sapma Hatası (MBE). RMSE, bir modelin tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar uzak olduğunu ölçen bir performans metriğidir ve hatanın büyüklüğü ile ilgili ortalama bir değer sunar. Bu metrik, özellikle tahminlerin ne kadar doğru olduğunu anlamak için yaygın olarak kullanılır. RMSE değeri ne kadar düşükse, toplam hata değeri o kadar küçük ve tahmin değerleri gerçek değerlere o kadar yakındır. Bu nedenle, RMSE değeri düşük olan bir model, daha iyi bir performans sergiliyor olarak değerlendirilir. RMSE'ye ait matematiksel formül denklem (5) de verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(yi - \hat{yi})^2} \tag{5}$$

Burada, n örneğin sayısını, yi gerçek değeri ve $\hat{yi}$ modelin tahmin ettiği değeri temsil etmektedir. Korelasyon Katsayısı, iki değişken arasındaki ilişkinin gücünü ve yönünü ölçen istatistiksel bir ölçüdür. Bu katsayı, genellikle Pearson Korelasyon Katsayısı olarak bilinir ve -1 ile 1 arasında bir değer alır. Pozitif bir korelasyon, bir değişkenin artışıyla diğer değişkenin de arttığını gösterirken, negatif bir korelasyon ise bir değişkenin artışıyla diğer değişkenin azaldığını gösterir. Korelasyon katsayısı 1'e yaklaşıyorsa, değişkenler arasında mükemmel bir pozitif ilişki olduğu anlaşılırken, -1'e yaklaşıyorsa, mükemmel bir negatif ilişki olduğu anlaşılır. Ancak, 0'a yaklaştıkça, değişkenler arasında bir ilişki olmadığına işaret eder. Korelasyon katsayısı, modelin tahminlerinin gerçek değerlerle ne kadar güçlü bir ilişkisi olduğunu yada tahmin değerlerinin gerçek değerler ile ne kadar uyumlu olduğunu belirlemek için kullanılır. Korelasyon katsayısı değeri denklem (6) ile hesaplanır.

$$r = \frac{\sum(xi - \bar{x})(yi - \bar{y})}{\sqrt{\sum(xi - \bar{x})^2 \sum(yi - \bar{y})^2}} \tag{6}$$

xi ve *yi*, sırasıyla iki değişkenin i. gözlemlerini, $\bar{x}$ ve $\bar{y}$ ise sırasıyla *x, y* değişkenlerinin ortalamalarını ifade etmektedir. MBE ise, bir tahminleme modelinin tahminlerinin gerçek değerlerden ortalama sapmasını ölçen bir hata ölçüsüdür. MBE hatanın büyüklüğünden ziyade, tahminlerin ne kadar sapma eğiliminde olduğunu gösterir ve pozitif veya negatif sapmaları dikkate alır. MBE, bir tahminleme modelinin sistemik sapma eğilimini değerlendirmek için kullanılır. MBE'nin sıfıra yakın olması daha dengeli (stabil) tahminler yapıldığını ifade eder. MBE değeri denklem (7) kullanılarak hesaplanır.

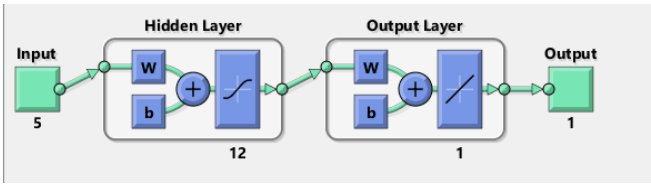
$$MBE = (1/n) * \sum(y - \hat{y}) \tag{7}$$

n örneklemin büyüklüğünü, y gerçek değerleri, $\hat{y}$ ise tahmin edilen değerleri temsil etmektedir.

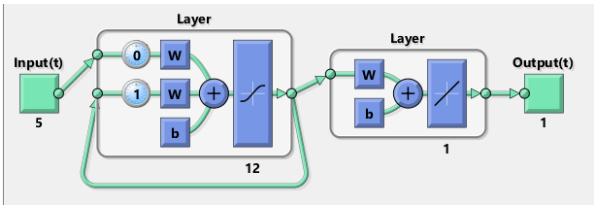
3. Deney sonuçları
3. experiment results

Bu çalışmada, Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen Van iline ait güneş ışınım verileri kullanılmıştır. 2013 yılına ait (01 Ocak 2013- 31 Aralık 2013) 8760 veri, eğitim amacıyla kullanılırken, 2014 yılına ait (01 Ocak 2014- 31 Aralık 2014) 8760 veri ise test için ayrılmıştır. Güneş ışınımı tahminleri için, doğrusal ve stokastik modellerden oluşan çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler arasında otoregresif (AR) model, ridge regresyon (RR), Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Elman Sinir Ağları (ENN) bulunmaktadır. Çalışmada, bu modellerin güneş ışınımı tahmini üzerindeki performanslarını değerlendirme, sonrasında ise bu performansları da dikkate alarak geliştirilen hibrit yöntemlerin performanslarını karşılaştırmak temel alınmıştır. Her bir model oluşturulurken sadece güneş ışınım değeri kullanılmıştır. 1-5 saat önceki ışınım değerleri (5 girdi) kullanılarak gelecek ışınım değeri tahmin edilmiştir.

Çalışmada yer alan tüm doğrusal ve stokastik tahminleme modelleri MATLAB programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda Otoregresif model ve Ridge regresyon için ilgili parametreler ayarlanırken YSA ve ENN için ise en uygun model parametreleri deneme/yanılma yoluyla ampirik olarak belirlenmiştir. YSA ve ENN için başarısı yüksek olan sonuçların, 1 gizli katmanlı 12 nöronlu yapıda olduğu gözlemlenmiştir. YSA ve ENN modellerine ilişkin prensip şemalar Şekil 7 ve Şekil 8 de sunulmuştur.



Şekil 7. YSA modelinin yapısı
Figure 7. *The structure of the ANN model*



Şekil 8. Elman sinir ağları modelinin yapısı
Figure 8. *Structure of the Elman neural network model*

İlk olarak eğitim verisi kullanılarak modeller eğitilmiş, sonrasında ise tahminler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar RMSE, korelasyon katsayısı ve MBE kriterleriyle değerlendirilmiştir. Oluşturulan modellere ait sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.

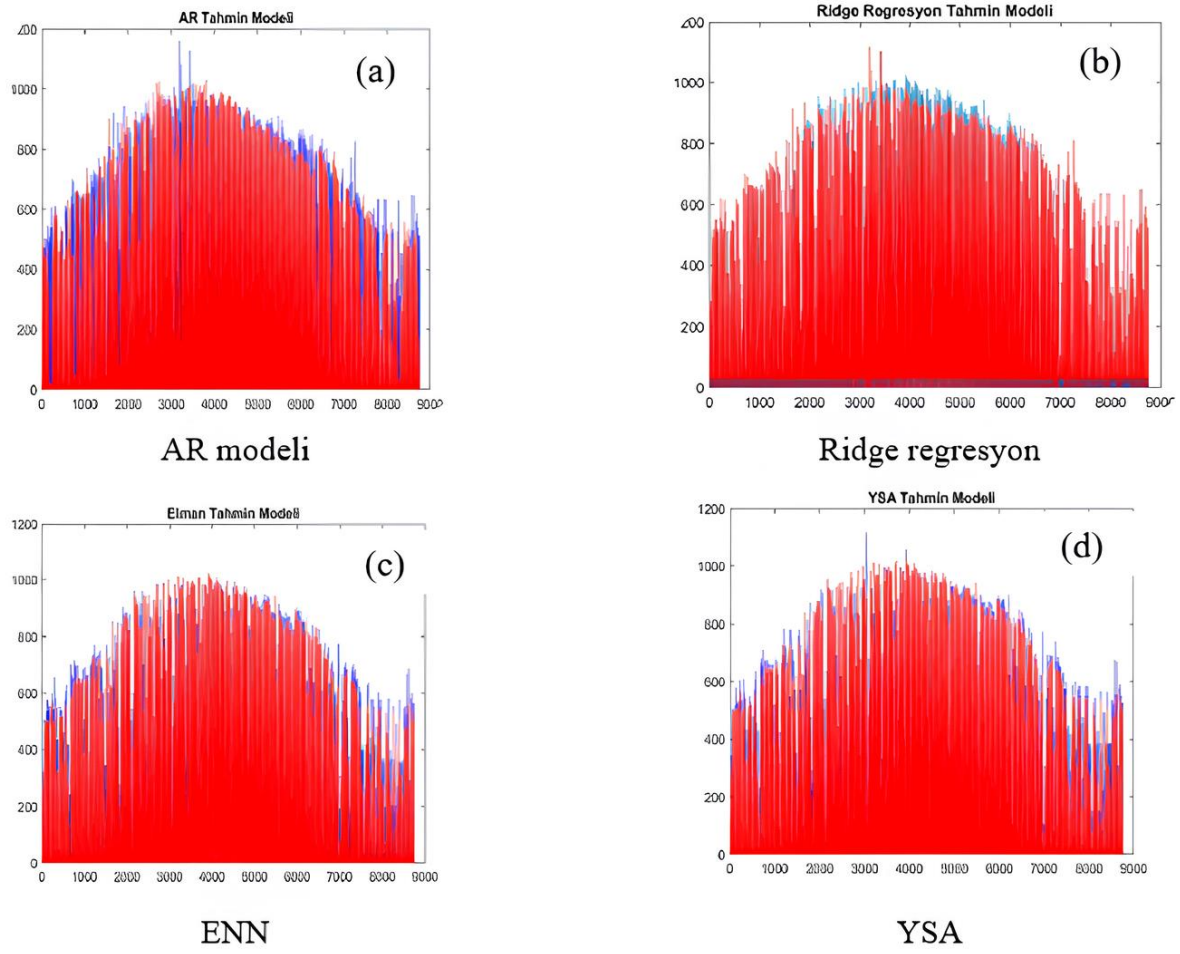
Tablo 1. Modellerin başarı oranları
Table 1. *Success rates of the models*

Model	RMSE	RMSE eğitim	Korelasyon	MBE
AR	79.14485	82.05	0.963401	-11.0083
Ridge Regresyon	76.66111	78.7	0.965059	5.3440
YSA	64.80544	60.04	0.974994	0.08203
ENN	64.30195	58.8	0.975416	1.1244

Her bir yöntem için tahmin edilen değerler ile gerçek değerleri gösteren grafikler Şekil 9'da görülmektedir. Şekilde mavi ile renklendirilen grafik ölçülen değerleri temsil ederken, kırmızı ile gösterilen grafik tahmin edilen değerleri temsil etmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, aralarında farklılıklar olmakla beraber, yöntemlerin tamamında ölçülen değerler ile tahmin edilen değerler arasında iyi bir örtüşme olduğu görülmektedir. Mavi rengin baskın olarak görüldüğü noktalarda tahmin edilen değerler, ölçülen değerlerin altında kalmıştır. Sadece kırmızı rengin görüldüğü kısımlarda ise ya tahmin değeri ölçülen değerden daha yüksek bir değerdedir ya da aralarında iyi bir uyum söz konusudur. Daha net bir değerlendirme için Tablo 1 incelendiğinde, kullanılan 4 farklı yöntem içerisinde en başarılı sonuçların ENN ile elde edildiği görülmektedir. Ayrıca beklendiği üzere stokastik modeller ile daha başarılı sonuçlar elde edilirken, regresyon yöntemleri ile nispeten başarısız tahminler yapıldığı anlaşılmaktadır. Korelasyon değerleri incelendiğinde, dört yöntemde de 0,96 üzerinde bir korelasyon değeri elde edildiği görülmektedir ve bu durum tahmin değerlerinin gerçek değerlerle korelasyonunun oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. MBE değerleri açısından bakıldığında ise ENN ve YSA'da sıfıra yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Bu durum gerçekleştirilen tahminlerin gerçek değerin üstünde ve altında olduğu durumların iyi bir denge içerisinde olduğuna işaret

etmektedir. Ridge regesyon için tahminlerin gerçek değerlerden genel olarak daha yüksek olduğu, AR için ise tahminlerin gerçek değerlerden genel olarak daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, kullanılan bireysel yöntemlerden 4 farklı strateji kullanılarak hibrit yöntemler oluşturulmuş ve bu yöntemlerin performansları karşılaştırılmıştır. İlk stratejide bireysel yöntemlerden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak tahmin değeri elde edilmiştir. Buradaki temel mantık Tablo 1 incelendiğinde daha iyi anlaşılabilir. Bireysel yöntemlerden elde edilen sonuçlar MBE kriteri üzerinden değerlendirildiğinde, yöntemlerin tahminlerinin genel olarak gerçek değerlerin altında yada üstünde olabildiği anlaşılmaktadır. Ortalama alınarak tahmin sonuçları bir denge noktasına taşınabilir ve bu daha başarılı bir tahmin performansı sağlayabilir. İkinci strateji de ise herbir yöntem eğitim aşamasındaki performansına bağlı olarak ağırlıklandırılarak yine bir ortalama değer hesaplanmış ve bu şekilde tahminler gerçekleştirilmiştir. Bu strateji aslında ilk stratejide açıkça görülebilecek bir zayıflığı da ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. İlk stratejide tüm yöntemlerden elde edilen tahminlerin ortalaması alınarak tahmin değeri belirlenir. Ancak Tablo 1'den açıkça görülmektedir ki, yöntemlerin başarıları birbirlerinden oldukça farklı olabilmektedir. Bu durumda ortalama almak belirgin şekilde başarılı olan yöntemden daha düşük başarıda bir tahmin sonucu elde etmeye sebep olabilir. Bu sebeple ikinci stratejide ortalama alınırken yöntemlerin eğitim aşamasındaki performasları dikkate alınarak ağırlıklandırılmışlardır. Bu kapsamda Tablo 1'den anlaşılacağı üzere en yüksek ağırlık ENN'e verilirken en düşük ağırlık AR'da olmuştur. Ağırlık değerleri eğitimdeki RMSE değerlerine uyumlu olarak belirlenmiştir. Üçüncü stratejide, mevsimler dikkate alınarak bir hibrit yöntem oluşturulmuştur. Bu yaklaşımda önce eğitim seti üzerinde mevsimsel olarak herbir bireysel yöntemin performansı incelenir ve tahmin aşamasında her mevsimde, o mevsimde en başarılı yönteminin çıktısı, hibrit yöntemin çıktısı olur. Tablo 2'de mevsimsel olarak çalışmada kullanılan yöntemlerin eğitim aşamasındaki performansları görülmektedir.



Şekil 9. Modellerin tahmin grafikleri. (a) AR tahmin modeli grafiği. (b) Ridge regresyon tahmin modeli grafiği. (c) Elman tahmin modeli grafiği. (d) YSA tahmin modeli grafiği.
Figure 9. *Prediction graphs of the models. (a) AR prediction model plot. (b) Ridge regression prediction model plot. (c) Elman prediction model plot. (d) ANN prediction model plot.*

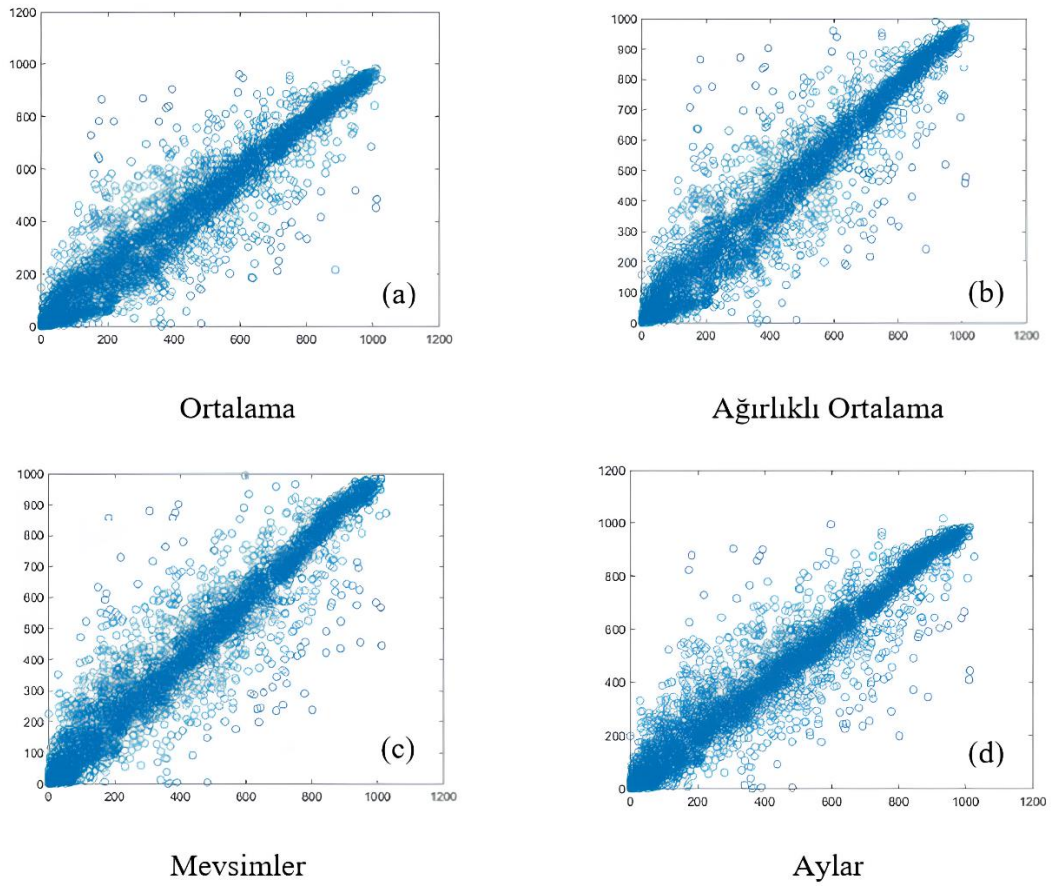
Tablo 2. Mevsimsel hibrit yöntem RMSE sonuçları
Table 2. *Seasonal hybrid method RMSE results*

Mevsimler	AR	Ridge	YSA	ENN
İlkbahar	108.69	103.53	83.3685	82.1712
Yaz	71.9207	67.5360	42.1261	39.9406
Sonbahar	74.9652	72.0625	53.9464	52.1362
Kış	65.0799	65.0097	52.5106	52.3476

Tablodan da görüldüğü gibi bütün mevsimlerde en başarılı yöntem ENN olmuştur. Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan veri seti için ENN ve hibrit yöntemin sonuçları aynı olacaktır. Ancak farklı yöntem ve veri setlerinde bu durumun değişebileceği unutulmamalıdır. Dördüncü stratejide ise aylar dikkate alınarak hibrit bir yöntem oluşturulmuştur. Bu kapsamda bireysel yöntemlerin aylık bazda performansları eğitim seti üzerinde incelenerek her bir ay için en başarılı yöntemler belirlenir. Modelin çıktısı ise, o ay için belirlenen yöntemin çıktısı olarak atanır. Tablo 3'te eğitim setinde bireysel yöntemlerin performansları sunulmuştur. Tablodan görüleceği gibi Ocak ve Mayıs aylarında en başarılı sonuçlar YSA ile elde edilirken diğer aylarda en başarılı yöntemin ENN olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda hibrit yöntemin çıktısında Ocak ve Mayıs ayları için YSA'dan, diğer aylar için ENN'den elde edilen tahmin çıktıları kullanılacaktır. AR ve Ridge regresyon ise hiçbir ayda en başarılı performansı elde edemedikleri için bu stratejide kullanılamamıştır.

Tablo 3. Mevsimsel hibrit yöntem RMSE sonuçları
Table 3. *Seasonal hybrid method RMSE results*

Aylar	AR	Ridge	YSA	ENN
Ocak	64.1254	64.1297	50.1653	51.2772
Şubat	80.1277	78.1512	63.0817	62.1438
Mart	86.8231	83.3796	67.3497	66.7724
Nisan	102.26	97.0089	77.4779	71.2895
Mayıs	131.80	125.40	101.32	103.19
Haziran	94.2612	89.6249	63.6680	60.9452
Temmuz	57.6717	53.2817	25.7597	23.1439
Ağustos	58.5352	54.0718	26.0800	24.5795
Eylül	78.8739	74.1987	52.9434	49.5977
Ekim	81.5111	78.0869	58.2792	58.0952
Kasım	62.9289	62.8161	50.1496	47.9340
Aralık	48.8296	51.3799	43.5070	42.8649



Şekil 10. Uygulanan stratejilere ait regresyon grafikleri. (a) Ortalama regresyon grafiği. (b) Ağırlıklı ortalama regresyon grafiği. (c) Mevsimler regresyon grafiği. (c) Aylar regresyon grafiği.
Figure 10. *Regression graphs of the applied strategies. (a) Average regression plot. (b) Weighted average regression plot. (c) Seasons regression plot. (c) Months regression plot.*

Şekil 10'da 4 farklı strateji ile elde edilen tahmin sonuçları ile gerçek değerlerin regresyonunu gösteren grafikler sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği üzere veriler genellikle diyagonal eksende yoğunlaşmış ve dar bir alanda toplanmıştır. Bu durum tahmin başarısını ortaya koymaktadır. Dört farklı strateji ile oluşturulan hibrit yöntemden elde edilen sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Farklı stratejilerle birleştirilen yöntemlere ait değerlendirme sonuçları
Table 4. *Evaluation results of the methods combined with different strategies*

Model	RMSE	Korelasyon	MBE
Ortalama	64.1209	0.9736	-1.0628
Ağırlıklı Ortalama	**63.4150**	0.9744	-0.7711
Mevsimler	64.3019	**0.9754**	1.1245
Aylar	64.3878	0.9753	**0.3808**

Tablo 4'ten görülebileceği gibi RMSE kriteri dikkate alındığında en başarılı sonuçlar ağırlıklı ortalamanın kullanıldığı stratejide elde edilmiştir. Bununla beraber dört farklı strateji ile oluşturulan hibrit yöntemin performanslarının birbirine oldukça yakın olduğu da anlaşılmaktadır. Özellikle yukarıda ifade edildiği gibi ağırlıklı ortalama stratejisi, ortalama stratejisini iyileştirmek için geliştirilmiş olup, elde edilen sonuç, amaca ulaşıldığını göstermektedir. Çizelge 1'de sunulan bireysel yöntemler ile başarılar karşılaştırıldığında, Ortalama ve Ağırlıklı ortalama stratejileri ile tüm bireysel yöntemlerden daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Mevsimlere göre oluşturulan stratejide ise daha öncede açıklandığı üzere, tüm mevsimlerde en başarılı sonuçlar ENN ile elde edildiği için, ENN ile aynı hata değeri elde edilmiştir. Aylara göre oluşturulan hibrit yaklaşımda ise ENN dışındaki tüm bireysel yöntemlerden daha başarılı bir performans sergilendiği

görülmektedir. Çalışmada, bir yıllık veri eğitim için kullanılırken, bir yıllık veri test için kullanılmıştır. Özellikle mevsim ve aylara göre hibrit yöntemin oluşturulduğu yaklaşımlarda, yıllara göre mevsimsel farklılıklar gözlenebildiği için bu durum tahmin başarısını olumsuz etkileyebilir. Daha uzun zamana yayılan eğitim verisi o mevsim yada aya ilişkin başarılı yöntemi seçmede daha tutarlı bir seçim yapmaya olanak sağlayacağına dikkat etmek gerekir. Korelasyon katsayısı kriteri dikkate alındığında ise dört strateji için de 0,97 üzerinde korelasyon katsayı değeri elde edildiği görülmektedir. Bu, tahmin edilen değerler ile ölçülen değerlerin uyumlu bir şekilde değişim gösterdiğine işaret eder. Aralarında çok küçük değişimler olmakla beraber en yüksek korelasyon değeri aylara göre oluşturulan hibrit strateji ile elde edilmiştir. MBE kriteri dikkate alındığında ise, dört farklı hibrit strateji ile de dengeli sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Dört farklı strateji ile de sıfıra oldukça yakın MBE değerleri elde edilmiştir. Bu, yapılan tahminlerin gerçek değerin üstünde ve altında olduğu durumların bir denge içerisinde olduğunu gösterir. Sıfıra en yakın MBE değerinin aylara göre oluşturulan hibrit stratejide elde edildiği görülmektedir. Ayrıca sunulan çalışmada kullanılan hibrit yöntemlerin başarısını ortaya koymak amacıyla elde edilen sonuçlar literatürde daha önce yayınlanmış hibrit yöntem kullanan çeşitli makalelerdeki sonuçlar ile Tablo 5'te karşılaştırılmıştır. Tablo 5'ten de görüleceği gibi çalışmada kullanılan hibrit yaklaşımlar önemli bir başarı seviyesine sahiptir.

Tablo 5. Diğer yapılan çalışmalarla yapılan karşılaştırma sonuçları
Table 5. *Comparison results with other studies*

Kaynak	**Kullanılan Yöntem**	**RMSE Değeri (%)**
Voyant vd., (2014)	MLP- ARMA	40.32
Sansa vd., (2021)	ARMA - NARX	18.63
Rangel – Heras vd., (2022)	NARX-CVM	18.15
Yapılan Bu Çalışma	**Ağırlıklı Ortalama**	**17.78**

4.Tartışma ve sonuçlar
4. Discussion and conclusions

Yapılan bu çalışmada, doğrusal ve stokastik modeller kullanılarak farklı stratejilerle hibrit yöntemler oluşturulup, bu yöntemlerin başarıları değerlendirilmiştir. Çalışmada, Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmış Van iline ait iki yıllık (2013-2014) güneş ışınım verileri kullanılmıştır. AR, ridge, YSA ve ENN yöntemleri referans alınmış, veriler ilk olarak bu yöntemler ile modellenerek, sonuçlar elde edilmiştir. Ardından veriler, mevsimlere ve aylara ayrılarak, ilgili mevsim yada ayda en başarılı yöntemler tespit edilimiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, ortalama ağırlıklı ortalama, aylara ve mevsimlere göre hibrit yöntem oluşturma stratejileri uygulanmıştır. Bireysel ve hibrit yöntemler incelendiğinde RMSE kriterine göre en başarılı sonuçların 63,4150 değeri ile ağırlıklı ortalama stratejisinden elde edildiği görülmektedir. Ortalama stratejisi kullanılarak elde edilen sonuçlar da, tüm bireysel yöntemlerden daha yüksek bir performansı işaret etmektedir. Mevsimlere göre oluşurulan hibrit stratejide elde edilen hata değeri, her mevsimde ENN'in yüksek performans vermesi sebebi ile, ENN yönteminden elde edilen hata ile aynı orandadır. Aylara göre oluşturulan hibrit yaklaşımda ise ENN dışındaki tüm bireysel yöntemlerden daha başarılı bir performans elde edilmiştir. Bununla beraber korelasyon ve MBE kriterleri dikkate alındığında tüm hibrit yöntem oluşturma stratejisi ile daha dengeli tahmin sonuçları elde edildiği görülmektedir. Tüm bu hususlar dikkate alındığında, elde edilen sonuçlar, hibrit oluşturma stratejilerinin kullanılması ile daha başarılı yaklaşımlar elde edilebileceğini gösterir niteliktedir. Sunulan çalışmada değerlendirilen hibrit yöntemlerde kullanılan bireysel yöntemlerin tamamı aynı amaç (aynı değeri tahmin etmek) için kullanılmaktadır. Bütün bireysel yöntemler aynı değeri tahmin etmeye çalışırken, hibrit yöntem ya bunların ortalaması üzerinden bir tahmin değeri üretir ya da yöntemlerden birinin sonucunu seçer. Dolayısıyla performans değerlendirmesi yapılan hibrit yöntemler bu kapsam ile sınırlandırılmıştır. Çalışmanın bundan sonraki aşamasında ilgili hibrit yöntemlerin başarısını artıracak stratejiler geliştirilmeye çalışılacaktır.

Teşekkür
Acknowledgement

Bu çalışmada kullanılan verilerin Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanmış olması nedeniyle kendilerine teşekkürlerimizi sunarız.

Yazar katkısı
Author contribution
Bu çalışmanın bölümlerine tüm yazarlar tarafından katkı sağlanmıştır.

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Alkan, Ö., Öztürk, A., & Tosun, S. (2018). Rüzgâr ve güneş santrallerinde kısa dönem enerji üretim tahmini için matematiksel modellerin oluşturulması. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 6(1),* 188-195. https://doi.org/10.29130/dubited.359698

Akarslan, E., & Hocaoglu, F. O. (2017). A novel method based on similarity for hourly solar irradiance forecasting. *Renewable Energy*, *112*, 337–346. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.058

Akarslan, E., Hocaoğlu, F. O., & Edizkan, R. (2014). A novel M-D (multi-dimensional) linear prediction filter approach for hourly solar radiation forecasting. *Energy*, *73*, 978–986. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.113

Akarslan, E., & Hocaoglu, F. O. (2016). A novel adaptive approach for hourly solar radiation forecasting. *Renewable Energy*, *87*, 628–633. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.063

Al-Shamisi, M. H., Assi, A. H., & Hejase, H. A. N. (2013). Artificial neural networks for predicting global solar radiation in al ain city-UAE. *International Journal of Green Energy*, *10*(5), 443–456. https://doi.org/10.1080/15435075.2011.641187

Arseven, B., & Çınar, S. M. (2023). Dünya dışı ışınımlarla iyileştirilmiş ARIMA, ridge regresyon ve lasso regresyon yöntemlerinin saatlik ışınım tahmininde kullanılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 12*(3), 733-742. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1249503

Başaran Filik, Ü., & Filik, T. (2017). Kısa-Dönem Rüzgâr Hızının Tahmininde Otoregresif ve Yapay SinirAğları Tabanlı Yeni Bir Hibrit Yaklaşım. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 7(2),* 419-427.

Belmahdi, B., Louzazni, M., Marzband, M., & El Bouardi, A. (2023). Global Solar Radiation Forecasting Based on Hybrid Model with Combinations of Meteorological Parameters: Morocco Case Study. *Forecasting*, *5*(1), 172–195. https://doi.org/10.3390/forecast5010009

Benmouiza, K., Cheknane, A. %J E. C., & Management. (2013). Forecasting hourly global solar radiation using hybrid k-means and nonlinear autoregressive neural network models. *Energy Conversion and Management 75*, 561–569. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.003

Büyükuysal, M. C. (2010). *Ridge regresyon analizi ve bir uygulama.* [Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Sağlık bilimleri Enstitüsü]

Cho, M., Chang, J., & Huang, C. (2020). Application of parallel Elman neural network to hourly area solar PV plant generation estimation. *International Transactions on Electrical Energy Systems, 30*(8), e12470. https://doi.org/10.1002/2050-7038.12470

Çevik, S., Çakmak, R., & Altaş, İ. H. (2017, September). A day ahead hourly solar radiation forecasting by artificial neural networks: *A case study for Trabzon province. In 2017 international artificial intelligence and data processing symposium (IDAP)* (pp. 1-6).

Demirgül, T., Demir, V., & Sevimli, M. F. (2024). Farklı makine öğrenmesi yaklaşımları ile Türkiye'nin solar radyasyon tahmini. *Geomatik, 9(1),* 106-122. https://doi.org/10.29128/geomatik.1374383

Deniz, E., & Kemal, A. bilimi ve tekniği dergisi. (2007). Güneş Işınım Şiddeti Tahminlerinde Yapay Sinir Ağları Ve Regresyon Analiz Yöntemleri Kullanımının İncelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi 27*(2), 15–20.

El-Amarty, N., Marzouq, M., El Fadili, H., Bennani, S. D., & Ruano, A. (2023). A comprehensive review of solar irradiation estimation and forecasting using artificial neural networks: data, models and trends. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(3), 5407–5439. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24240-w

Ehmeind Maham, F., & Akarslan, E. (2022). Güneş Işınım Tahmini için Farklı Güneşlenme Durumlarından Faydalanan Hibrit Bir Yöntem Tasarımı. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(3), 588-596. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1074290

Gabralı, D., & Aslan, Z. (2020). Güneş Enerjisi Potansiyelinin Çoklu Lineer Regresyon ve Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture, 4(1),* 23-36.

Gairaa, K., Khellaf, A., Messlem, Y., & Chellali, F. (2016). Estimation of the daily global solar radiation based on Box–Jenkins and ANN models: A combined approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57*, 238–249. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.111

Guher, A. B., Tasdemir, S., & Yaniktepe, B. (2020). Effective Estimation of Hourly Global Solar Radiation Using Machine Learning Algorithms. *International Journal of Photoenergy, 2020,* 8843620. https://doi.org/10.1155/2020/8843620

Gutierrez-Corea, F.V., Manso Callejo, M. A., Moreno Regidor, M. P., & Manrique Sancho, M.T. (2016). Forecasting short term solar irradiance based on artificial neural networks and data from neighboring meteorological stations. *Solar Energy, 134*, 119–131. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.020

Gök, A. O., Yıldız, C., & Şekkeli, M. (2019). Yapay sinir ağları kullanarak kısa dönem güneş enerjisi santrali üretim tahmini: Kahramanmaraş örnek çalışması. *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi, 1(2),* 186-195.

Hocaoglu, F. O., & Serttas, F. (2017). A novel hybrid (Mycielski-Markov) model for hourly solar radiation forecasting. *Renewable Energy, 108*, 635–643. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.058

Jallal, M. A., Chabaa, S., Yassini, A. E., Zeroual, A., Ibnyaich, S., & Raoufi, M. (2019). Elman Neural Network for Solar Radiation Components Forecasting based on the Desired Tilt Angle. *2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/IRSEC48032.2019.9078281

Ji, W., & Chee, K. C. (2011). Prediction of hourly solar radiation using a novel hybrid model of ARMA and TDNN. *Solar Energy, 85*(5), 808–817. https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.01.013

Mukaram, M.Z., & Yusof, F. (2017). Solar radiation forecast using hybrid SARIMA and ANN model. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences, 13*, 346-350.

Rangel-Heras, E., Angeles-Camacho, C., Cadenas-Calderón, E., & Campos-Amezcua, R. (2022). Short-term forecasting of energy production for a photovoltaic system using a NARX-CVM hybrid model. *Energies, 15*(8), 2842. https://doi.org/10.3390/en15082842

Sansa, I., Boussaada, Z., & Bellaaj, N. M. (2021). Solar radiation prediction using a novel hybrid model of ARMA and NARX. *Energies, 14*(21), 6920. https://doi.org/10.3390/en14216920

Thaker, J., & Höller, R. (2022). A comparative study of time series forecasting of solar energy based on irradiance classification. *Energies, 15*(8), 2837. https://doi.org/10.3390/en15082837

Vecan, D., (2011). *Measurement and Comparison of Solar Radiation Estimation Models for İzmir/Turkey: İzmir Institute of Technology Case* [Master Thesis, Izmir Institute of Technology].

Yalçın, S., & Herdem, M. S. (2022). Prediction and Analysis of Weather Parameters with Global Horizontal Solar Irradiance Using LSTM-CNN Based Deep Learning Technique. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *9*(1), 340–356. https://doi.org/10.35193/bseufbd.1037563

Zhen-Yu, H., & Lian-Wen, J. (2008). Activity recognition from acceleration data using AR model representation and SVM. *2008 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, *4*, 2245–2250. https://doi.org/10.1109/ICMLC.2008.4620779

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 93-104 doi: 10.17714/gumusfenbil.1509643 Research Article

Determination of optimum tilt angle for solar panels: case study for Eastern Anatolia Region of Turkey

Güneş panelleri için optimum eğim açısının belirlenmesi: Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi örneği

Rahim Aytug OZER*[1], Merve DEMIRCI[2]

[1]*Erzurum Technical University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Aerospace Engineering, 25050, Erzurum*
[2]*Kafkas University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, 36100, Kars*

• Received: 03.07.2024 • Accepted: 17.01.2025

Abstract

The increase in energy demand has led to an increase in the tendency towards alternative sources to fossil fuels. Solar energy stands out as an alternative energy source. This study was conducted to increase the energy production efficiency in solar energy system investments to be made in the Eastern Anatolia region. For this purpose, Erzurum, Kars, Iğdır, Ağrı and Muş provinces were taken into consideration. The effects of monthly, seasonal, six month and annual changes in panel tilt angle on panel performance were investigated. When determining the monthly optimum tilt angle, PVGIS and HW methods were first used. For other cases, the PVGIS method was used. As a result of the calculations, it was seen that the maximum angle difference between the PVGIS method and the HW method was seen in the summer months and its maximum value was 13.45° in June in Ağrı province. The minimum angle difference was calculated as 0.01° for September in Kars province. In addition, compared to the tilt angle being 0°, an increase of 17.16%, 16.32%, 16.03% and 12.26% in energy production was achieved when the optimum tilt angle was changed monthly, seasonally, six month and annually, respectively. As a result of this study, it was determined that maximum energy production was achieved by changing the panel angle monthly, and it was concluded that the most efficient angle change period in solar panel installation is monthly.

Keywords: Energy production, PV system, Renewable Enegy, Solar irradiation, Tilt angle

Öz

Enerji talebindeki artış beraberinde fosil yakıtlara alternatif olabilecek kaynaklara yönelimin artmasına neden olmuştur. Güneş enerjisi, alternatif enerji kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, Doğu Anadolu bölgesinde yapılacak güneş enerjisi sistem yatırımlarında enerji üretim verimini artırmak amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla Erzurum, Kars, Iğdır, Ağrı ve Muş illeri değerlendirmeye alınmıştır. Panel tilt açısının aylık, mevsimlik, altı aylık ve yıllık değişimlerinin panel performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Aylık optimum tilt açısını belirlerken ilk olarak PVGIS ve HW metodu kullanılmıştır. Diğer durumlar için ise PVGIS metodu kullanılmıştır. Hesaplamalar sonucunda, PVGIS metodu ile HW metodu arasındaki maksimum açı farkının yaz aylarında görüldüğü ve maksimum değerini Haziran ayında 13.45º olarak Ağrı ilinde aldığı görülmüştür. Minimum açı farkı ise, Kars ilinde 0.01º olarak Eylül ayı için hesaplanmıştır. Ayrıca, eğim açısının 0º olması durumuna göre, optimum tilt açısının aylık, mevsimlik, altı aylık ve yıllık değiştirilmesi durumlarında enerji üretiminde sırasıyla 17.16%, 16.32%, 16.03% ve 12.26% artış elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, panel açısının aylık olarak değiştirilmesi ile maksimum enerji üretimi sağlandığı belirlenmiş, güneş paneli kurulumunda en verimli açı değişim periyodunun aylık olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: *Eğim açısı, Enerji üretimi, Güneş ışınımı, PV system, Yenilenebilir enerji*

*Rahim Aytug OZER, aytugozerr@gmail.com

1. Introduction

The increase in world population and technological advancements are leading to a gradual rise in energy consumption. In response to the increasing energy need, the limited availability of fossil energy resources on a global scale has increased the tendency towards renewable energy resources (Öztürk et al., 2023; Karagözoğlu & Duranay, 2023). In addition, the human and environmental friendliness of renewable energy sources compared to fossil-based energy sources provides versatile benefits in meeting energy needs and designing a healthy and clean environment. In this respect, renewable energy sources are an effective and efficient solution to achieve sustainable development.

In Solar photovoltaic (PV) systems, the energy source is solar irradiation. The amount of electrical energy produced on the surface of a PV system varies directly with the amount of solar irradiation. Therefore, the most important factors affecting the efficiency of PV systems are tilt angle and orientation. Due to the movement of the earth within the solar system, the sun's rays hit the earth at a constantly changing angle. Therefore, it is very important to determine the optimum tilt angle of PV panels with the horizontal in order to obtain maximum benefit from solar irradiation (Bakirci, 2012). For this reason, it is necessary to determine the monthly average amount of solar irradiation falling on the panel in different orientations.

In the literature, monthly averages of daily solar irradiation falling on horizontal and inclined surfaces are available for some locations. In the study by Attia et al. (2024), an experimental investigation was conducted on an energy plant consisting of two PV panels in Baghdad province, examining different tilt angles for the months of June, July, August, and November. According to the results obtained, they stated that system efficiency can be increased by 10% to 12% by changing the panel tilt angle. Lu and Qin (2024) conducted a tilt angle optimization study to obtain the maximum hourly solar irradiation gain for PV systems to be installed in China. Tilt angle values were determined to reach maximum total solar irradiation in different periods by applying long-term ERA5 hourly surface solar irradiation data and optimization procedure. They emphasized that at the optimized tilt angle, there will be an increase of 1.11 TWh/year in China's PV energy production in 2018.

Al-Sayyab et al. (2019) numerically and experimentally investigated the effect of the optimum tilt angle on the power produced from the PV panel for the city of Basra in Iraq. The optimum tilt angle was determined as 28^o, with the inclination angle varying between 0^o and 90^o. In another study, Jacobson and Jadhav (2018) conducted a comprehensive study in which they estimated the optimum tilt angle in all countries around the world with the help of the program they developed at the National Renewable Energy Laboratory. As a result of the study, they derived the optimum tilt angle as a function of the latitude angle.

According to the data prepared by the Ministry of Energy and Natural Resources of the Republic of Turkey (Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakalnlığı, 2024), it is possible to say that the Solar Energy potential of our country is quite high, especially in the central and Anatolian regions. In order to evaluate this energy potential accurately and effectively, various studies have been carried out investigating the optimum tilt angle of PV panels. In the study conducted by Dal (2021) in Kayseri province in 2021, the optimum tilt angle was determined using the Photovoltaic Geographic Information System (PVGIS) and the Hottel & Woertz (HW) method and compared the prediction ability of both approaches. According to the results of the research, it is emphasized that by changing the tilt angle of the PV panel monthly, seasonally and six month, an increase in efficiency of approximately 2.99% to 4.11% can be achieved compared to positioning it with an annual tilt angle of 29.5^o. In another study conducted by Bakirci (2012), a correlation was derived to estimate the optimum tilt angle across Turkey with calculations made specifically for eight major cities in Turkey. In the study conducted by Çağlar (2018) the optimum tilt angle for Istanbul, Ankara, Erzurum and Adana provinces was calculated and compared theoretically and with the Hottel & Woertz (HW) method. It was stated that the average difference between the tilt angles calculated by two methods during the year for all cities participating in the calculation was 12.64%. Koçer et al. (2016) is emphasized that the efficiency of PV panel usage can be increased by changing the tilt angle at least twice a year or once a month for Ankara province and its districts. In the optimization study conducted for Şanlıurfa province, Yıldırım and Aktacir (2018) concluded that power efficiency can be increased by 11.5% if PV panels are placed at the optimum tilt angle compared to horizontal placement.

As can be seen from the literature summary, the determination of the optimum tilt angle involves either adaptation to the whole of Turkey based on regional (several different provinces) calculations or evaluations made on a city basis. Eastern Anatolia region, whose solar energy potential is above Türkiye's average, is one of the priority regions. However, while there are various studies in the literature for the central and southeastern regions of Turkey, there is no comprehensive study specifically for the Eastern Anatolia region. Within the scope of this study, the optimum panel tilt angle for Erzurum, Iğdır, Kars, Muş and Ardahan provinces in the Eastern Anatolia region was determined by calculating with PVGIS and Hottel & Woertz (HW) method. Thus, it is aimed to provide a comprehensive data set to the literature that will guide the design and optimization during the solar power plant installation phase. For this purpose, it can be used as a guiding guide in the aim of utilizing solar energy processes more effectively and efficiently.

2. Material and method

2.1. Selection of province

According to the data presented by the Ministry of Energy and Natural Resources, Turkey's average annual total radiation value is calculated as 1527.46 kWh/m^2 (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Monthly average global radiation distribution is given on a provincial basis in the Turkey Solar Energy Atlas (GEPA) and is presented in Figure 6. According to the GEPA map, many cities in Turkey's central Anatolia, eastern and southeastern Anatolia regions receive radiation above the average annual total radiation value. In addition, as of June 2022, installed power based on solar energy constitutes 8.35% of the total installed power (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Therefore, the expansion of solar power plant investments in cities in these regions will make a significant contribution to national development by allowing a rapid increase in the share of installed power based on solar energy.

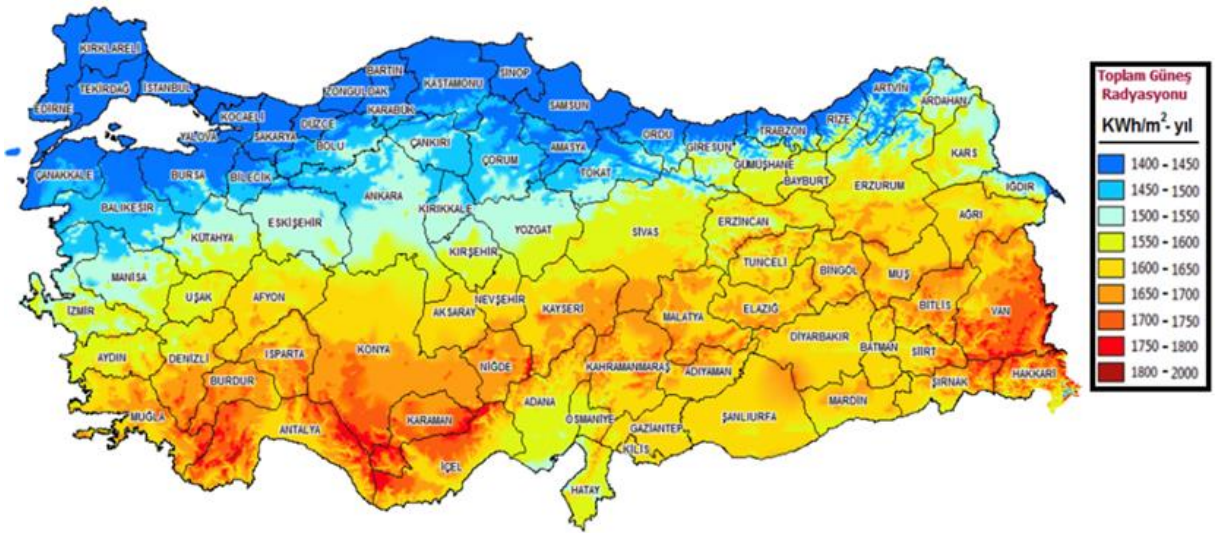


Figure 1. Average global irradiation distribution of Turkey (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

The cities included in the study were selected from regions with high energy potential, as the annual average total irradiation value is above the Turkish average. In this context, the cities of Erzurum, Iğdır, Ağrı, Kars and Muş are cities with high potential for solar energy investments and were deemed appropriate to be evaluated within the scope of this study.

2.2. Calculation metodology

PVGIS method is a simulation program developed by the European Commission using satellite interactive meteorological data. With this program, which is available to users free of charge, optimum solar radiation values can be simulated in daily, monthly and annual periods, depending on geographical location and panel angle (EU, 2024).

In the PVGIS module, Power P [W] is calculated by equation 1 as a function of solar irradiance and panel temperature (EU, 2024; Huld et al., 2011). Here, G_T', represents the normalized total solar irradiation value,

k_{1-6} represents the constants measured and determined by the European Solar Testing Installation (ESTI) dependhing on the PV panel type, and T' represents the panel temperature in degrees Celsius.

$$P(G_T', T') = G_T'(P_{SCT}, m + k_1 \ln(G_T') + k_2 \ln(G_T')^2 + k_3 T' + k_4 T' (\ln(G_T') + k_5 T' \ln(G_T')^2 + k_6 T'^2) \quad (1)$$

The normalized total solar irradiation value is calculated with the help of equation 2. In this equation, G_T represents the total irradiation value reaching the inclined surface and G_{SCT} represents the maximum irradiation value in standard test conditions, and $G_{SCT} = 1000$ [W/m^2]. In the PVGIS interface, panel temperature (T'), is calculated by the difference between the module temperature T_{mod} and the panel temperature $T_{SCT} = 25$ [^{o}C] under SCT conditions (equation 3).

$$G_T' \equiv G_T / G_{SCT} \quad (2)$$

$$T' \equiv T_{mod} / T_{SCT} \quad (3)$$

Depending on the normalized total solar irradiation value G_T' and the panel temperature T', the panel efficiency η_{rel} is calculated with the help of Equation 4. In this equation, $P_{STC,m}$ is the equivalent of the maximum power value in Watts under standard test conditions (STC) (EU, 2024; Huld et al., 2011).

$$\eta_{rel}(G_T', T') \equiv P(G_T', T') / P_{SCT}, m G_T' \quad (4)$$

When calculating monthly energy production in the PVGIS simulation program, parameters such as PV technology, installed peak PV power, tilt angle (β_s [°]), azimut açısı (γ_s [°]) and system loss are taken as variable parameters.

In this study, for the locations of Erzurum (39.904', 41.262'), Iğdır (39.9518', 43.3836'), Ağrı (39.5292', 43.3836'), Kars (40.312', 43.249') and Muş (39.5999', 41.3503'), It was made with the assumption that the system loss is 14%, the installed peak power is 1kW, the azimuth angle (γ_s=0°) is zero and the system uses Crystalline Silicon PV type panel. For each location, the tilt angle was changed by 1^o and the total energy production and total irradiation values corresponding to the optimum tilt angle in the 0-90 tilt range were calculated.

With this method, when determining the optimum tilt angle, the angle at which global solar irradiation is maximum is taken as basis. Figure 2 shows the monthly tilt angle-solar irradiation (H) graph of Erzurum province. It can be seen in the monthly curves in Figure 2 that solar irradiation increases up to a certain angle value and then decreases. The solar irradiation value for December reached its maximum level of 74.9kWh/m^2 at 61° and 62°. Since the maximum value occurs at two angle values, the optimum tilt angle (OTA) was determined by taking the average of these two angle values.

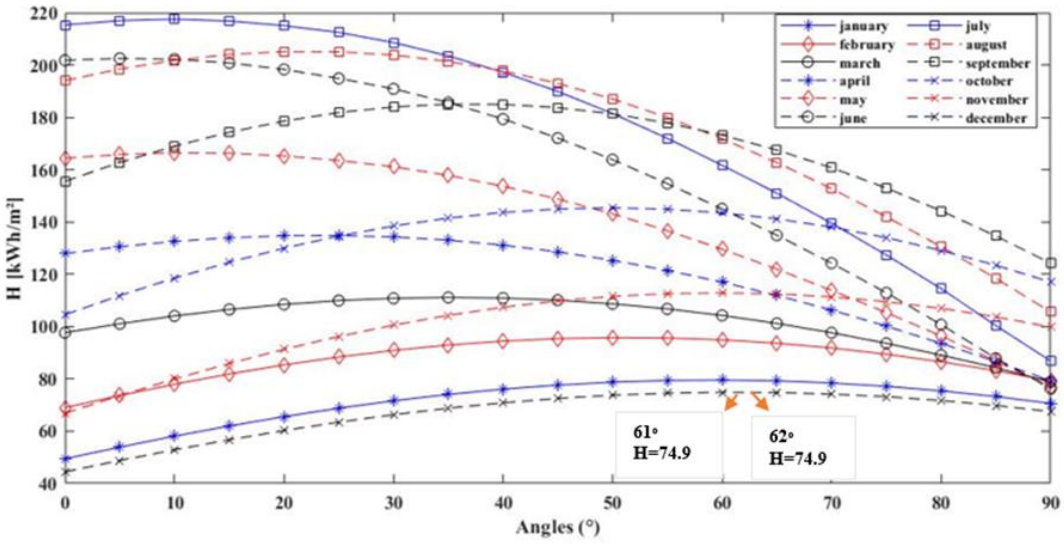


Figure 2. Tilt angle versus Global solar irradiation variation for Erzurum.

The HW method is widely used to determine the tilt angle when installing a solar power plant, as it is practical (Dal, 2021). In this method, the panel tilt angle (β) is calculated by taking the difference of the location latitude (φ [°]) where the panel will be placed and the declination angle (δ [°]) (equation 5). This method is used for ideal conditions assuming a cloudless sky with no obstacles or reflectors in the environment (Stanciu & Stanciu, 2014).

$$\beta = \varphi - \delta \quad (5)$$

Declination angle is defined as the angle that the sun rays make with the equator plane during the rotation of the earth around itself and the sun, and is calculated with the help of equation 6 (Cooper, 1969).

$$\delta = 23.45 sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (6)$$

Here, n represents the number of days to be calculated and indicates the day of the calculation from the beginning of the year. For each city evaluated within the scope of the study, monthly, seasonal, six month and annual optimum slope angles were calculated and the methods were compared. In addition, in the PVGIS method, energy production and global solar irradiation values were compared for monthly, seasonal, six month and annual situations with the tilt angle being 0°.

3. Results and discussion

The changes in monthly optimum tilt angles for the cities of the Eastern Anatolia region, Erzurum, Iğdır, Ağrı, Kars and Muş, which were evaluated within the scope of the study, are presented in Figure 2. As can be seen, in all cities, the difference between the optimum tilt angle values obtained by the HW method and the PVGIS method started to increase in March, reached its maximum value in June, and then started to decrease as of September. The maximum tilt angle difference between the methods was calculated as 11.16° in May for Erzurum, and 9.88°, 11.45°, 9.24° and 8.53° in June for Iğdır, Ağrı, Kars and Muş, respectively. The minimum tilt angle difference between the methods was calculated as 0.57° in September for Erzurum, 0.44° in October for Iğdır, 1.2° in September for Ağrı, 0.01° in September for Kars and 0.56° in November for Muş.

In the HW method, considering that the environmental conditions are ideal and the tilt angle is calculated simply and quickly, the results obtained are less sensitive and are mostly used in preliminary analysis. In the HW method, the monthly optimum tilt angle is determined based only on latitude and declination angle, while in the PVGIS method, the solar irradiation value is calculated according to the total irradiation value coming to the inclined surface, the maximum irradiation value under standard test conditions, panel tilt angle and panel temperature. Maximum energy production (E_{max}) was determined for all angle values between 0°-90°, depending on the solar irradiation (H) and the calculated solar irradiation value. In Table 1, OTA values of the HW and PVGIS method and E_{max} and H values at the optimum tilt angle obtained from the PVGIS method are given for 5 cities. The difference between the OTA values obtained with the HW method and PVGIS is low in winter months, but high in summer months. This is due to the fact that environmental conditions such as solar radiation and air temperature are taken into account in the PVGIS method, while the analyses are performed under ideal conditions in the HW method. In addition, the PVGIS method allows the calculation of the maximum energy that can be produced from the panel with the instantaneous solar radiation data of the region being analyzed for the optimum tilt angle. Therefore, the optimum tilt angle for energy production corresponding to the same day of the year in the calculation made in the PVGIS method differs from the HW method. A similar situation is seen in the study conducted by Dal (2021) for the province of Kayseri.

After determining the monthly optimum tilt angle, seasonal optimum tilt angles were determined for 5 cities with the PVGIS method. Table 2 presents the optimum tilt angles, solar irradiation and maximum energy production values for 5 provinces. Seasonal optimum tilt angles for 5 cities vary between 51°-57° in winter, 21°-22° in spring, 10°-13° in summer and 43°-47° in autumn. The optimum tilt angles obtained decrease to a minimum in summer and reach maximum values in winter. Accordingly, maximum energy production reaches maximum values in summer and is at minimum values in winter.

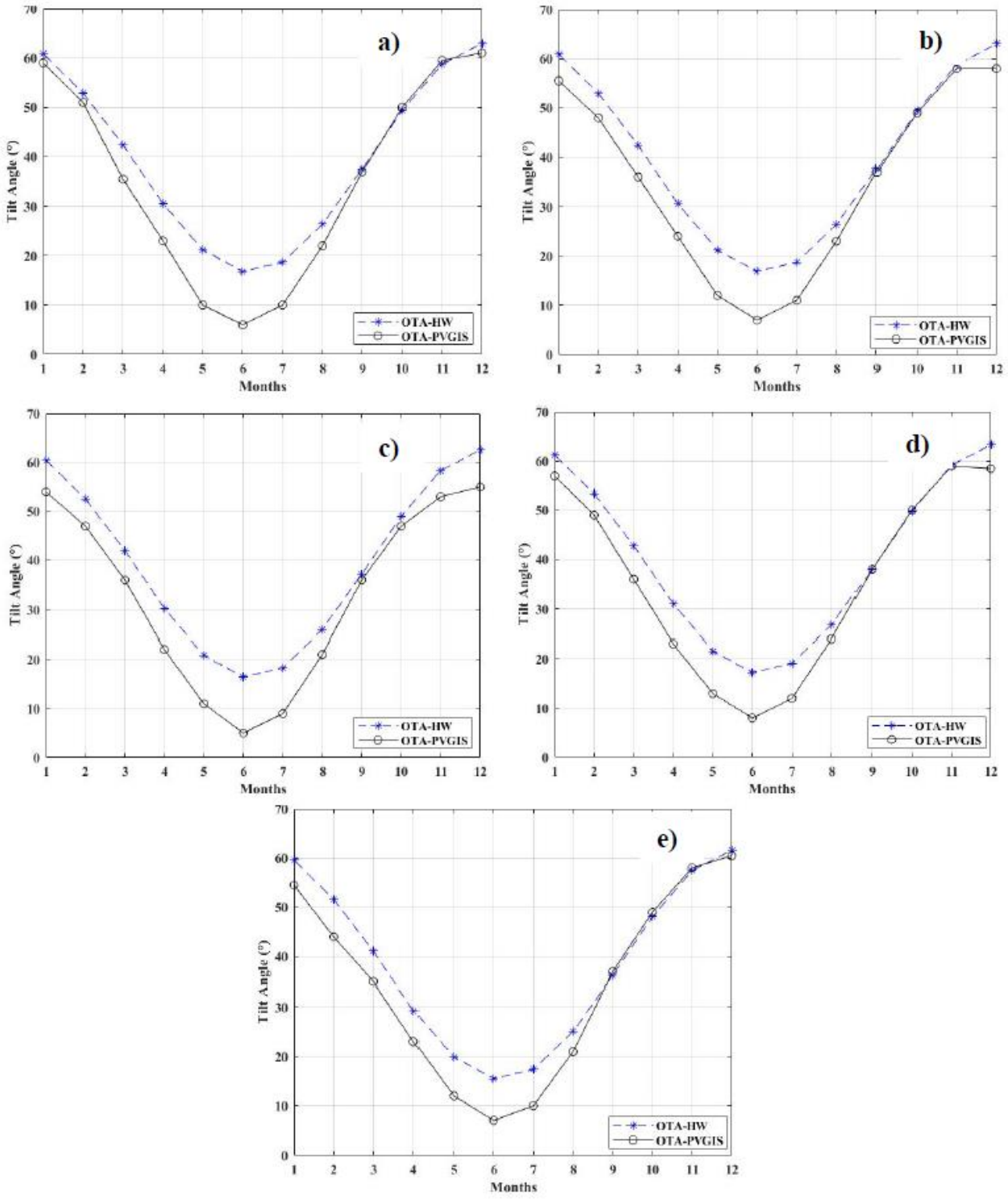


Figure 2. Monthly optimum tilt angle variaties for PVGIS and HW methods; (a) Erzurum, (b) Iğdır, (c) Ağrı, (d) Kars, (e) Muş.

Table 1. Montly optimum tilt angle for PVGIS and HW methods, maximum energy production and global solar irradiation.

		Erzurum	Iğdır	Ağrı	Kars	Muş
January	HW-OTA (°)	60.85	60.89	60.47	61.26	59.55
	PVGIS-OTA (°)	59	55.5	54	57	54.5
	E_{max} (kWh)	70.48	60.05	59.42	65.66	55.81
	H (kWh/m^2)	79.56	69.04	67.5	74.37	64.42
February	HW-OTA (°)	52.92	52.96	52.54	53.32	51.61
	PVGIS-OTA (°)	51	48	47	49	44
	E_{max} (kWh)	83.69	69.44	71.57	75.31	58.99
	H (kWh/m^2)	95.82	81.49	82.49	87.32	69.57
March	HW-OTA (°)	42.39	42.44	42.02	42.80	41.09
	PVGIS-OTA (°)	35.5	36	36	36	35
	E_{max} (kWh)	93.47	91.89	97.03	98.26	90.4
	H (kWh/m^2)	111.16	110.38	113.09	117.78	109.53
April	HW-OTA (°)	30.56	30.61	30.19	30.97	29.26
	PVGIS-OTA (°)	23	24	22	23	23
	E_{max} (kWh)	109.97	110.98	105.38	109.53	113.75
	H (kWh/m^2)	134.89	138.2	127.85	137.04	142.62
May	HW-OTA (°)	21.16	21.21	20.79	21.57	19.86
	PVGIS-OTA (°)	10	12	11	13	12
	E_{max} (kWh)	131.28	135.47	133.66	137.96	147.2
	H (kWh/m^2)	166.45	171.88	165.12	176.25	189.19
June	HW-OTA (°)	16.83	16.88	16.46	17.24	15.53
	PVGIS-OTA (°)	6	7	5	8	7
	E_{max} (kWh)	152.51	154.74	151.99	160.92	176.95
	H (kWh/m^2)	202.57	202.87	195.29	212.36	237.19
July	HW-OTA (°)	18.68	18.73	18.30	19.09	17.37
	PVGIS-OTA (°)	10	11	9	12	10
	E_{max} (kWh)	161.59	162.54	156.74	167.42	183.68
	H (kWh/m^2)	217.52	214.19	204.44	222.41	251.7
August	HW-OTA (°)	26.36	26.41	25.99	26.77	25.06
	PVGIS-OTA (°)	22	23	21	24	21
	E_{max} (kWh)	153.85	156.56	145.69	161.92	175.36
	H (kWh/m^2)	205.28	204.35	188.44	212.28	235.77
September	HW-OTA (°)	37.57	37.62	37.20	37.98	36.27
	PVGIS-OTA (°)	37	37	36	38	37
	E_{max} (kWh)	141.84	142.7	136.26	145.69	156.8
	H (kWh/m^2)	185.14	183.99	172.81	187.6	204.93
October	HW-OTA (°)	49.39	49.44	49.02	49.80	48.09
	PVGIS-OTA (°)	50	49	47	50	49
	E_{max} (kWh)	115.97	115.13	103.57	117.19	124.65
	H (kWh/m^2)	145.37	143.87	127.41	146.13	157.34
November	HW-OTA (°)	58.74	58.79	58.37	59.15	57.44
	PVGIS-OTA (°)	59.5	58	53	59	58
	E_{max} (kWh)	94.26	86.68	69.62	89.4	101.95
	H (kWh/m^2)	112.9	104.24	82.69	106.72	123.2
December	HW-OTA (°)	62.93	62.98	62.55	63.34	61.63
	PVGIS-OTA (°)	61.5	58	55	58.5	60.5
	E_{max} (kWh)	64.78	55.25	50.97	55.83	70.68
	H (kWh/m^2)	74.9	65.37	60.09	65.8	83.79

Table 2. Seasonal optimal tilt angle, maksimum energy production and global solar irradiation values for 5 provinces.

	Winter			Spring			Summer			Autumn		
	OTA	**E_{max}**	**H**	**OTA**	**E_{max}**	**H**	**OTA**	**E_{max}**	**H**	**OTA**	**E_{max}**	**H**
Erzurum	57	218.46	249.68	22	331.37	408.67	11	465.54	621.87	47	348.46	438.75
Iğdır	54	184.32	215.39	22	335.04	416.59	12	471.61	618.39	46	341.64	428.3
Ağrı	51	181.76	209.77	21	332.39	401.8	10	452.37	585.35	43	307.69	380.59
Kars	54	196.41	226.97	22	342.52	427.29	13	487.91	643.78	47	349.18	436.44
Muş	54	184.45	216.53	21	348.08	437.49	11	533.74	721.22	46	379.67	480.49

For the 5 selected cities, the optimum tilt angle for six-month periods was obtained with the PVGIS method. The optimum tilt angle, maximum energy production and maximum global solar irradiation values of these cities are presented in Table 3. The optimum tilt angle for the autumn-winter period varies between 46°-51°, while in the spring-summer period it is between 15°-16°. While the maximum global solar irradiation value of 695.9 kWh/m^2 was observed in Muş during the Autumn-Winter period, the minimum irradiation value was observed in Ağrı with 589.31 kWh/m^2. The maximum energy production was obtained in Erzurum with 565.57 kWh in the Autumn-Winter period, and the minimum energy production was obtained in Ağrı with 488.71 kWh. While the optimum tilt angle decreased in the Spring-Summer period, the global solar irradiation value increased for all cities and, accordingly, the maximum energy production increased. In the spring-summer period, the maximum solar irradiation value was obtained in Muş with 1156 kWh/m^2, and the minimum irradiation value was obtained in Ağrı with 984.75 kWh/m^2. The maximum energy production was observed in Muş with 879.84 kWh in the spring-summer period, and the minimum energy production was observed in Ağrı with 782.28 kWh.

Table 3. Optimal tilt angle, maksimum energy production and global solar irradiation values for six month periods

	Autumn-Winter			Spring-Summer		
	OTA (°)	**E_{max} (kWh)**	**H (kWh/m^2)**	**OTA (°)**	**E_{max} (kWh)**	**H (kWh/m^2)**
Erzurum	51	565.57	686.6	15	794.82	1028.52
Iğdır	49	525.31	642.75	16	804.73	1033.05
Ağrı	46	488.71	589.31	15	782.28	984.75
Kars	49	544.81	662.37	16	828.66	1069.19
Muş	49	563.37	695.9	15	879.84	1156.92

In Table 4, annual optimum tilt angle, global solar irradiation and maximum energy production values of 5 cities obtained with PVGIS are presented. The optimum slope angle for the 5 selected provinces varies between 28°-32° annually. The annual maximum global solar irradiation was observed in Muş with 1798.67 kWh/m^2 at an inclination angle of 29°. The minimum solar irradiation was observed in Ağrı with 1536.48 kWh/m^2 at an inclination angle of 28°. While the maximum energy production was 1398.94 kWh in Muş, which has the maximum annual solar irradiation, the minimum annual energy production was observed as 1240.14 kWh in Ağrı, which has the minimum solar irradiation.

Table 4. Optimal tilt angle, maksimum energy production and global solar irradiation values for annual.

	Annual		
	OTA (°)	**E_{max} (kWh)**	**H (kWh/m^2)**
Erzurum	32	1316.24	1661.74
Iğdır	30	1293.94	1631.21
Ağrı	28	1240.14	1536.48
Kars	32	1334.95	1684.35
Muş	29	1398.94	1798.67

The monthly, seasonal, semi-annual and annual variation range of optimum tilt angle, total solar irradiation and total produced energy amounts for the 5 selected cities are presented in Table 5. Additionally, total global solar irradiation and total energy production data for the case when the tilt angle of the panel is 0° are included in Table 5. When Table 5 is examined, it is observed that the lowest solar irradiation for all cities occurs when the panel is placed parallel to the ground and does not have any slope, with the angle of inclination being 0°. Additionally, it has been observed that when the inclination angle is 0°, minimum energy production occurs compared to other situations. In the process of changing the panel angle periodically, it was observed that the total global solar irradiation value for the 5 selected cities was maximum when the tilt angle was changed monthly compared to other situations. Accordingly, it was observed that the total energy production was maximum.

Table 5. Total solar irradiation and total energy production of selected cities

		Tilt angle= 0°	Monthly	Seasonally	Six month	Annual
Erzurum	**Σ E_{max} (kWh)**	1172.45	1373.7	1363.83	1360.39	1316.24
	ΣH (kWh/m^2)	1491.09	1731.52	1718.97	1715.12	1661.74
Iğdır	**Σ E_{max} (kWh)**	1168.25	1341.44	1332.61	1330.04	1293.94
	ΣH (kWh/m^2)	1477.2	1689.84	1678.67	1675.8	1631.21
Ağrı	**Σ E_{max} (kWh)**	1139.91	1282.07	1274.21	1270.99	1240.14
	H (kWh/m^2)	1415.26	1587.02	1577.51	1574.06	1536.48
Kars	**Σ E_{max} (kWh)**	1197.71	1385.08	1376.02	1373.47	1334.95
	H (kWh/m^2)	1518.03	1746.06	1734.48	1731.56	1684.35
Muş	**Σ E_{max} (kWh)**	1268.86	1456.12	1445.94	1443.21	1398.94
	H (kWh/m^2)	1635.02	1869.25	1855.73	1852.82	1798.67

When the solar panel is placed parallel to the surface and the tilt angle is 0°, compared to other situations (monthly, seasonal, six month and annual) where the tilt angle of the panel is changed, it is observed that total irradiation and total energy production increase in cases where the tilt angle is changed. In Figure 3, the increase in total solar irradiation obtained by changing the tilt angle in monthly, seasonal, six month and annual periods for the selected cities compared to the situation where the tilt angle is 0° is presented as a percentage. While the maximum increase of 17.16% was obtained in Erzurum when the monthly angle change was made, an increase of 14.82% was achieved in Iğdır, 12.47% in Ağrı, 15.64% in Kars and 14.76% in Muş.

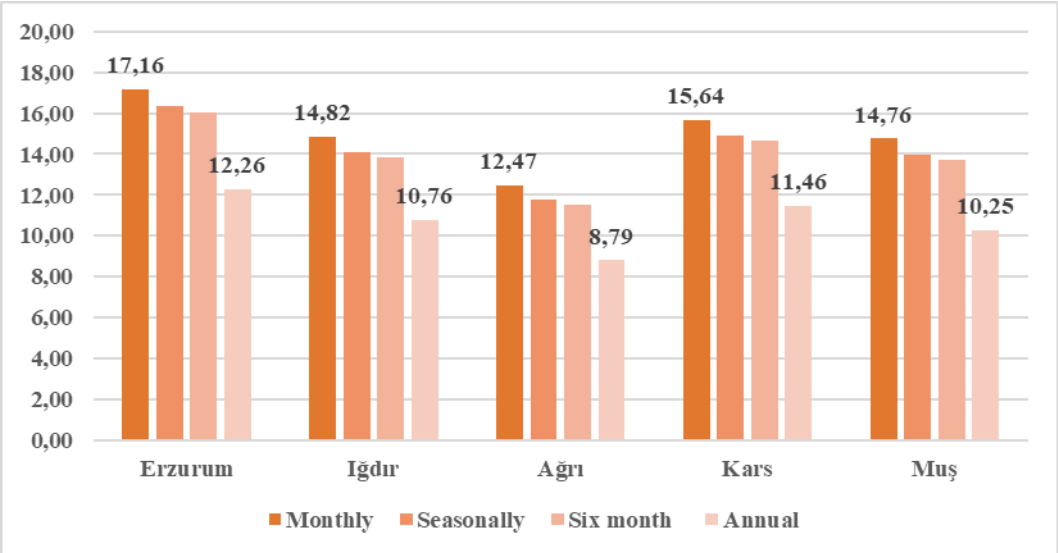


Figure 3. Percentage increase of global solar irradiation compared to tilt angle = 0° for selected cities

In Figure 4, the change in total energy production obtained by changing the tilt angle in monthly, seasonal, six month and annual periods for the selected cities compared to the situation where the tilt angle is 0° is presented as a percentage. While the maximum increase of 16.12% was obtained in Erzurum when the monthly angle change was made, an increase of 14.39% was obtained in Iğdır, 12.14% in Ağrı, 15.02% in Kars and 14.33% in Muş.

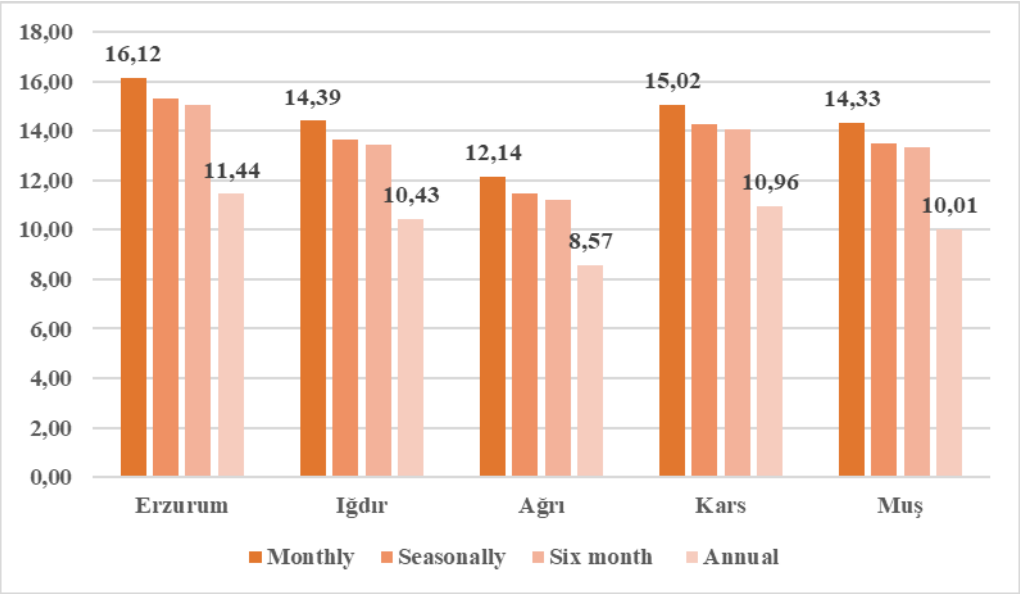


Figure 4. Percentage increase of energy production compared to tilt angle = 0° for selected cities

4. Conclusions

In this study, optimum tilt angle values were calculated to ensure maximum benefit from solar energy in 5 provinces selected from the Eastern Anatolia Region, whose solar energy potential is above the Turkey average. First, optimum tilt angles were compared using Hottel-Woertz and PVGIS methods for calculation. Then, if the optimum tilt angle was changed at monthly, seasonal, semi-annual and annual periods, the energy production efficiency was compared both with the tilt angle being 0° and changing it at the specified periods. The results obtained as a result of the study are listed below.

The monthly optimum tilt angle was determined by the HW method and the PVGIS method, and it was observed in the results obtained that the difference between the two methods increased in the summer months and decreased in the winter months. The fact that the HW method calculates only according to the declination angle and latitude shows that it is appropriate to use it in case of preliminary work for panel installation, as this method accepts the environmental conditions as ideal (cloudless weather, absence of hills, absence of any reflectors, etc.). In the PVGIS method, higher accuracy results can be produced since solar irradiation and energy production can be calculated in detail according to different angle values of the selected location.

With the PVGIS method, when the optimum tilt angle was changed in monthly, seasonal, six month and annual periods, the maximum global solar irradiation and maximum energy production were obtained when the angle was changed in monthly periods. When the tilt angle is determined annually, total energy production increased by 12.26% in Erzurum, 10.76% in Iğdır, 8.79% in Ağrı, 11.46% in Kars and 10.25% in Muş compared to the case when the tilt angle was 0°. In the case where the tilt angle is determined in six-month periods, total energy production increased by 16.03% in Erzurum, 13.85% in Iğdır, 11.50% in Ağrı, 14.67% in Kars and 13.74% in Muş, compared to the tilt angle 0°. In the case where the tilt angle is determined by seasonal periods, total energy production increased by 16.32% in Erzurum, 14.07% in Iğdır, 11.78% in Ağrı, 14.89% in Kars and 13.96% in Muş, compared to the case when the tilt angle was 0°. In the case where the tilt angle is determined in monthly periods, total energy production increased by 17.16% in Erzurum, 14.82% in Iğdır, 12.47% in Ağrı, 15.64% in Kars and 14.76% in Muş compared to the tilt angle 0° situation. The maximum increase was obtained when the tilt angle was changed monthly.

As a result of this study, it was determined that maximum energy production was achieved by changing the panel angle monthly, and it was concluded that the most efficient angle change period in solar panel installation is monthly. However, since performing this process will increase the labor cost, it is recommended to change the angle in seasonal or six month periods.

Acknowledgment

The authors sincerely thank the editor and anonymous reviewers for their contributions during the review and evaluation of the manuscript

Author contribution

Rahim Aytug Ozer and Merve Demirci contributed equally to the data collection, literature research, analysis and writing of the research.

Declaration of ethical code

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

Al-Sayyab, A. K. S., Al Tmari, Z. Y., & Taher, M. K. (2019). Theoretical and experimental investigation of photovoltaic cell performance, with optimum tilted angle: Basra city case study. *Case Studies in Thermal Engineering*, *14*, 100421. https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2019.100421

Attia, O. H., Mousa, N. A., Mahmood, H. A., & Adam, N. M. (2024). Experimental evaluation the effect of tilt angle on solar panel performance in Baghdad. *In AIP Conference Proceedings*, *3002*(1). https://doi.org/10.1063/5.0205993

Bakirci, K. (2012). General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(8), 6149-6159. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.07.009

Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy*, *12*(3), 333-346. https://doi.org/10.1016/0038-092X(69)90047-4

Çağlar, A. (2018). Farklı derece-gün bölgelerindeki şehirler için optimum eğim açısının belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *22*(2), 849-854. https://doi.org/10.19113/SDUFBED.94899

Dal, A. R. (2021). Güneş enerji panellerindeki optimum eğim açısının verime etkisinin incelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *8*(1), 241-250. https://doi.org/10.35193/BSEUFBD.878795

Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı: Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı. (2024, July 1) https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes

European Commission (EU): Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). (2024, June 20). https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en

Huld, T., Friesen, G., Skoczek, A., Kenny, R. P., Sample, T., Field, M., & Dunlop, E. D. (2011). A power-rating model for crystalline silicon PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *95*(12), 3359-3369. https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2011.07.026

Jacobson, M. Z., & Jadhav, V. (2018). World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. *Solar energy*, *169*, 55-66. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.04.030

Karagözoğlu, L., & Duranay, Z. B. (2023). Yapay sinir ağları kullanılarak fotovoltaik sistemin maksimum güç noktası takibi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *13*(3), 733-749. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1217821

Koçer, A., Şevik, S., & Güngör, A. (2016). Ankara ve ilçeleri için güneş kolektörü optimum eğim açisinin belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *21*(1), 63-78. https://doi.org/10.17482/UUJFE.80088

Lu, N., & Qin, J. (2024). Optimization of tilt angle for PV in China with long-term hourly surface solar radiation. *Renewable Energy*, 120741. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2024.120741

Öztürk, Ö., Akyazı, Ö., & Çavdar, B. (2023). Fotovoltaik sistemlerde gri kurt optimizasyon (gko) algoritması ve artımlı iletkenlik (ai) yönteminin maksimumum güç noktası takibi (mgnt) için karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *13*(4), 962-978. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1220816

Stanciu, C., & Stanciu, D. (2014). Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World–A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models. *Energy Conversion and Management*, *81*, 133-143. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.02.016

Yıldırım, E., & Aktacir, M. A. (2018). Binaya entegre fotovoltaik sistemlerde azimut ve eğim açısı etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *34*(2), 609-620. https://doi.org/10.17341/GAZIMMFD.416413

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 105-121 doi: 10.17714/gumusfenbil.1568959 Research Article

Investigation of buckling behavior of carbon nanotube reinforced nanobeams according to nonlocal elasticity and elastic foundation effects

Karbon nanotüp takviyeli nanokirişlerin burkulma davranışının yerel olmayan elastisite ve elastik zemin etkileriyle incelenmesi

Uğur KAFKAS*[1], Gökhan GÜÇLÜ[2]

[1]*Kütahya Dumlupınar University, Vocational School of Technical Science, Department of Construction Technology, 43100, Kütahya*
[2]*Kütahya Dumlupınar University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, 43100, Kütahya*

• Received: 17.10.2024 • Accepted: 17.01.2025

Abstract

In this study, the buckling behavior of carbon nanotube (CNT) reinforced nanobeams on an elastic foundation is investigated using the nonlocal elasticity theory and nonlocal finite element method within the framework of Euler-Bernoulli beam theory. The effects of CNT volume fraction, nonlocal parameter, elastic foundation parameter and length-to-thickness ratio on the critical buckling load are analyzed. CNT reinforced nanobeam is modeled considering short and long CNT reinforcements, and mechanical properties are determined by the rule of mixtures. To determine the critical buckling loads of CNT reinforced nanobeams, stiffness matrices and force vectors, including nonlocal effects, are derived based on the Euler-Bernoulli beam theory and analyses are carried out accordingly. The results show that increasing the CNT volume fraction significantly increases the critical buckling load, suggesting that CNTs play an essential role in strengthening the nanobeams. On the other hand, the nonlocal parameter negatively affects the critical buckling load and decreases the buckling strength of the nanobeam. However, the effect of the nonlocal parameter on the buckling strength is negligible. The elastic foundation parameter positively affects the critical buckling load and increases the buckling resistance. This finding indicates that the elastic foundation plays an important role in improving the structural stability of the nanobeams. The length-to-thickness ratio is another important parameter, indicating that long and thin nanobeams are more prone to buckling and the critical buckling load decreases with increasing this ratio. Since the effects of the above-mentioned four parameters on the buckling strength were determined using the finite element method, the results obtained will guide the subsequent numerical modeling studies of nano-sized beams.

Keywords: Carbon nanotube (CNT) reinforced nanobeams, Critical buckling load, Elastic foundation parameter, Finite element method, Nonlocal elasticity theory

Öz

Bu çalışmada, elastik bir zemin üzerinde yer alan karbon nanotüp (KNT) takviyeli nanokirişlerin burkulma davranışı, Euler-Bernoulli kiriş teorisi çerçevesinde yerel olmayan elastisite teorisi ve yerel olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. KNT hacim oranı, yerel olmayan parametre, elastik zemin parametresi ve uzunluk/kesit kalınlığı oranı gibi parametrelerin kritik burkulma yükü üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Kısa ve uzun KNT takviyeleri dikkate alınarak KNT takviyeli nanokiriş modellenmiş ve mekanik özellikler karışım kuramı kullanılarak belirlenmiştir. KNT takviyeli nanokirişlerin kritik burkulma yüklerinin belirlenebilmesi amacıyla, Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayalı olarak yerel olmayan etkileri de içeren rijitlik matrisleri ve kuvvet vektörleri türetilmiş ve analizler bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, KNT hacim oranının artmasının kritik burkulma yükünü önemli ölçüde artırdığını göstermektedir, bu da KNT'lerin nanokirişleri güçlendirmede önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Diğer yandan, yerel olmayan parametre kritik burkulma yükünü olumsuz etkilemekte ve nanokirişin burkulma dayanımını azaltmaktadır. Ancak yerel olmayan parametrenin burkulma dayanımına olan etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Elastik zemin parametresi ise kritik burkulma yükünü pozitif yönde etkilemekte olup, burkulma direncini artırmaktadır. Bu bulgu, elastik zeminin nanokirişlerin yapısal stabilitesini geliştirmede önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Uzunluk/kesit kalınlığı oranı da bir diğer önemli parametre olup, uzun ve ince nanokirişlerin burkulmaya daha yatkın olduğunu ve bu oranın artmasıyla birlikte kritik burkulma yükünün azaldığını göstermektedir. Yukarıda belirtilen dört parametrenin burkulma dayanımına olan etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlendiği için bundan sonraki nano boyutlu kirişlerin sayısal olarak modellenmesi çalışmalarında elde edilen sonuçlar yol gösterici olacaktır.

Anahtar kelimeler: *Karbon nanotüp (KNT) takviyeli nanokirişler, Kritik burkulma yükü, Elastik zemin parametresi, Sonlu elemanlar yöntemi, Yerel olmayan elastisite teorisi*

*Uğur KAFKAS; ugur.kafkas@dpu.edu.tr

1. Introduction

Carbon nanotube (CNT) reinforced nanobeams have become an important research topic in nanotechnology and advanced materials science. The extraordinary mechanical properties of these nanomaterials are of great interest, especially in terms of key parameters that determine the durability of structures, such as critical buckling loads (Arshid et al., 2021). The high strength-to-weight ratio of carbon nanotubes makes them ideal reinforcement materials for composite structures (Suhr et al., 2005; Namilae & Chandra, 2006). With CNT reinforcement, nanoscale structures can exhibit significantly improved mechanical performance and lighter structures can be designed with higher load-carrying capacity (Pouresmaeeli & Fazelzadeh, 2017; Lal & Markad, 2019). CNT reinforced nanomaterials also play an essential role in energy storage devices. They are used primarily in lithium-ion batteries and supercapacitors to increase energy density and ensure durability in charge/discharge cycles (Baughman et al., 2002). In addition, CNT reinforced materials are used in sensor technology, especially in chemical and biological sensing systems; high sensitivity and fast response times are among the most essential advantages of these materials (Balasubramanian & Burghard, 2005). CNT reinforced nanobeams have been used in various industries due to their high strength, lightweight, and excellent mechanical properties. In particular, they are used in the aerospace and automotive sectors to produce more durable and lightweight composite materials (Esawi & El Borady, 2008). They are also used as microactuators and microresonators with low stiffness and high vibration frequencies in nano-electromechanical systems (NEMS) and micro-mechanical systems (MEMS) (Ashrafi et al., 2006). However, a complete understanding of the mechanical behavior of nanostructures still presents several challenges, especially in terms of prediction and control of unstable behavior such as buckling (Wang et al., 2007; Motevalli et al., 2012). Understanding the buckling behavior of nano-sized beams plays a critical role in predicting the performance of materials at nanoscales. In this context, buckling analyses of CNT reinforced nanobeams go beyond classical beam theories and include phenomena occurring at the nano level, such as quantum effects and size effects (Wattanasakulpong & Ungbhakorn, 2013). However, the exact modeling of buckling behavior in such beams is quite complex due to the heterogeneous structure of the material and the anisotropic properties of CNTs (Thang, 2019). In addition, such structures are usually located on an elastic medium such as soil, which can significantly affect the buckling behavior of the structures (Pradhan & Reddy, 2011; Yaylı, 2017). This study investigates the buckling behavior of CNT reinforced nanobeams resting on a Winkler-type elastic foundation.

The Winkler-type elastic foundation model is a common technique that models soil effects with a simplified approach. In this model, the soil is represented as independent springs placed under each unit area and the stiffness coefficient of these springs depends on the properties of the foundation. Winkler-type elastic foundations consider the soil-beam interaction, which is an important parameter affecting the buckling behavior of structures (Pradhan & Reddy, 2011). It is thought that the buckling analysis of CNT reinforced nanobeams on an elastic soil will produce important results that will allow the determination of the necessary design parameters to optimize the safety and performance of structures (Thang, 2019). Considering the anisotropic properties of soil and CNTs together allows the design parameters of these structures to be determined more accurately (Setoodeh et al., 2015).

Classical beam theories are generally valid for micro- and macro-scale structures and insufficient for analyzing nanoscale structures. More precise modeling of mechanical behaviors occurring in nanobeams requires advanced approaches such as nonlocal elasticity theory (Yaylı, 2019). Nonlocal elasticity theory reflects materials' stress and deformation behaviors at the nanoscale more realistically by considering long-range interactions between material points (Taghizadeh et al., 2016). In this context, nonlocal elasticity theory offers a more comprehensive approach than classical elasticity theories and plays an essential role in buckling analysis on nanoscale structures (Phadikar & Pradhan, 2010). Non-classical elasticity theories are not limited to nonlocal elasticity theory. There are many other theories. Some of them are: couple stress theory (Toupin, 1962), micropolar theory (Eringen, 1967), modified couple stress theory (Yang et al., 2002), modified strain gradient theory (Lam et al., 2003), nonlocal strain gradient theory (Lim et al., 2015), second strain gradient theory (Mindlin, 1965), strain gradient theory (Aifantis, 1999), surface elasticity theory (Gurtin et al., 1998).

The finite element method is widely used for the numerical solution of complex engineering problems. This method is based on a piecewise approach to simulate the mechanics of structures and predicts the behavior of the entire structure based on the solution of each element (Taghizadeh et al., 2016). The method has been extensively employed in macro- to micro- and nano-scales analyses. Numerous scholarly works document its

application to both static and dynamic examinations of beam structures—encompassing bending, buckling, and vibration—across these dimensional ranges. The finite element method is widely used in macro-scale for bending (Uhm & Youn, 2009; Kahya & Turan, 2017; Reddy et al., 2020; Song et al., 2022; Chi Tho et al., 2023), vibration (Dai & Liu, 2007; Turan & Kahya, 2018; Pham et al., 2022; Bentrar et al., 2023; Turan & Hacıoğlu, 2023; Zhu et al., 2024) and buckling (Casafont et al., 2009; Feng et al., 2015; Turan & Kahya, 2021; Turan & Hacıoğlu, 2022; Yaylacı et al., 2023; Mesbah et al., 2023) problems. At the micro/nanoscale, the finite element method has been widely employed to investigate both static and dynamic responses in nano-scale beam-type elements, including static bending (Demir et al., 2018; Uzun & Yaylı, 2022; Kafkas, 2024), vibration (Eltaher et al., 2013; Uzun et al., 2018; Civalek & Numanoğlu, 2020; Civalek et al., 2020a; Karamanli & Vo, 2022; Uzun et al., 2020; Uzun et al., 2021) and buckling (Tuna & Kirca, 2017; Aria & Friswell, 2019; Belarbi et al., 2021), within the framework of diverse theoretical models. The finite element method for the analysis of nanobeams is a powerful tool to account for the heterogeneous structure of materials, dimensional effects, and the effects of elastic foundation (Civalek et al., 2020b). By integrating the theory of nonlocal elasticity into the finite element method, many problems that cannot be solved analytically can be solved numerically. However, it can be stated that the classical analysis results are a special case of this formulation; therefore, the nonlocal theory offers a more general formulation. In addition, investigating the effects of nonlocal parameters and CNT reinforcement ratios is very important regarding material design and optimization (Wu & Yu, 2019).

The nonlocal finite element method used in this study allows the determination of nanobeam buckling loads using the numerical solution method. The main objective of this study is to investigate the buckling behavior of CNT reinforced nanobeams on an elastic foundation and to determine the critical buckling loads. The effects of various parameters such as CNT reinforcement type, CNT volume fraction, Winkler-type elastic foundation parameter and nonlocal parameter on buckling loads are investigated in the study. While CNT reinforcement improves the mechanical performance of nanobeams, the effect of nonlocal parameters is essential in modeling the size effects on nanoscale structures. Moreover, the elastic foundation parameter affects the buckling behavior by considering the interactions with the soil beneath the beam. Each of these parameters is a critical factor to consider in the design and analysis of nanostructures. In the reviewed part of the literature, no study examined the effect of the specified parameters on the buckling strength of CNT reinforced nanobeams. In this study, since it was determined to what extent the parameters examined affect the buckling strength, the results obtained are expected to guide the stability analysis of nanobeams. In addition, the results obtained by taking the elastic foundation parameter as zero can also be used for nanobeams that do not rest on elastic foundations.

2. Material and method

2.1. Determination of material properties of CNT reinforced nanobeams

In this study, determining material properties and predicting mechanical properties such as modulus of elasticity and shear modulus, necessary to understand the buckling behavior of CNT reinforced nanobeams, are based on the rule of mixtures and various scale-dependent parameters. Depending on the lengths and volume ratios of carbon nanotubes, the elastic properties of the materials change significantly.

Figure 1 shows the schematic representation of a short (10,10) and long (10,10) single-walled carbon nanotube (SWCNT) reinforced simply supported nanobeam resting on a Winkler-type elastic foundation. Here, the numbers (10,10) represent the projections of the vectors in the atomic arrangement in the schematic structure of the carbon nanotube in a specific direction. The cross-section of the nanobeam with the beam axis as the x-axis is also shown. The length of the beam is denoted by L, compressive axial force by N and the cross-sectional dimensions are denoted by b and h.

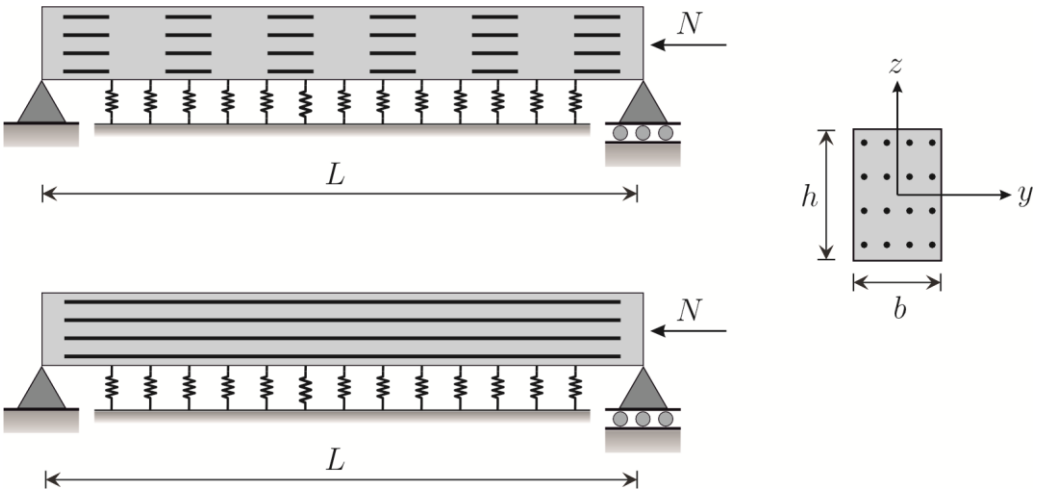


Figure 1. Short and long SWCNT reinforced nanobeam

The formulas used in this study are based on the assumption that CNT reinforced composites exhibit isotropic behavior. Based on the rule of mixture, the longitudinal elastic modulus of CNT reinforced composites can be calculated with the following formula (Shen, 2009):

$$E_{11} = \zeta_1 V_{CNT} E_{11}^{CNT} + V_m E^m \tag{1}$$

Here, E_{11} represents the longitudinal elastic modulus of CNT reinforced nanomaterial, ζ_1 is the carbon nanotube efficiency parameter, while V_{CNT} and V_m represent the volume fractions of carbon nanotube and matrix, respectively. E_{11}^{CNT} is the longitudinal elastic modulus of carbon nanotube and E^m represents the elastic modulus of isotropic matrix material.

At the same time, the transverse elastic modulus of CNT reinforced nanobeam is calculated as follows (Fattahi & Safaei, 2017):

$$E_{22} = \frac{\zeta_2}{\left(\frac{V_{CNT}}{E_{22}^{CNT}} + \frac{V_m}{E^m}\right)} \tag{2}$$

Here E_{22} and E_{22}^{CNT} represent the transverse elastic modulus of CNT reinforced nanobeam and the transverse elastic modulus of carbon nanotube, respectively. The volume fractions are related by the equation $V_{CNT} + V_m = 1$. The ζ_2 used in the formula is the carbon nanotube efficiency parameter reflecting scale-dependent material properties. These parameters were obtained by Fattahi and Safaei (2017) using molecular dynamics simulation corresponding to both short (10,10) and long (10,10) SWCNT composites embedded with amorphous polyethylene matrix, and these data are also used in this study. The relevant data are given in tabular form in Table 1.

Table 1. CNT efficiency parameters (Fattahi & Safaei, 2017)

V_{CNT}	ζ_1	ζ_2
Short CNT-reinforced		
5%	0.0254	1.0351
10%	0.0443	1.2854
15%	0.0628	1.7798
25%	0.0740	1.8751
Long CNT-reinforced		
5%	2.1577	1.1767
10%	1.6354	1.4765
15%	1.6868	2.0588
25%	1.6531	2.1820

2.2. Obtaining finite element matrices for buckling problem

The Euler-Bernoulli beam theory (EBT) is a classical theory used to analyze the bending behavior of a beam. The buckling problem analyzes the stability of the beam under the effect of axial compressive force *N*. In this section, stiffness matrices and force vectors of finite element analysis will be given. In particular, under axial compressive force and together with the Winkler-type elastic foundation parameter (k), the nonlocal elasticity theory is also included in this analysis.

According to the nonlocal elasticity theory, Hooke's law for linear, isotropic and elastic bodies in the case of uniaxial deformation is given by (Wang et al., 2006):

$$\sigma(x) - \mu\frac{d^2\sigma(x)}{dx^2} = E_{11}\varepsilon(x) \tag{3}$$

Here, σ is the nonlocal stress, ε is the nonlocal strain and μ is the nonlocal parameter from the nonlocal elasticity theory. The free body diagram of the differential length of the nanobeam is given Figure 2.

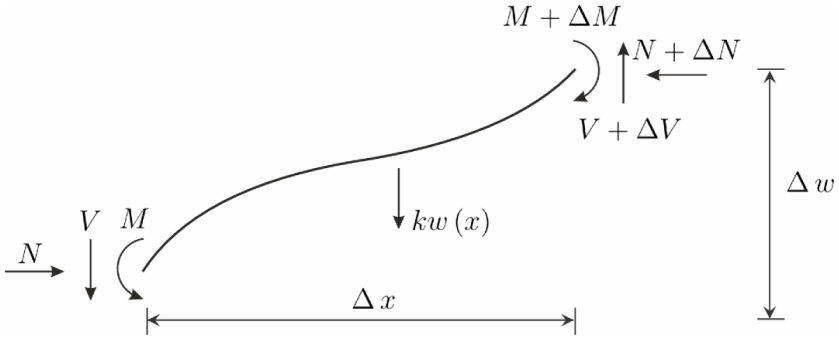


Figure 2. Free body diagram of the differential length of the nanobeam

By writing equilibrium equations for moments and forces in the transverse direction and then taking the limit of these equations

$$\frac{dV}{dx} = kw(x) \tag{4}$$

$$\frac{dM}{dx} = V + N\frac{dw}{dx} \tag{5}$$

identities are obtained. Here, w is the transverse displacement, V is the shear force and M is the bending moment. The bending moment and axial strain are calculated from

$$M = \int_A z\sigma dA \tag{6}$$

$$\varepsilon = -z\frac{d^2w}{dx^2} \tag{7}$$

Substituting equation (6) and (7) into equation (3) gives

$$M - \mu\frac{d^2M}{dx^2} = -E_{11}I\frac{d^2w}{dx^2} \tag{8}$$

Here I is the moment of inertia of the nanobeam. Equation (8) is the nonlocal constitutive equation of the nanobeam. By taking the derivative of equation (5) with respect to x and using equation (4)

$$\frac{d^2M}{dx^2} = \frac{dV}{dx} + N\frac{d^2w}{dx^2} = kw + N\frac{d^2w}{dx^2} \tag{9}$$

is obtained. Taking second order derivative of equation (8) and using equation (9) leads to

$$\frac{d^2M}{dx^2} = \mu\frac{d^4M}{dx^4} - E_{11}I\frac{d^4w}{dx^4} = \mu\left(k\frac{d^2w}{dx^2} + N\frac{d^4w}{dx^4}\right) - E_{11}I\frac{d^4w}{dx^4} \tag{10}$$

Equating the right sides of equations (9) and (10) gives

$$E_{11}I\frac{d^4w}{dx^4} + kw - \mu k\frac{d^2w}{dx^2} + N\frac{d^2w}{dx^2} - \mu N\frac{d^4w}{dx^4} = 0 \tag{11}$$

the governing differential equation for buckling of the nanobeam rests on the Winkler-type elastic foundation.

The analytical solution of equation (11) for the simply supported nanobeam will be obtained. The boundary conditions for this case are given as

$$w(0) = M(0) = w(L) = M(L) = 0 \tag{12}$$

To satisfy the given boundary conditions in equation (11), the transverse displacement function $w(x)$ is expressed by the

$$w(x) = \sum_{n=1}^{\infty} W_n \sin\frac{n\pi x}{L} \tag{13}$$

half-range Fourier sine series expansion. Here W_n are the Fourier coefficients. By substituting equation (13) in equation (11)

$$\sum_{n=1}^{\infty}\left(k + \frac{n^2\pi^2 k\mu}{L^2} + \frac{n^4\pi^4 E_{11}I}{L^4} - \frac{n^4\pi^4\mu N}{L^4} - \frac{n^2\pi^2 N}{L^2}\right)W_n \sin\frac{\pi nx}{L} = 0 \tag{14}$$

is obtained. To satisfy equation (14) in the $0 < x < L$ interval, which is the domain of the differential equation (11), coefficients of every $W_n \sin \pi nx/L$ term in equation (14) should be equal to zero, which gives

$$k + \frac{n^2\pi^2 k\mu}{L^2} + \frac{n^4\pi^4 E_{11}I}{L^4} - \frac{n^4\pi^4\mu N}{L^4} - \frac{n^2\pi^2 N}{L^2} = 0, \qquad n \geq 1 \tag{15}$$

condition. By arranging equation (15), one obtains the critical buckling loads of the nanobeam:

$$N_{cr}^n = \frac{n^2\pi^2(\mu k\, L^2 + n^2\pi^2 E_{11}I) + kL^4}{n^2\pi^2(L^2 + n^2\pi^2\mu)}, \qquad n \geq 1 \tag{16}$$

Here, N_{cr}^n is the critical buckling load of the nanobeam for the nth mode.

2.3. Galerkin finite element formulation

Analytical solutions cannot be obtained in many cases due to the complexity of the governing equation(s), boundary condition(s), or the domain of the problem. The analytical solution is not in closed form, which is where they can be obtained in most cases. In the finite element method, the domain of the problem is divided into subdomains. According to the variational approximation method used, the governing equation's weighted integral form is satisfied on each subdomain. Thus, the problem's solution is transformed from the solution of the differential equation(s) to the solution of the system of algebraic equations. The algebraic equations obtained for each subdomain are combined using the conditions of continuity of the primary variables and

equilibrium of the secondary variables at the relevant nodes. The values of the primary and secondary variables are determined by solving the algebraic equation set of the entire system. The value of the primary variable at any point in the domain of the problem is determined by taking the linear combination of the shape functions and the primary variable values obtained at the nodes. The finite element method can numerically solve almost all engineering problems encountered. It is the most common and general numerical solution method in engineering fields.

The finite element formulation is obtained using the weak-form Galerkin (Ritz) variational approximation method. The beam is analyzed by dividing it into small elements along its length. Nodes are assigned to the start and end points of each element. Since each node has two degrees of freedom (transverse deflection and rotation), each element's total degree of freedom is 4. These freedoms consist of the nodal generalized displacements $w_1, \theta_1, w_2, \theta_2$ which are elements of the generalized displacement vector $\mathbf{u} = [w_1 \quad \theta_1 \quad w_2 \quad \theta_2]^{\boldsymbol{T}}$. The shape function vector $\boldsymbol{\varphi}$ of the beam, with the length of each element being l_e, is given as follows (Reddy, 2002):

$$\boldsymbol{\varphi} = \left[1 - \frac{3x^2}{l_e^2} + \frac{2x^3}{l_e^3} \qquad x - \frac{2x^2}{l_e} + \frac{x^3}{l_e^2} \qquad \frac{3x^2}{l_e^2} - \frac{2x^3}{l_e^3} \qquad -\frac{x^2}{l_e} + \frac{x^3}{l_e^2}\right] \tag{17}$$

The approximate transverse deflection of the nanobeam can be expressed as follows:

$$w_N = \boldsymbol{\varphi}\mathbf{u} = \varphi_1 w_1 + \varphi_2 \theta_1 + \varphi_3 w_2 + \varphi_4 \theta_2 \tag{18}$$

According to the theory of nonlocal elasticity, including the Winkler-type elastic foundation effect, to obtain the weak form of the governing differential equation for buckling, the Z residual can be expressed as follows:

$$Z = E_{11} I \frac{d^4 w_N}{dx^4} + k w_N - \mu k \frac{d^2 w_N}{dx^2} + N \frac{d^2 w_N}{dx^2} - \mu N \frac{d^4 w_N}{dx^4} \tag{19}$$

To determine the weighted integral form of the differential equation, the shape functions φ_i are chosen as weight functions, the Z residual is multiplied by the weight functions and the resulting expression is integrated over the length of the nanobeam:

$$\int_0^L \left(\boldsymbol{\varphi}^T E_{11} I \frac{d^4 w_N}{dx^4} + \boldsymbol{\varphi}^T k w_N - \boldsymbol{\varphi}^T \mu k \frac{d^2 w_N}{dx^2} + \boldsymbol{\varphi}^T N \frac{d^2 w_N}{dx^2} - \boldsymbol{\varphi}^T \mu N \frac{d^4 w_N}{dx^4}\right) dx = 0 \tag{20}$$

Applying the partial integration twice in equation (20) (this is Ritz formulation, also known as weak-form Galerkin formulation), the general form can be written as follows:

$$\begin{aligned} &\int_0^L \left(E_{11} I \frac{d^2\boldsymbol{\varphi}^T}{dx^2}\frac{d^2\boldsymbol{\varphi}}{dx^2} + k\boldsymbol{\varphi}^T\boldsymbol{\varphi} + \mu k \frac{d\boldsymbol{\varphi}^T}{dx}\frac{d\boldsymbol{\varphi}}{dx} - N\frac{d\boldsymbol{\varphi}^T}{dx}\frac{d\boldsymbol{\varphi}}{dx} - \mu N \frac{d^2\boldsymbol{\varphi}^T}{dx^2}\frac{d^2\boldsymbol{\varphi}}{dx^2}\right)\mathbf{u}dx \\ &+ \left(E_{11} I \boldsymbol{\varphi}^T \frac{d^3\boldsymbol{\varphi}\mathbf{u}}{dx^3}\right)\Big|_{x=0}^{L} - \left(E_{11} I \frac{d\boldsymbol{\varphi}^T}{dx}\frac{d^2\boldsymbol{\varphi}\mathbf{u}}{dx^2}\right)\Big|_{x=0}^{L} - \left(\mu k \boldsymbol{\varphi}^T \frac{d\boldsymbol{\varphi}\mathbf{u}}{dx}\right)\Big|_{x=0}^{L} + \left(N\boldsymbol{\varphi}^T \frac{d\boldsymbol{\varphi}\mathbf{u}}{dx}\right)\Big|_{x=0}^{L} \\ &- \left(\mu N \boldsymbol{\varphi}^T \frac{d^3\boldsymbol{\varphi}\mathbf{u}}{dx^3}\right)\Big|_{x=0}^{L} + \left(\mu N \frac{d\boldsymbol{\varphi}^T}{dx}\frac{d^2\boldsymbol{\varphi}\mathbf{u}}{dx^2}\right)\Big|_{x=0}^{L} = 0 \end{aligned} \tag{21}$$

The stiffness and buckling load matrices of the CNT reinforced nanobeam are obtained by substituting the shape functions in equation (17) into equation (21) and taking the integrals one by one. These matrices are defined as follows:

$$\mathbf{K}_E = E_{11} I \int_0^{l_e} \begin{Bmatrix} \varphi_1'' \\ \varphi_2'' \\ \varphi_3'' \\ \varphi_4'' \end{Bmatrix} \{\varphi_1'' \quad \varphi_2'' \quad \varphi_3'' \quad \varphi_4''\} dx = \frac{E_{11} I}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 \\ -12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$\mathbf{K}_{k1} = k\int_0^{l_e}\begin{Bmatrix}\varphi_1\\ \varphi_2\\ \varphi_3\\ \varphi_4\end{Bmatrix}\{\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4\}dx = \frac{k}{420}\begin{bmatrix}156l_e & 22l_e^2 & 54l_e & -13l_e^2\\ 22l_e^2 & 4l_e^3 & 13l_e^2 & -3l_e^3\\ 54l_e & 13l_e^2 & 156l_e & -22l_e^2\\ -13l_e^2 & -3l_e^3 & -22l_e^2 & 4l_e^3\end{bmatrix} \tag{23}$$

$$\mathbf{K}_{k2} = \mu k\int_0^{l_e}\begin{Bmatrix}\varphi_1'\\ \varphi_2'\\ \varphi_3'\\ \varphi_4'\end{Bmatrix}\{\varphi_1' \quad \varphi_2' \quad \varphi_3' \quad \varphi_4'\}dx = \frac{\mu k}{30l_e}\begin{bmatrix}36 & 3l_e & -36 & 3l_e\\ 3l_e & 4l_e^2 & -3l_e & -l_e^2\\ -36 & -3l_e & 36 & -3l_e\\ 3l_e & -l_e^2 & -3l_e & 4l_e^2\end{bmatrix} \tag{24}$$

$$\mathbf{B}_{N1} = N\int_0^{l_e}\begin{Bmatrix}\varphi_1'\\ \varphi_2'\\ \varphi_3'\\ \varphi_4'\end{Bmatrix}\{\varphi_1' \quad \varphi_2' \quad \varphi_3' \quad \varphi_4'\}dx = \frac{N}{30l_e}\begin{bmatrix}36 & 3l_e & -36 & 3l_e\\ 3l_e & 4l_e^2 & -3l_e & -l_e^2\\ -36 & -3l_e & 36 & -3l_e\\ 3l_e & -l_e^2 & -3l_e & 4l_e^2\end{bmatrix} \tag{25}$$

$$\mathbf{B}_{N2} = \mu N\int_0^{l_e}\begin{Bmatrix}\varphi_1''\\ \varphi_2''\\ \varphi_3''\\ \varphi_4''\end{Bmatrix}\{\varphi_1'' \quad \varphi_2'' \quad \varphi_3'' \quad \varphi_4''\}dx = \frac{\mu N}{l_e^3}\begin{bmatrix}12 & 6l_e & -12 & 6l_e\\ 6l_e & 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2\\ -12 & -6l_e & 12 & -6l_e\\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2\end{bmatrix} \tag{26}$$

As can be understood from here, the system stiffness matrix is $\mathbf{K} = \mathbf{K}_E + \mathbf{K}_{k1} + \mathbf{K}_{k2}$ and $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{N1} + \mathbf{B}_{N2}$ is the force vector, the critical buckling load is obtained by solving the following eigenvalue problem (Phadikar & Pradhan, 2010):

$$|\mathbf{K} - \lambda\mathbf{B}| = 0 \tag{27}$$

$$\lambda = \frac{N}{N_{cr}} \tag{28}$$

Here N_{cr} represents the critical buckling load.

3. Results and discussion

This section investigates the effects of different parameters on the buckling behavior of CNT reinforced nanobeams. An analysis will be made for the buckling performance of nanobeams using variables such as nonlocal parameter, elastic foundation parameter, beam length-to-thickness ratio and CNT volume fraction. The calculations made for short and long CNT reinforced nanobeam models with different CNT volume fractions will be evaluated in detail by considering various foundation stiffnesses and beam geometries. The effects of these parameters on the buckling strength and stiffness of nanobeams will be explained with the help of tables and figures.

The elastic foundation is a parameter that directly affects the stability and buckling behavior of the beam and is used to model the effects of foundation stiffness on the beam. The elastic foundation parameter k is based on a Winkler-type foundation model and represents the force required for the foundation to make a unit displacement corresponding to the displacements at different points of the beam. The dimensionless parameter K_W is expressed by the following formula:

$$K_W = \frac{kL^4}{E_{11}I} \tag{29}$$

The nanobeam analyzed in this study is manufactured from CNT reinforced composite material. In particular, SWCNTs with (10,10) armchair structure and a polyethylene matrix with isotropic behavior are used. The properties of the nanobeam obtained by combining these two materials are based on data from the literature. The elasticity modulus of the polyethylene matrix is taken as $E^m = 3.22$ GPa at room temperature and the

elasticity modulus of the (10,10) armchair SWCNT used as carbon nanotube reinforcement was taken as $E_{11}^{CNT} = 600$ GPa and $E_{22}^{CNT} = 10$ GPa (Popov et al., 2000; Fattahi & Safaei, 2017).

These properties define the mechanical behavior of SWCNT and the effective elasticity and shear moduli of the nanobeam are calculated using the rule of mixtures. The CNT volume fractions during the calculations were taken as $V_{CNT} = 0.05$, 0.10, 0.15 and 0.25. Throughout the study, beam cross-sectional dimensions are taken as $b = h = 10$ nm. In cases where the L/h ratio is 10 and above, the contribution of shear deformations to the strain energy remains below 5%. In this study, Euler-Bernoulli beam theory is used since solutions are obtained for $L/h = 10$.

Table 2 presents the N_{cr} values obtained from the exact solution in this study and given in Equation (16), and the finite element models using different numbers of elements (N^e). For this comparison study, $V_{CNT} = 0$ and the beam parameters are set as $K_W = 10$, $E_{11} = E^m = 3.22$ GPa, $\mu = 1$, and $\frac{L}{h} = 10$.

Table 2. Comparison of the first 5 modes N_{cr} values (N) for a simply supported nanobeam

Mode	Eq. (16)	FEM Eq. (27)					
		$N^e = 5$	$N^e = 10$	$N^e = 15$	$N^e = 20$	$N^e = 25$	$N^e = 30$
1	2.9176	2.9182	2.9176	2.9176	2.9176	2.9176	2.9176
2	10.6197	10.6534	10.6219	10.6201	10.6198	10.6197	10.6197
3	23.6554	24.0040	23.6800	23.6604	23.6570	23.6561	23.6558
4	41.7318	43.4329	41.8634	41.7588	41.7408	41.7354	41.7335
5	64.6252	78.1660	65.0994	64.7327	64.5538	64.6384	64.6316

The results in Table 2 show that the finite element solution given in Eq. (27) closely matches the analytical solution. The first mode frequencies show a remarkable agreement for all finite element models, confirming the accuracy of the finite element model for low buckling modes. For higher modes, slight discrepancies are observed when fewer elements are used. However, these differences decrease significantly as the number of elements increases in the finite element model. In this study, $N^e = 30$ is taken for the finite element models.

Tables 3-4 and Figures 3-4 show the effects of nonlocal parameters and CNT volume fractions on the critical buckling load for short and long CNT reinforced nanobeams. $K_W = 10$ and $\frac{L}{h} = 10$ values are used during the analysis.

Table 3. N_{cr} values (N) of short CNT reinforced nanobeam for different μ and V_{CNT} parameters

V_{CNT}	μ (nm^2)									
	0	0.1	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5
5%	3.465	3.465	3.464	3.462	3.461	3.459	3.458	3.456	3.453	3.450
10%	5.042	5.042	5.040	5.038	5.036	5.033	5.031	5.029	5.024	5.020
15%	7.609	7.608	7.605	7.602	7.599	7.595	7.592	7.589	7.582	7.575
25%	12.252	12.251	12.247	12.241	12.236	12.230	12.225	12.219	12.209	12.198

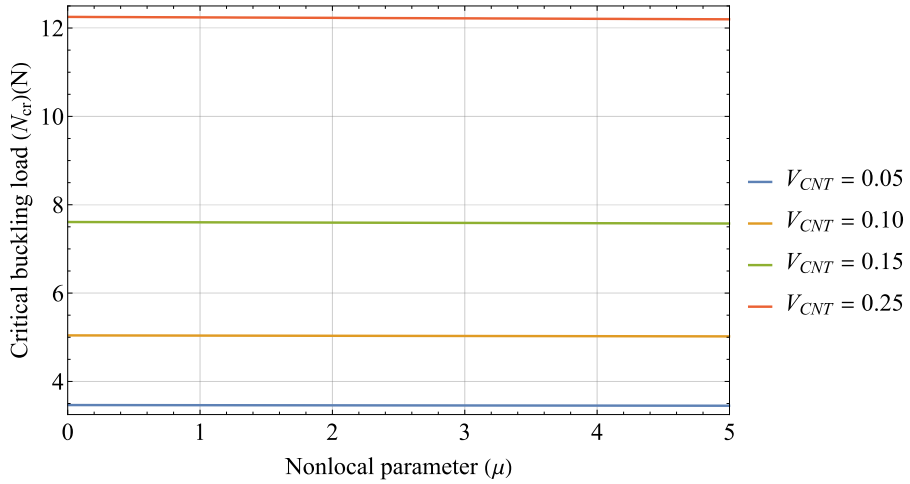


Figure 3. N_{cr} values of short CNT reinforced nanobeam for different μ and V_{CNT} parameters

Table 4. N_{cr} values (N) of long CNT reinforced nanobeam for different μ and V_{CNT} parameters

V_{CNT}	μ (nm^2)									
	0	0.1	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5
5%	61.479	61.473	61.451	61.424	61.396	61.369	61.342	61.314	61.260	61.205
10%	91.615	91.607	91.574	91.533	91.492	91.451	91.411	91.370	91.288	91.207
15%	140.162	140.149	140.099	140.036	139.974	139.911	139.849	139.786	139.662	139.537
25%	227.070	227.050	226.968	226.867	226.766	226.664	226.563	226.462	226.260	226.059

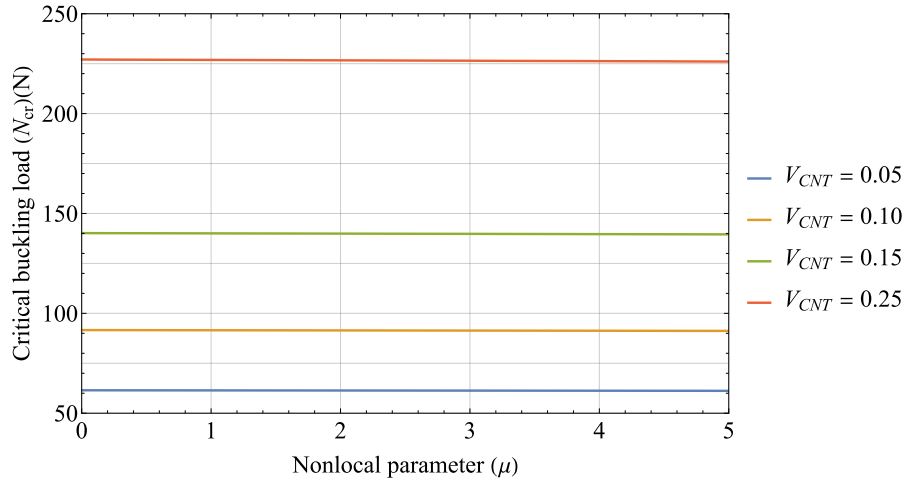


Figure 4: N_{cr} values of long CNT reinforced nanobeam for different μ and V_{CNT} parameters

Tables 3-4 and Figures 3-4 show that the critical buckling load increases significantly as the CNT volume fraction increases regardless of whether long or short CNT reinforcement is used. This shows that CNT reinforcement increases the stiffness and buckling strength of the nanobeam. This increase is slightly higher for long CNT reinforced nanobeams. As the nonlocal parameter increases, the critical buckling load decreases, but this decrease is almost imperceptible. This means that the nonlocal parameter does not affect the buckling load. The resulting formulation is more complex when the nonlocal elasticity theory is used in the beam model. Still, the effect of the nonlocal parameter on the buckling load is almost negligible. Therefore, there is no need to use nonlocal elasticity theory in the beam model.

Tables 5-6 and Figures 5-6 show the effects of dimensionless elastic foundation parameters and CNT volume fractions on the critical buckling load for short and long CNT reinforced nanobeams. $\mu = 0.5$ and $\frac{L}{h} = 10$ values are used during the analysis.

Table 5. N_{cr} values (N) of short CNT reinforced nanobeam for different K_W and V_{CNT} parameters

V_{CNT}	K_W								
	0	1	2	3	4	5	10	20	50
5%	3.141	3.173	3.206	3.238	3.270	3.302	3.464	3.786	4.754
10%	4.571	4.618	4.665	4.711	4.758	4.805	5.040	5.510	6.918
15%	6.897	6.968	7.039	7.110	7.180	7.251	7.605	8.314	10.439
25%	11.106	11.220	11.334	11.448	11.562	11.676	12.247	13.387	16.810

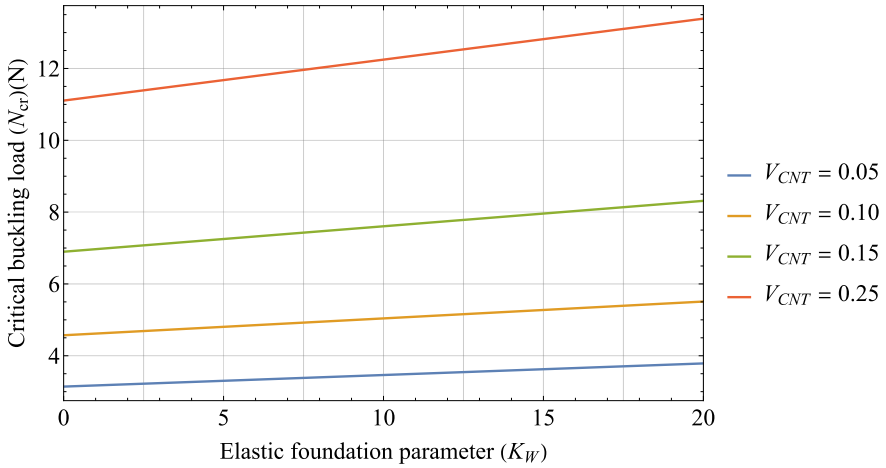


Figure 5. N_{cr} values of short CNT reinforced nanobeam for different K_W and V_{CNT} parameters

Table 6. N_{cr} values (N) of long CNT reinforced nanobeam for different K_W and V_{CNT} parameters

V_{CNT}	K_W								
	0	1	2	3	4	5	10	20	50
5%	55.728	56.300	56.872	57.445	58.017	58.589	61.451	67.175	84.347
10%	83.045	83.898	84.751	85.604	86.456	87.309	91.574	100.104	125.692
15%	127.050	128.355	129.659	130.964	132.269	133.574	140.099	153.148	192.296
25%	205.828	207.942	210.056	212.170	214.284	216.398	226.968	248.109	311.531

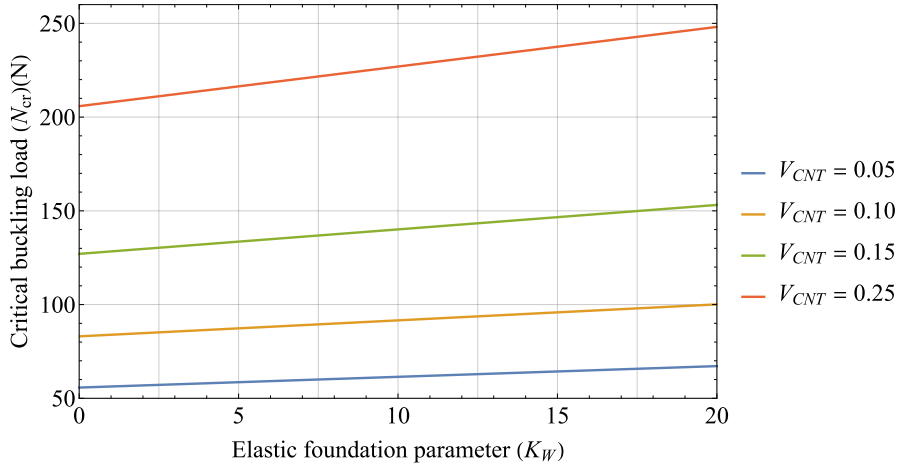


Figure 6. N_{cr} values of long CNT reinforced nanobeam for different K_W and V_{CNT} parameters

When Tables 5-6 and Figures 5-6 are examined, it can be understood that the increase in CNT volume fractions increases the critical buckling loads. This increase is slightly higher for long CNT reinforced nanobeams. As a result of increasing the V_{CNT} value at different K_W values, the proportional increase in the critical buckling

load does not change. In other words, regardless of the K_W value, the change in the V_{CNT} value affects the critical buckling load strength proportionally in the same way. The same goes for vice versa; i.e., regardless of the V_{CNT} value, the change in the K_W value affects the critical buckling load strength proportionally in the same way. When one of the parameters is kept constant and the other parameter is increased equally in both cases, the V_{CNT} parameter increases the critical buckling load strength more than the K_W parameter.

Tables 7-8 and Figures 7-8 show the effects of the length-to-thickness ratio of the CNT reinforced nanobeams and different CNT volume fractions on the buckling behavior of short and long CNT reinforced nanobeams. $\mu = 1$ and $K_W = 20$ values are used during the analysis.

Table 7. N_{cr} values (N) of short CNT reinforced nanobeam for different L/h and V_{CNT} values

V_{CNT}	L/h			
	5	10	20	50
5%	15.1021	3.7848	0.9468	0.1515
10%	21.9754	5.5073	1.3777	0.2205
15%	33.1607	8.3105	2.0789	0.3327
25%	53.3970	13.3820	3.3476	0.5357

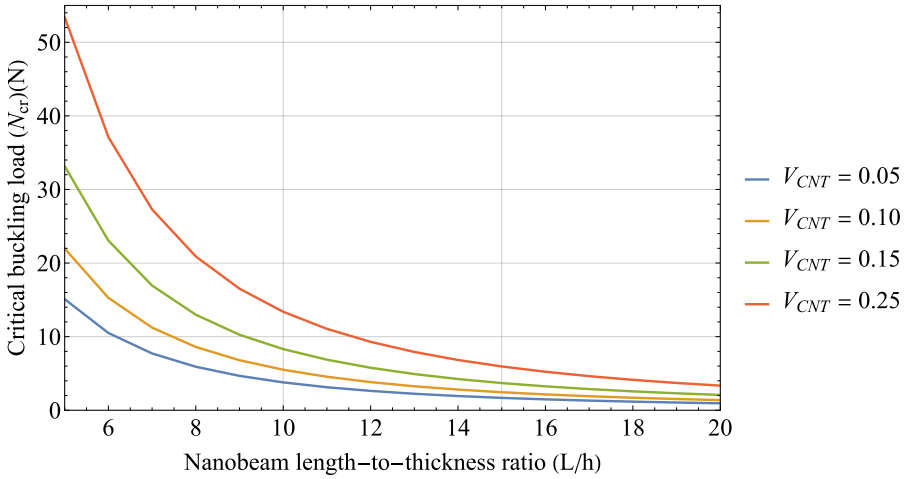


Figure 7. N_{cr} values of short CNT reinforced nanobeam for different L/h and V_{CNT} values

Table 8. N_{cr} values (N) of long CNT reinforced nanobeam for different L/h and V_{CNT} values

V_{CNT}	L/h			
	5	10	20	50
5%	267.9336	67.1477	16.7972	2.6880
10%	399.2720	100.0628	25.0311	4.0057
15%	610.8443	153.0856	38.2949	6.1282
25%	989.6034	248.0076	62.0400	9.9281

When Tables 7-8 and Figures 7-8 are analyzed, it is seen that the critical buckling load decreases as the length-to-thickness ratio of the nanobeam increases. This indicates that longer and thinner beams are more prone to buckling. In addition, according to the Euler-Bernoulli beam theory, the critical buckling load depends primarily on the flexural rigidity and length of the beam. In particular, the critical buckling load is inversely proportional to the length of the beam. Therefore, as the L/h ratio increases (i.e., L increases), the critical buckling load decreases rapidly.

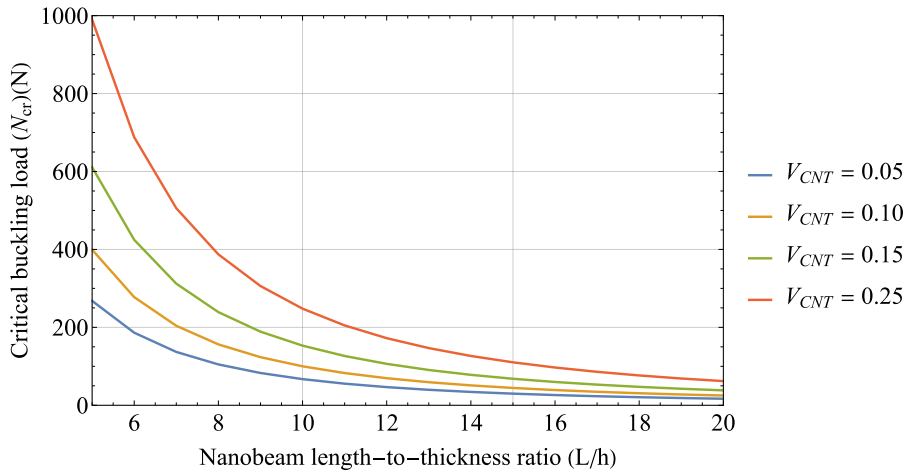


Figure 8. N_{cr} values of long CNT reinforced nanobeam for different L/h and V_{CNT} values

4. Conclusion

This study investigates the buckling behavior of short and long CNT reinforced nanobeams resting on elastic foundations. The effects on the critical buckling load are evaluated by considering various parameters such as short or long CNT reinforcement, CNT volume fraction, nonlocal parameter, elastic foundation parameter and length-to-thickness ratio of the nanobeam.

The results showed that an increase in the CNT volume fraction significantly increases the buckling strength of the nanobeam. CNT reinforcement strengthens the nanobeams' buckling strength, leading to higher critical buckling loads. CNT volume fraction is the most crucial parameter affecting buckling strength. This effect is observed for both short and long CNT reinforcements. The critical buckling loads of long CNT reinforced nanobeams are higher than those of short CNT reinforced nanobeams. This reveals that long CNTs contribute more to the mechanical performance of the nanobeam.

One of the most important results of this study is that the nonlocal parameter does not practically affect the buckling strength. Therefore, there is no need to use the nonlocal elasticity theory in mathematical modeling, which leads to a more complex formulation.

The elastic foundation parameter is another critical factor affecting the buckling behavior of the nanobeam. A significant increase in the critical buckling load was observed with the rise of the K_W value. This result shows that the nanobeam exhibits a stronger buckling strength when placed on the elastic foundation. The elastic foundation parameter strengthens the structural integrity of the nanobeam and increases its resistance to buckling.

Finally, it is found that the critical buckling load decreases as the length-to-thickness ratio of the nanobeam increases. This result indicates that longer and thinner nanobeams are more prone to buckling. As the length-to-thickness ratio of the nanobeam increases, the structure's stability decreases, negatively affecting the buckling resistance. This parameter, together with the CNT volume fraction parameter, is the parameter that most affects the buckling strength of the nanobeam. Since the buckling strength will be significantly reduced, especially in long, thin beams, this negative effect can be mitigated by using a high CNT volume fraction.

In the design of nanobeams resting on a Winkler-type elastic foundation, particular attention should be paid to the CNT volume fraction and length-to-thickness ratio parameters.

Acknowledgment

The authors sincerely thank the editor and the referees for their careful reading and valuable comments.

Author contribution

The authors contributed to all sections. The authors read and approved the last version of the manuscript.

Declaration of ethical code

The authors of this article declare that the material and the methods used in this study do not require ethics committee approval and/or special legal permission.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

Aifantis, E. C. (1999). Strain gradient interpretation of size effects. *International Journal of Fracture*, *95*(1–4), 299–314. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4659-3_16

Aria, A. I., & Friswell, M. I. (2019). A nonlocal finite element model for buckling and vibration of functionally graded nanobeams. Composites Part B: Engineering, 166, 233–246. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.071

Arshid, E., Arshid, H., Amir, S. & Mousavi, S. B. (2021). Free vibration and buckling analyses of FG porous sandwich curved microbeams in thermal environment under magnetic field based on modified couple stress theory. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *21*(1), 6. https://doi:10.1007/s43452-020-00150-x

Ashrafi, B., Hubert, P. & Vengallatore, S. (2006). Carbon nanotube-reinforced composites as structural materials for microactuators in microelectromechanical systems. *Nanotechnology*, *17*(19), 4895-4903. https://doi:10.1088/0957-4484/17/19/019

Balasubramanian, K. & Burghard, M. (2005). Chemically functionalized carbon nanotubes. *Small*, *1 2*(2), 180-92. https://doi:10.1002/SMLL.200400118

Baughman, R. H., Zakhidov, A. A. & De Heer, W. A. (2002). Carbon Nanotubes--the Route Toward Applications. *Science*, *297*(5582), 787-792. https://doi:10.1126/SCIENCE.1060928

Bentrar, H., Chorfi, S. M., Belalia, S. A., Tounsi, A., Ghazwani, M. H., & Alnujaie, A. (2023). Effect of porosity distribution on free vibration of functionally graded sandwich plate using the P-version of the finite element method. *Structural Engineering and Mechanics*, *88*(6), 551–567. https://doi.org/10.12989/sem.2023.88.6.551

Belarbi, M.-O., Houari, M.-S.-A., Daikh, A. A., Garg, A., Merzouki, T., Chalak, H. D., & Hirane, H. (2021). Nonlocal finite element model for the bending and buckling analysis of functionally graded nanobeams using a novel shear deformation theory. Composite Structures, 264, 113712. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113712

Casafont, M., Marimon, F., & Pastor, M. M. (2009). Calculation of pure distortional elastic buckling loads of members subjected to compression via the finite element method. *Thin-Walled Structures*, *47*(6–7), 701–729. https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.12.001

Chi Tho, N., van Thom, D., Hong Cong, P., Zenkour, A. M., Hong Doan, D., & van Minh, P. (2023). Finite element modeling of the bending and vibration behavior of three-layer composite plates with a crack in the core layer. *Composite Structures*, *305*, 116529. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116529

Civalek, Ö., & Numanoğlu, H. M. (2020). Nonlocal finite element analysis for axial vibration of embedded love–bishop nanorods. International Journal of Mechanical Sciences, 188, 105939. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105939

Civalek, Ö., Uzun, B., Yaylı, M. Ö., & Akgöz, B. (2020a). Size-dependent transverse and longitudinal vibrations of embedded carbon and silica carbide nanotubes by nonlocal finite element method. The European Physical Journal Plus, 135(4), 381. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00385-w

Civalek, Ö., Uzun, B. & Yaylı, M. Ö. (2020b). Stability analysis of nanobeams placed in electromagnetic field using a finite element method. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*(21), 1165. https://doi:10.1007/s12517-020-06188-8

Dai, K. Y., & Liu, G. R. (2007). Free and forced vibration analysis using the smoothed finite element method (SFEM). *Journal of Sound and Vibration*, *301*(3–5), 803–820. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.10.035

Demir, C., Mercan, K., Numanoglu, H. M., & Civalek, O. (2018). Bending Response of Nanobeams Resting on Elastic Foundation. Journal of Applied and Computational Mechanics, 4(2), 105–114. https://doi.org/10.22055/jacm.2017.22594.1137

Eltaher, M. A., Alshorbagy, A. E., & Mahmoud, F. F. (2013). Vibration analysis of Euler–Bernoulli nanobeams by using finite element method. Applied Mathematical Modelling, 37(7), 4787–4797. https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.10.016

Eringen, A. C. (1967). Theory of micropolar plates. *Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Physik ZAMP 1967 18:1*, *18*(1), 12–30. https://doi.org/10.1007/BF01593891

Esawi, A. M. K. & El Borady, M. A. (2008). Carbon nanotube-reinforced aluminium strips. *Composites Science and Technology*, *68*(2), 486-492. https://doi:10.1016/J.COMPSCITECH.2007.06.030

Fattahi, A. M. & Safaei, B. (2017). Buckling analysis of CNT-reinforced beams with arbitrary boundary conditions. *Microsystem Technologies*, *23*(10), 5079-5091. https://doi:10.1007/s00542-017-3345-5

Feng, Y., Kowalsky, M. J., & Nau, J. M. (2015). Finite-Element Method to Predict Reinforcing Bar Buckling in RC Structures. *Journal of Structural Engineering*, *141*(5). https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001048

Gurtin, M. E., Weissmüller, J., & Larché, F. (1998). A general theory of curved deformable interfaces in solids at equilibrium. *Philosophical Magazine A*, *78*(5), 1093–1109. https://doi.org/10.1080/01418619808239977

Kafkas, U. (2024). Değiştirilmiş Gerilme Çifti Teorisi ile Gözenekli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Konsol Nanokirişlerin Statik Analizi. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 29(2), 393–412. https://doi.org/10.17482/uumfd.1459934

Kahya, V., & Turan, M. (2017). Bending of Laminated Composite Beams by a Multi-Layer Finite Element Based on a Higher-Order Theory. Acta Physica Polonica A, 132(3), 473–475. https://doi.org/10.12693/APhysPolA.132.473

Karamanli, A., & Vo, T. P. (2022). Finite element model for free vibration analysis of curved zigzag nanobeams. Composite Structures, 282, 115097. https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.115097

Lal, A. & Markad, K. (2019). Thermo-Mechanical Post Buckling Analysis of Multiwall Carbon Nanotube-Reinforced Composite Laminated Beam under Elastic Foundation. *Curved and Layered Structures*, *6*(1), 212-228. https://doi:10.1515/CLS-2019-0018

Lam, D. C. C., Yang, F., Chong, A. C. M., Wang, J., & Tong, P. (2003). Experiments and theory in strain gradient elasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, *51*(8), 1477–1508. https://doi.org/10.1016/S0022-5096(03)00053-X

Lim, C. W., Zhang, G., & Reddy, J. N. (2015). A higher-order nonlocal elasticity and strain gradient theory and its applications in wave propagation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, *78*, 298–313. https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2015.02.001

Mesbah, A., Belabed, Z., Amara, K., Tounsi, A., Bousahla, A. A., & Bourada, F. (2023). Formulation and evaluation a finite element model for free vibration and buckling behaviours of functionally graded porous (FGP) beams. *Structural Engineering and Mechanics*, *86*(3), 291–309. https://doi.org/10.12989/sem.2023.86.3.291

Mindlin, R. D. (1965). Second gradient of strain and surface-tension in linear elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, *1*(4), 417–438. https://doi.org/10.1016/0020-7683(65)90006-5

Motevalli, B., Montazeri, A., Tavakoli-Darestani, R. & Rafii-Tabar, H. (2012). Modeling the buckling behavior of carbon nanotubes under simultaneous combination of compressive and torsional loads. *Physica E-low-dimensional Systems & Nanostructures*, *46*, 139-148. https://doi:10.1016/J.PHYSE.2012.09.006

Namilae, S. & Chandra, N. (2006). Role of atomic scale interfaces in the compressive behavior of carbon nanotubes in composites. *Composites Science and Technology*, *66*(13), 2030-2038. https://doi:10.1016/j.compscitech.2006.01.009

Phadikar, J. K. & Pradhan, S. C. (2010). Variational formulation and finite element analysis for nonlocal elastic nanobeams and nanoplates. *Computational Materials Science*, *49*(3), 492-499. https://doi:10.1016/j.commatsci.2010.05.040

Pham, Q.-H., Tran, V. K., & Nguyen, P.-C. (2022). Hygro-thermal vibration of bidirectional functionally graded porous curved beams on variable elastic foundation using generalized finite element method. *Case Studies in Thermal Engineering, 40*, 102478. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102478

Popov, V. N., Van Doren, V. E. & Balkanski, M. (2000). Elastic properties of crystals of single-walled carbon nanotubes. *Solid State Communications*, *114*(7), 395-399. https://doi:10.1016/S0038-1098(00)00070-3

Pouresmaeeli, S. & Fazelzadeh, S. A. (2017). Uncertain Buckling and Sensitivity Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Composite Beam. *International Journal of Applied Mechanics*, *09*(05), 1750071. https://doi:10.1142/S1758825117500715

Pradhan, S. C. & Reddy, G. K. (2011). Buckling analysis of single walled carbon nanotube on Winkler foundation using nonlocal elasticity theory and DTM. *Computational Materials Science*, *50*(3), 1052-1056. https://doi:10.1016/J.COMMATSCI.2010.11.001

Reddy, J. N. (2002). *Energy Principles and Variational Methods in Applied Mechanics* (2nd ed.). John Wiley and Sons.

Reddy, J. N., Nampally, P., & Srinivasa, A. R. (2020). Nonlinear analysis of functionally graded beams using the dual mesh finite domain method and the finite element method. *International Journal of Non-Linear Mechanics, 127*, 103575. https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103575

Setoodeh, A. R., Derahaki, M. & Bavi, N. (2015). DQ thermal buckling analysis of embedded curved carbon nanotubes based on nonlocal elasticity theory. *Latin American Journal of Solids and Structures*, *12*(10), 1901-1917. https://doi:10.1590/1679-78251894

Shen, H.-S. (2009). Nonlinear bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates in thermal environments. *Composite Structures*, *91*(1), 9-19. https://doi:10.1016/j.compstruct.2009.04.026

Song, W., Deng, Z., Wu, H., & Zhan, Y. (2022). Extended finite element modeling of hot mix asphalt based on the semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*, *340*, 127462. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127462

Suhr, J., Koratkar, N., Keblinski, P. & Ajayan, P. (2005). Viscoelasticity in carbon nanotube composites. *Nature Materials*, *4*(2), 134-137. https://doi:10.1038/nmat1293

Taghizadeh, M., Ovesy, H. R. & Ghannadpour, S. A. M. (2016). Beam Buckling Analysis by Nonlocal Integral Elasticity Finite Element Method. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, *16*(06), 1550015. https://doi:10.1142/S0219455415500157

Thang, P. T. (2019). Geometrically nonlinear buckling analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced cylindrical panels resting on Winkler–Pasternak elastic foundation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *233*(2), 702-712. https://doi:10.1177/0954406218760957

Toupin, R. (1962). Elastic materials with couple-stresses. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, *11*(1), 385–414. https://doi.org/10.1007/BF00253945

Tuna, M., & Kirca, M. (2017). Bending, buckling and free vibration analysis of Euler-Bernoulli nanobeams using Eringen's nonlocal integral model via finite element method. Composite Structures, 179, 269–284. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.019

Turan, M., & Hacıoğlu, M. İ. (2022). Buckling Analysis of Functionally Graded Beams Using the Finite Element Method. Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 15(Special Issue I), 98–109. https://doi.org/10.18185/erzifbed.1199454

Turan, M., & Hacıoğlu, M. İ. (2023). Yüksek mertebe sonlu eleman modeliyle fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim ve statik analizi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1185301

Turan, M., & Kahya, V. (2018). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 119–130. https://doi.org/10.31466/kfbd.453833

Turan, M., & Kahya, V. (2021). Fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç kirişlerin Navier yöntemiyle serbest titreşim ve burkulma analizi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 36(2), 743–758. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.599928

Uhm, T., & Youn, S. (2009). T-spline finite element method for the analysis of shell structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, *80*(4), 507–536. https://doi.org/10.1002/nme.2648

Uzun, B., Kafkas, U., & Yaylı, M. Ö. (2021). Free vibration analysis of nanotube based sensors including rotary inertia based on the Rayleigh beam and modified couple stress theories. Microsystem Technologies, 27(5), 1913–1923. https://doi.org/10.1007/s00542-020-04961-z

Uzun, B., Numanoglu, H., & Civalek, O. (2018). Free vibration analysis of BNNT with different cross-Sections via nonlocal FEM. Journal of Computational Applied Mechanics, 49(2), 252–260. https://doi.org/10.22059/jcamech.2018.266789.328

Uzun, B., & Yaylı, M. Ö. (2022). A Finite Element Solution for Bending Analysis of a Nanoframe using Modified Couple Stress Theory. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 14(1), 1–14. https://doi.org/10.24107/ijeas.1064690

Uzun, B., Yaylı, M. Ö., & Deliktaş, B. (2020). Free vibration of FG nanobeam using a finite-element method. Micro & Nano Letters, 15(1), 35–40. https://doi.org/10.1049/mnl.2019.0273

Wang, Q., Varadan, V. K., & Quek, S. T. (2006). Small scale effect on elastic buckling of carbon nanotubes with nonlocal continuum models. *Physics Letters A*, *357*(2), 130–135. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2006.04.026

Wang, Q., Liew, K. M., He, X. Q. & Xiang, Y. (2007). Local buckling of carbon nanotubes under bending. *Applied Physics Letters*, *91*(9). https://doi:10.1063/1.2778546

Wattanasakulpong, N. & Ungbhakorn, V. (2013). Analytical solutions for bending, buckling and vibration responses of carbon nanotube-reinforced composite beams resting on elastic foundation. *Computational Materials Science*, *71*, 201-208. https://doi:10.1016/J.COMMATSCI.2013.01.028

Wu, C.-P. & Yu, J.-J. (2019). A review of mechanical analyses of rectangular nanobeams and single-, double-, and multi-walled carbon nanotubes using Eringen's nonlocal elasticity theory. *Archive of Applied Mechanics*, *89*(9), 1761-1792. https://doi:10.1007/s00419-019-01542-z

Yang, F., Chong, A. C. M., Lam, D. C. C., & Tong, P. (2002). Couple stress based strain gradient theory for elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, *39*(10), 2731–2743. https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00152-X

Yaylacı, M., Yaylacı, E. U., Özdemir, M. E., Öztürk, Ş., & Sesli, H. (2023). Vibration and buckling analyses of FGM beam with edge crack: Finite element and multilayer perceptron methods. *Steel and Composite Structures*, *46*(4), 565–575. https://doi.org/10.12989/scs.2023.46.4.565

Yaylı, M.Ö. (2015). Buckling Analysis of a Rotationally Restrained Single Walled Carbon Nanotube. *Acta Physica Polonica A*, *127*(3), 678-683. https://doi:10.12693/APhysPolA.127.678

Yaylı, M. Ö. (2017). Buckling analysis of a cantilever single-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium with an attached spring. *Micro & Nano Letters*, *12*(4), 255-259. https://doi:10.1049/mnl.2016.0662

Yaylı, M. Ö. (2019). Stability analysis of a rotationally restrained microbar embedded in an elastic matrix using strain gradient elasticity. *Curved and Layered Structures*, *6*(1), 1-10. https://doi:10.1515/cls-2019-0001

Zhu, S., Dong, R., Liu, Z., Liu, H., Lu, Z., & Guo, Y. (2024). A finite element method study of the effect of vibration on the dynamic biomechanical response of the lumbar spine. *Clinical Biomechanics*, *111*, 106164. https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2023.106164

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 122-139 doi: 10.17714/gumusfenbil.1579367 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Standart penetrasyon ve presiyometre deneylerine göre yüzeysel temellerde taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması

Comparison of bearing capacity in shallow foundations according to standard penetration and pressuremeter tests

Zübeyde KANKAN*[1], Baran TOPRAK[2]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye*

[2] *Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye*

• Geliş tarihi / *Received*: 04.11.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 17.01.2025

Öz

Yapıların temelleri, yapının ağırlığını ve diğer yükleri taşıyacak şekilde tasarlanmalıdır. Temel tasarımı için, zeminlerin taşıma gücü bilinmesi gerekir. Zeminlerin taşıma gücü: zeminlerin, üzerine etkiyen yüklerden dolayı oturma sınırları içerisinde kalarak kayma göçmesi olmadan zemine aktarabileceği maksimum gerilme olarak tanımlanır. Zeminlerin taşıma gücü, yapıların güvenli bir şekilde inşa edilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Presiyometre Testi (PMT), zeminlerin taşıma gücünü belirlemek için kullanılan saha deneyleridir. Her iki yöntem de benzer amaçlara hizmet ederken, uygulama şekilleri ve sağladıkları veriler açısından farklılıklar göstermektedir. Bu iki test, zemin mühendisliğinde önemli bilgiler sunmakla birlikte, doğru yorumlama ve kullanım açısından dikkat edilmesi gereken önemli detaylar içermektedir. Bu araştırma makalesi, yüzeysel temellerin taşıma kapasitesini belirlemek için Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Presiyometre Testi (PMT) yöntemlerinin etkinliğini karşılaştırmaktadır. GEO5 Geoteknik Tasarım Programı kullanılarak, farklı zemin koşullarında ve aynı yük altında yapılan SPT ve PMT deney verileri analiz edilmiştir. Analizler, PMT yönteminin SPT'ye göre anlamlı derecede daha yüksek taşıma kapasitesi değerleri verdiğini göstermiştir. Sonuç olarak, daha güvenilir bir temel tasarımı için SPT ve PMT verilerinin birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir. Çalışma, Halkalı-Kapıkule Demiryolu Hattı projesinden alınan verilerle desteklenmiştir.

Anahtar kelimeler: GEO5, Presiyometre, Standart penetrasyon, Taşıma gücü, Yüzeysel temel

Abstract

Foundations of structures must be designed to support the weight of the structure and other loads. For foundation design, the bearing capacity of the soils must be known. Bearing capacity of soils: It is defined as the maximum stress that the soils can transfer to the soil without shear failure while remaining within the settlement limits due to the loads acting on it. The bearing capacity of soils is of critical importance for the safe construction of structures. Standard Penetration Test (SPT) and Pressuremeter Test (PMT) are field tests used to determine the bearing capacity of soils. While both methods serve similar purposes, they differ in terms of their application and the data they provide. While these two tests provide important information in soil engineering, they also contain important details that must be taken into consideration for correct interpretation and use. This research paper compares the effectiveness of Standard Penetration Test (SPT) and Pressuremeter Test (PMT) methods for determining the bearing capacity of shallow foundations. Using GEO5 Geotechnical Design Program, SPT and PMT test data performed under different ground conditions and the same load were analyzed. Analyzes showed that the PMT method gave significantly higher carrying capacity values than SPT. As a result, it is recommended to evaluate SPT and PMT data together for a more reliable foundation design. The study was supported by data from the Halkalı-Kapıkule Railway Line project.

Keywords*: Bearing capacity, GEO5, Pressuremeter, Standard penetration, Shallow foundations*

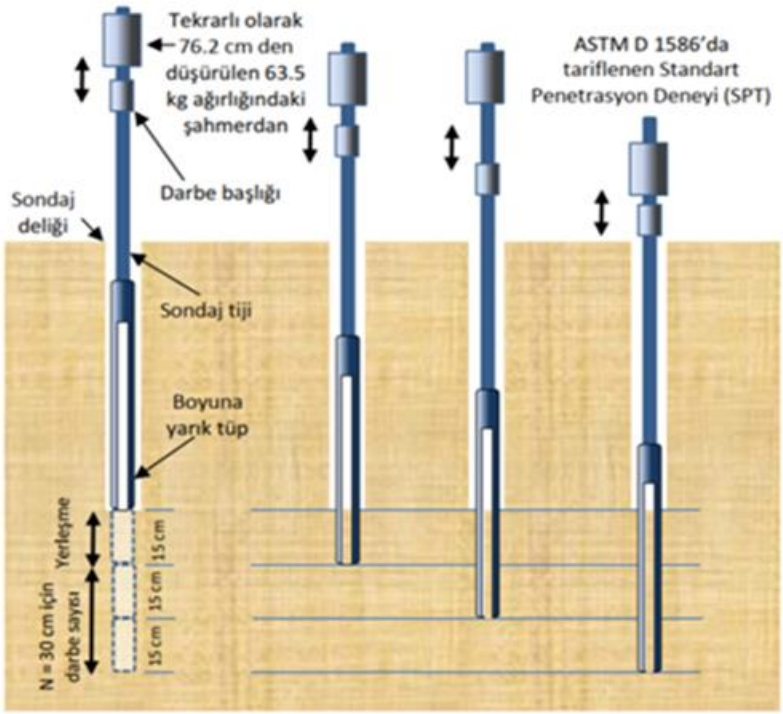
*Zübeyde KANKAN; zubeydesayar@gmail.com

1. Giriş
1. Introduction

Yüzeysel temeller uygulamada en çok yapılan temel çeşitlerinden biridir. Bir temel sisteminin yüzeysel olarak tanımlanabilmesi için temel derinliğinin (Df), temelin kısa kenrına (B) oranının Df / B ≤ 4 şartını sağlaması gerekmektedir (Coduto, 2001; Birand, 2006). Başarılı bir temel sistemi oluşturabilmemin temel şartı temelin oturduğu zeminde kayma göçmesi yani taşıma gücü yenilmesi olmamasıdır (Das, 1999; Kanıt, 2003). En yaygın şekilde kullanılan taşıma gücü belirleme yöntemleri, arazi ve laboratuvar çalışmalarında geliştirilen bağıntılarla parametrik olarak belirlenen yöntemlerdir. Standart Penetrasyon (SPT) ve Presiyometre (PMT) deneyleri, zeminlerin taşıma gücünü belirlemek için yaygın olarak kullanılan saha deney yöntemleridir (Bowles, 1996; Erol & Çekinmez, 2014).

Standart Penetrasyon Testi (SPT) dinamik bir deney olup, 63,5 mm çapında ve 25,4 mm uzunluğunda çelik ucu olan bir penetrometrenin (örnek alıcı) zemine sabit bir hızla (20 cm/sn), 76,2 cm yükseklikten serbest düşürülerek ilerleme miktarının ölçülmesiyle yapılan bir saha deneydir (Pişen & Pekşen, 2016; Önalp & Sert, 2016). Örnek alıcı zemine 15 şer cm' lik ilerlemeler ile toplamda 45 cm penetrasyon sağlayana kadar çakılarak darbe sayıları belirlenir. İlk 15 cm penetrasyon için gerekli darbe sayısı delgi tabanında oluşabilecek örselenmeler nedeniyle dikkate alınmamaktadır. İkinci ve üçüncü toplam 30 cm'lik penetrasyon için gerekli darbe sayısı Standart Penetrasyon Direnci veya (SPT-*N*) olarak tanımlanır. Bu işlem sondaj derinliği boyunca 1,5 m' de bir tekrarlanarak, sonuçlar sondaj derinliği-SPT sayısı arasındaki ilişkiyi gösterecek şekilde sondaj logu adı verilen grafiğe aktarılır. Deney esnasında ilk 15 cm'lik çakmayı sağlamak için yapılan vuruş sayısı, 50'den fazla veya 30 cm toplam çakma için 100'den fazla ise bu kısımdaki SPT-N değeri refü (R) olarak sondaj loguna kaydedilir. Çakma işleminin tamamlanmasının ardından, örnek alıcı kuyudan çıkarılır ve zemin numunesi karot sandıklarında saklanır (Uzuner, 2007; Tonyalı, 2011; Sivrikaya & Toğrol, 2019;). Standart pentrasyon deneyi aşamaları görsel olarak Şekil 1'de verilmiştir.

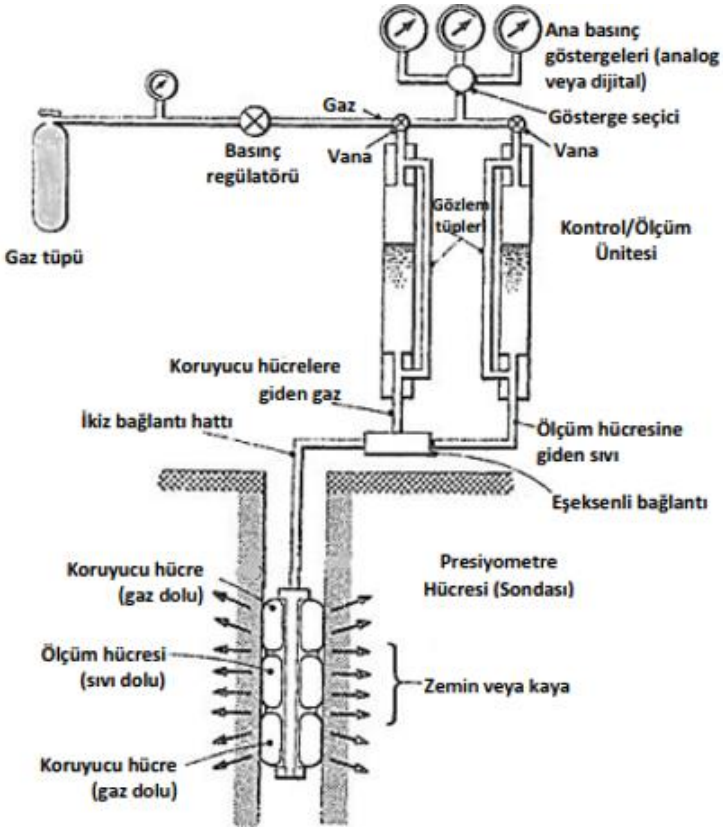
Darbe sayısı, zeminin taşıma gücünün bir göstergesi olarak kullanılır. Deney süresinin kısa olması, deney yapımının kolay olması, deneyin yaygın kullanılması SPT deneyin avantajlarındandır. Sondaj ekipmanından deneyin uygulanmasına kadar birçok değişkene bağlı olması, operatör hatası vb. durumlar deneyin dezavantajlarını oluşturmaktadır (Tonyalı, 2011; Bekdemir & Toprak, 2023).



Şekil 1. Standart penetrasyon deneyi aşamaları (FHWA, 2002b).
Figure 1. *Standard penetration test steps (FHWA, 2002b).*

Presiyometre testi (PMT), bir sondaj kuyusuna düşey olarak yerleştirilen bir sondanın, esnek bir membran aracılığıyla kuyu çeperine eşit şekilde dağıtılan radyal bir basınç uygulamasına dayanan bir yöntemdir. Bu hücre, bir tüp veya kablo aracılığıyla zemin yüzeyindeki ölçüm birimine bağlanarak, uygulanan basınç ve kuyu çeperinde meydana gelen deformasyonların ölçülmesiyle yapılan bir saha deneyidir. Zemine uygulanan gerilmeler ve deformasyonlar aynı anda ölçülebilmektedir, bu özellik presiyometre teknolojisini avantajlı kılar (Yıldız & Yıldırım, 2009).

Menard presiyometre cihazı, kontrol ünitesi, sonda, iletim hortumları ve basınç tüpü olarak başlıca dört ana bölümden oluşmaktadır. Menard Tipi (Kuyu) Presiyometre (MPM), Kendinden Delgili Presiyometre (SBP), Zemine İtilen (Sürmeli) Presiyometre (PIP) olarak uygulamada üç farklı presiyometre tipi kullanılmaktadır (Yıldırım, 2022). Menard tipi presiyometre (MPM) ekipmanlarının görseli Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Standart presiyometre (MPM) cihazı ekipmanları (Mair & Wood, 1987).
Figure 2*. Pressure meter equipment (Mair & Wood, 1987).*

Genel olarak presiyometre düzenekleri 2.5 MPa ila 10 MPa basınç kapasiteli olarak üretilmektedir. Bu değerler sert zeminler ve zayıf kayalarda 10 MPa ila 20 MPa aralığında yer almaktadır. İdeal olarak limit basınç değerine 15 ila 20 basınç kademesinde ulaşılması önerilmektedir. Basınç kademeleri maksimum yumuşak killerde 15 kPa, sert killerde 50 kPa ve zayıf kayalarda 100 kPa olarak uygulanmaktadır. Her basınç kademesi 1 veya 2 dakika sabit tutularak ve 15'inci, 30'uncu, 60'ıncı ve 120'nci saniyelerde hacim değişimleri kaydedilir. Deneyde kontrol ünitesinde okunan basınç ve hacim değerleri gerçekte zemine uygulanan basınç ve hacim genişlemesi değerleri değildir. Deney sonuçlarını doğru bir şekilde yorumlamak için hacim ve basınç düzeltmeleri yapılmalıdır (Clarke, 1995).

PMT deneyinde, zemine uygulanan basınç, SPT deneyinde uygulanan darbe sayısına göre daha hassas bir şekilde kontrol edilebilir (Yıldırım, 2009; Koçak, 2017).

Temel tasarımında zemin taşıma gücünün doğru ve güvenilir bir şekilde belirlenebilmesi için zemin özelliklerinin derinlemesine incelenmesi gerekmektedir. Zemin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan saha deneyleri ve laboratuvar deneyleriyle taşıma gücü kapasitesi belirlenmesine yönelik bugüne kadar birçok araştırma yapılırken SPT ve PMT deneyi taşıma gücü kapasitesi karşılaştırmasının yapıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Presiyometre Testi (PMT) gibi saha

deneylerinin, zemin taşıma gücünün belirlenmesindeki etkinliğini karşılaştırarak, hangi yöntemlerin yüzeysel temel tasarımında daha uygun olduğunu belirlemeye yönelik bilgi sunmayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve metot
2. Material and method

Bu çalışmada 2020 yılında yapımına başlanan ve yapımı hâlâ devam eden Halkalı-Kapıkule Demiryolu Hattı projesi Çerkezköy-Kapıkule Kesiminde Km: 208+800' de yapılan SPT ve PMT deney verilerinden yararlanılmıştır. Geo5 Geoteknik Programı kullanılarak yüzeysel temel taşıma gücü, boyutlandırma ve zımbalama tahkik analizleri yapılmıştır. Temele gelen yük, temel derinliği ve temel boyutları sabit tutularak farklı zemin türlerinde yüzeysel temel taşıma gücü analizleri yapılmıştır.

SPT ve PMT verileri, Geo5 Geoteknik Tasarım Programı'nın Yüzeysel Temel SPT-CPT-PMT modülüne aktarılmıştır. Programda kullanılan yüzeysel temel taşıma gücü hesap metodolojisi olarak SPT deneylerinde Meyehof hesap yöntemi kullanılmıştır. PMT deneylerindeyse "NF P94-261 Fransız satandardı olarak tanımlanan hesap yöntemi Menard yüzeysel taşıma gücü yöntemi kullanılmıştır.

SPT deneyi ile Meyerhof yüzeysel temel taşıma gücü yöntemi

Meyerhof (1951, 1963), tarafından geliştirilen yüzeysel temellerde zeminin nihai taşıma gücü bağıntısına, temel şekil ve derinlik faktörlerinin eklemiş olduğu formülü Denklem 1'de, yükün eğimli olması durumunda geliştirdiği formül Denklem 2' de, taşıma gücü faktörlerinin fomülü Denklem 3, Denklem 4 ve Denklem 5'te verilmiştir. Temel şekil, derinlik ve eğim faktörleri hesaplamaları Şekil 3'te vertilmiştir (Bowles, 1996; Dağlı, 2013).

$$q_n = c * N_c * s_c * d_c + q * N_q * s_q * d_q + \frac{1}{2} * \gamma * B' * N_\gamma * s_\gamma * d_\gamma \quad (1)$$

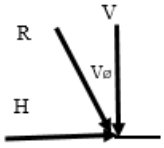
$$q_n = c * N_c * s_c * d_c + q * N_q * s_q * d_q + \frac{1}{2} * \gamma * B' * N_\gamma * s_\gamma * d_\gamma \quad (2)$$

$$\mathrm{N_c} = \left(\mathrm{N_q} - 1\right) * \cot\Phi \quad (3)$$

$$\mathrm{N_q} = e^{(\pi * tan\Phi)} * tan^2 * (45 + \frac{\Phi}{2}) \quad (4)$$

$$\mathrm{N_\gamma} = \left(N_\gamma - 1\right) * \tan\left(1.4\Phi\right) \quad (5)$$

$$\mathrm{K_p} = tan^2(45 + \frac{\Phi}{2}) \quad (6)$$

Faktörler	*Formüller*	
Şekiller:	$s_c = 1 + 0.2K_p\frac{B}{L}$	*tüm Φ'ler için*
	$s_q = s_\gamma 1 + 0.1K_p\frac{B}{L}$	$\Phi > 10°$
	$s_q = s_\gamma = 1$	$\Phi = 0$
Derinlik:	$d_c = 1 + 0.2\sqrt{K_p}\frac{D}{B}$	*tüm Φ'ler için*
	$d_q = d_\gamma = 1 + 0.1\sqrt{K_p}\frac{D}{B}$	$\Phi > 10°$
	$d_q = d_\gamma = 1$	$\Phi = 0$
Eğim:	$i_c = i_q = (1 - \frac{\theta^\circ}{90^\circ})^2$	*tüm Φ'ler için*
	$i_\gamma = (1 - \frac{\theta^\circ}{\Phi^\circ})^2$	$\Phi > 0$
	$i_\gamma = 0 \quad \theta > 0$	$\Phi = 0$

Şekil 3. Meyerhof s_i, d_i, i_i faktörleri hesaplamaları (Bowles, 1996).
Figure 3. *Meyerhof s_i, d_i, i_i factors calculations (Bowles, 1996).*

Kullanılan sembollerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.
q_n: Zeminin nihai taşıma gücü
c: Temel altındaki zemin efektif kohezyonu
Φ: Zeminin içsel sürtünme açısı,
q: Temel derinliğindeki efektif düşey gerilme
L: Temelin uzun kenar boyutu
B: Temel genişliği
D:Temel derinliği
γ: Zemin birim hacim ağırlığı
N_c, N_q ve N_γ : Taşıma gücü faktörleri
d_c, d_q ve d_γ : Derinlik faktörleri
s_c, s_q ve s_γ : Temel şekil faktörleri
i_c, i_q ve i_γ : Yük eğim faktörleri
θ: Bileşke yük R'nin düşeyle yaptığı açı. Bu açı değeri, 0 olduğunda Meyerhof formülünde kullanılan tüm yük eğim faktörleri 1 değerini almaktadır
K_p: Pasif toprak basıncı katsayısı formülü Denklem 6'da verilmiştir.

PMT deneyi ile Menard yüzeysel temel taşıma gücü yöntemi

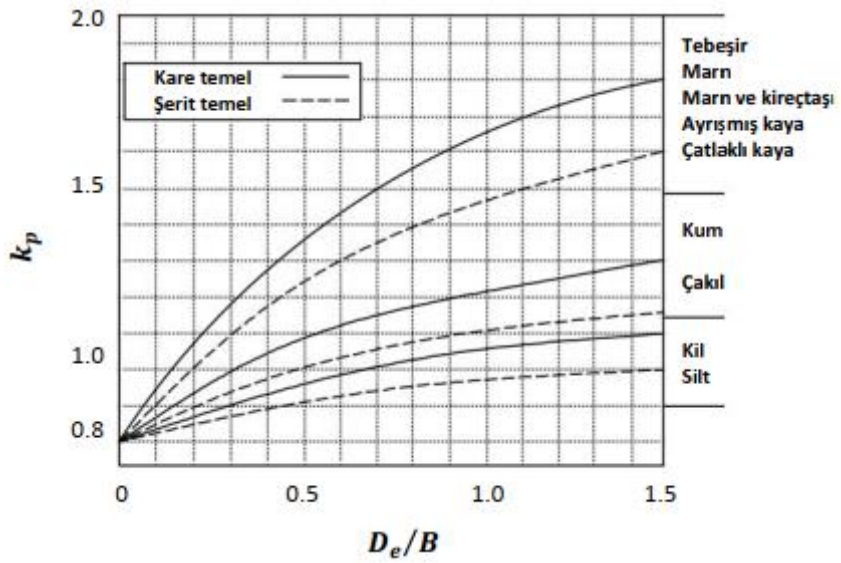
Menard (1963) tarafından geliştirilen yüzeysel temellerde zeminin nihai taşıma gücü bağıntısı Denklem 7, Denklem 8 ve Denklem 9'da verilmiştir (Clarke, 1995).

$$q_{ult} = \left(k_p * \mathrm{P}_{LNe}\right) + \sigma_{vo} \quad (7)$$

$$q_{LNe} = \sqrt[n]{P_{LN1}} * P_{LN2} * \ldots * P_{LNn} \quad (8)$$

$$q_{LNe} = \frac{1}{P_{LNe}} + \sum_0^{Df}(P_{LNi} * \Delta_{Zi}) \quad (9)$$

Kullanılan sembollerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.
k_p: Taşıma gücü faktörü Şekil 4' te verilen grafikten belirlenmektedir,
P_{LNe}: Eşdeğer net limit basınç,
P_{LNi}: Temel tabanından 1.5B derinlikteki net limit basınç değerleri,
B: Temel genişliği,
D_e: Eşdeğer temel derinliği,
D_f: Temel derinliği,
Δ_{zi} = Temel derinliğinde yer alan farklı P_{LNi} değerlerine sahip katman kalınlıkları,



Şekil 4. Yüzeysel temeller için taşıma gücü faktörü (Clarke,1995).
Figure 4*. Bearing capacity factor for shallow foundations (Clarke,1995).*

2.1. SPT verileri ile GEO5 programında yüzeysel temel tasarımı
2.1. Shallow foundation design in GEO5 program with SPT data

Temelin oturacağı zeminin profilini oluşturmak için SPT verileri GEO5 programına aktarılmıştır. Sondaj logundaki her bir veri, darbe sayısı (N), yeraltı suyu seviyesi (YASS), sondaj kotu, zemin katmanları ve zemin sınıfları (UCSC) bilgileri tablo haline getirilerek programa aktarılmıştır.

SK208+800A verisi Tablo 1'de, SK208+800C verisi Tablo 2'de, SK208+800E verisi Tablo 3'te, SK208+800H verisi Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 1. SK-208+800A Sondajı zemin verileri
Table 1. *SK-208+800A Borehole ground data*

SPT No	Derinlik d (m)	N1	N2	N3	N30	Katman Derinlik (m)	Katman Tanım	UCSC
1	1.50	3	5	6	11	0.00-3.50	Kumlu KİL	CL
2	3.50	5	6	8	14			
3	4.50	5	7	7	14	3.50.-5.50	Killi kum	SC
4	6.50	10	8	7	15	5.50-10.20	Kumlu KİL	CL
5	7.50	11	12	14	26			
6	9.50	12	15	16	31			
7	10.50	11	14	18	32			
8	12.50	24	25	35	60	10.20-20.50	Çakıllı KUM	SP
9	13.50	22	27	37	64			
10	15.00	20	23	42	65			
11	16.50	21	33	38	71			
12	18.00	23	36	39	75			
13	19.50	20	38	41	79			
14	21.00	22	26	34	60	20.50-28.00	Siltli KİL	CL
15	22.50	24	28	37	65			
16	24.00	20	39	45	84			
17	25.50	20	40	47	87			
18	27.00	24	42	45	87			
19	28.50	40	50	50	100	28.00-30.50	Killi KUM	SC
20	30.00	36	50	50	100			

SK-208+800A sondaj kuyusunda yapılan ölçümlerde sondaj kotu 39.03 m olup, yeraltı su seviyesi (YASS) 8.00 m derinlikte tespit edilmiştir.

Tablo 2. SK-208+800C Sondajı zemin verileri
Table 2. *SK-208+800C Borehole ground data*

SPT No	Derinlik d (m)	N1	N2	N3	N30	Katman Derinlik (m)	Katman Tanım	UCSC
1	1.50	4	7	7	14	0.00-7.60	Siltli KİL	CL
2	3.50	3	5	5	10			
3	4.50	4	5	6	11			
4	6.50	8	7	8	15			
5	7.50	5	6	8	14	7.60-19.60	Çakıllı KUM	SM-GM
6	9.50	13	15	25	40			
7	10.50	22	36	32	68			
8	12.50	38	35	40	75			
9	13.50	3	50	50	100			
10	15.00	40	31	31	62			
11	16.50	37	50	50	100			
12	18.00	40	50	50	100			
13	19.50	17	32	40	72			

14	21.00	25	31	38	69	19.60-28.60	Kumlu KİL	CL
15	22.50	29	34	41	75			
16	24.00	28	38	62	100			
17	25.50	19	24	25	49			
18	27.00	10	18	27	45			
19	28.50	38	50	50	100	28.60-34.95	Siltli KUM	SM
20	30.00	15	46	54	100			
21	31.50	38	12	88	100			
22	33.00	25	38	62	100			
23	34.5	19	30	70	100			

SK-208+800C sondaj kuyusunda yapılan ölçümlerde sondaj kotu 38.99 m olup, yeraltı su seviyesi (YASS) 8.25 m derinlikte tespit edilmiştir.

Tablo 3. SK-208+800E Sondajı zemin verileri
Table 3. *SK-208+800E Borehole ground data*

SPT No	Derinlik d (m)	N1	N2	N3	N30	Katman Derinlik (m)	Katman Tanım	UCSC
1	1.50	12	19	18	37	0.00-9.50	Siltli KİL	CL
2	3.50	4	8	11	19			
3	4.50	5	7	10	17			
4	6.50	12	14	10	24			
5	7.50	4	6	7	13			
6	9.50	3	3	4	7	9.50-19.70	Çakıllı Siltli KUM	SC
7	10.50	8	13	20	33			
8	12.00	12	20	21	41			
9	13.50	15	27	22	49			
10	15.00	14	21	31	52			
11	16.50	16	26	29	55			
12	18.00	22	29	71	100			
13	19.50	13	50	50	100			
14	21.00	27	41	59	100	19.70-27.50	Kumlu KİL	CL
15	22.50	34	12	88	100			
16	24.00	11	50	50	100			
17	25.50	21	36	64	100			
18	27.00	20	30	70	100			

SK-208+800E sondaj kuyusunda yapılan ölçümlerde sondaj kotu 39.50 m olup, yeraltı su seviyesi (YASS) 8.60 m derinlikte tespit edilmiştir.

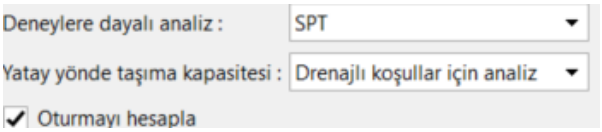
Tablo 4. SK-208+800H Sondajı zemin verileri
Table 4. *SK-208+800H Borehole ground data*

SPT No	Derinlik d (m)	N1	N2	N3	N30	Katman Derinlik (m)	Katman Tanım	UCSC
1	1.50	5	6	7	13	0.00-10.00	Kumlu KİL	CL
2	3.50	5	8	12	20			
3	4.50	5	5	10	15			
4	6.50	7	10	14	24			
5	7.50	9	12	16	28			
6	9.50	5	5	10	15			
7	10.50	10	15	18	33	10.00-22.00	Çakıllı KUM	SP
8	12.00	14	20	26	46			
9	13.50	20	24	32	56			
10	15.00	20	50	50	100			
11	16.50	8	11	16	27			
12	18.00	18	20	24	44			

13	19.50	20	26	34	60			
14	21.00	30	40	60	100			
15	22.50	13	50	50	100	22.00-30.45	Siltli KİL	CL
16	24.00	24	26	38	64			
17	25.50	26	28	42	70			
18	27.00	24	40	45	85			
19	28.50	26	44	48	92			
20	30.00	24	41	45	86			

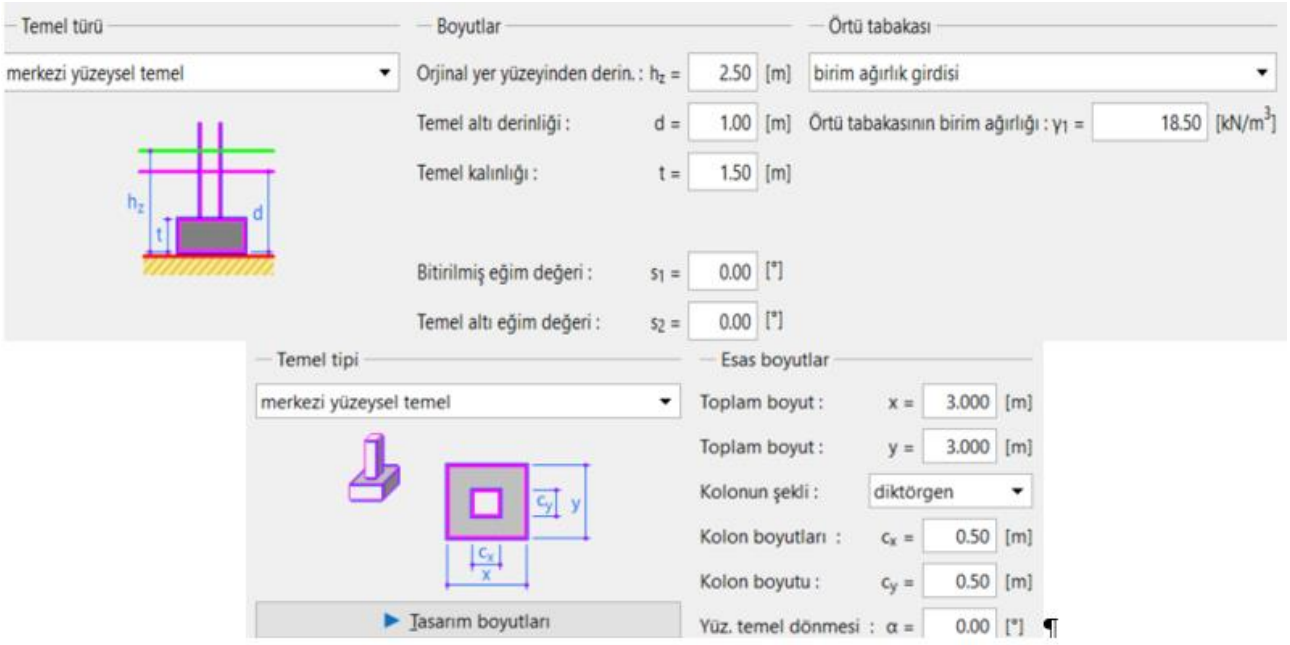
SK-208+800H sondaj kuyusunda yapılan ölçümlerde sondaj kotu 40.04 m olup, yeraltı su seviyesi (YASS) 8.80 m derinlikte tespit edilmiştir.

Verileri programa aktarırken, ayarlar sekmesindeki SPT deneyine dayalı analiz bölümünde yalnızca analiz türü olarak sadece "Meyerhof" yönteminin (programın taşıma gücü yaklaşımı olarak yalnızca Meyerhof yöntemini sunması) tercih edilebilmesi, süreci sınırlayan faktörlerden biridir. Yatay yönde taşıma kapasitesi için de "Drenajlı Durum" seçilmiştir. Bu veriler Şekil 5'te verilmiştir.



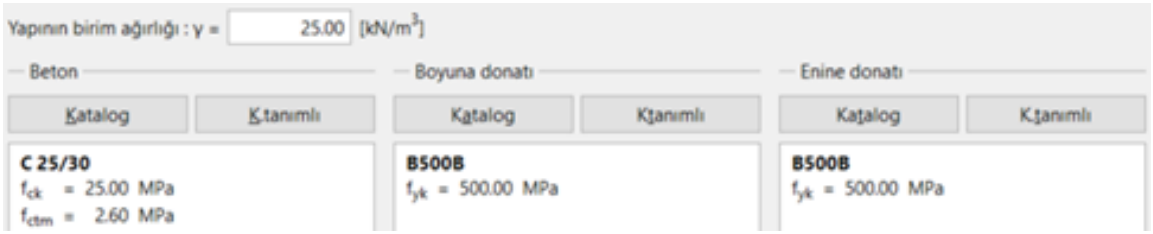
Şekil 5. Analiz için kullanılan yöntemlerin tayini
Figure 5. *Determining the methods used for analysis*

Temel geometrisi Şekil 6'da gösterildiği gibi, temel tipi olarak "merkezi yüzeysel temel", temel boyutları 3,00 m x 3,00 m kare, temelin kalınlığı 1,50 m, kolon ebatları 0,50 m x 0,50 m olarak seçilmiştir.



Şekil 6. Analiz için kullanılan yöntemlerin tayini
Figure 6. *Determination of methods used for analysis*

Yapılan tasarımdaki temel malzemesi Şekil 7'de ve temele gelen yük Şekil 8'de gösterilmektedir.

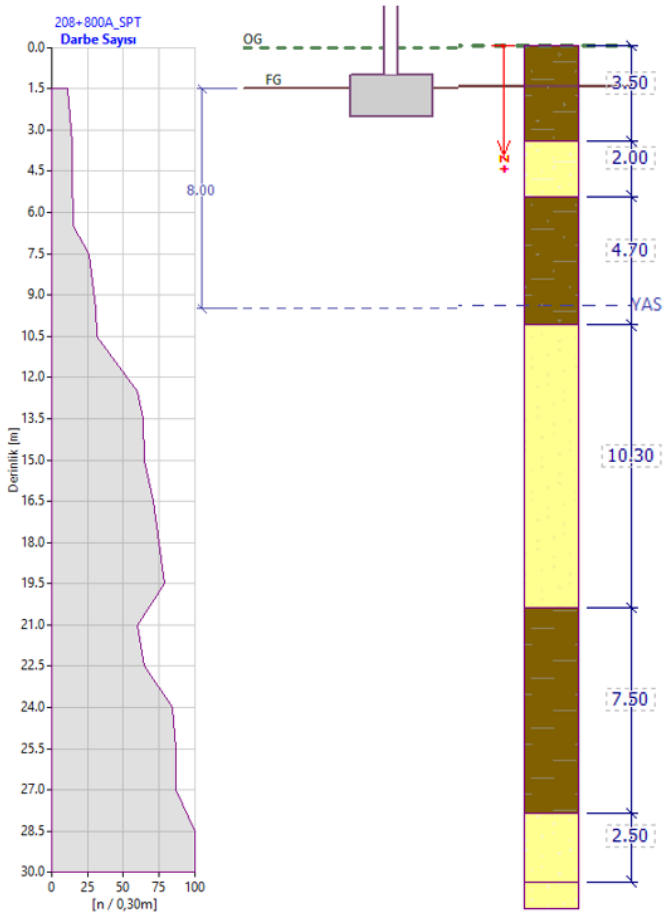


Şekil 7. Temel malzeme özellikleri tayini
Figure 7. *Determination of foundation material properties*

Sayı	Yük		Ad	N
	yeni	düzenle		[kN]
1	Evet		Yük no. 1	300.00

Şekil 8. Temele etkiyen yük tayini
Figure 8. Load determination on the foundation

Sonrasında, değerler tablodan alınarak SPT bölümüne aktarılmıştır. Programa girilen veriler Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. SPT verilerinin girilmesi
Figure 9. *Entering SPT data*

Zemin modelinin oluşturulmasında, zeminin plastisitesi, kıvamı ve tane büyüklüğü dağılımı (derecelenme) gibi önemli parametreler incelenerek, daha gerçekçi bir model elde edilmiştir. SK-208+800A Şekil 10'da, SK-208+800C Şekil 11'de, SK-208+800C Şekil 12'de ve SK-208+800H Şekil 13'te sondajların zemin parametreleri verilmiştir.

Sayı	Ad	Desen	φef [°]	cef [kPa]	γ [kN/m³]	γsu [kN/m³]	δ [°]
1	Kumlu kil (CS), yumuşak kıvam		24.50	14.00	18.50	9.50	
2	Killi kum (SC)		27.00	8.00	18.50	9.00	
3	Kumlu kil (CS), katı kıvam, Sr > 0.8		24.50	18.00	18.50	9.50	
4	Kötü derecelenmiş kum (SP), orta sıkı		33.50	0.00	18.50	9.00	
5	Düşük veya orta plastisiteli Kil (CL, CI), çok katı kıvam, Sr > 0.8		19.00	24.00	18.50	9.50	
6	İyi derecelenmiş kum (SW), sıkı		39.50	0.00	18.50	9.00	

Şekil 10. SK-208+800A Sondajı zemin parametreleri
Figure 10. *SK-208+800A Borehole ground parameters*

Sayı	Ad	Desen	φef [°]	cef [kPa]	γ [kN/m³]	γsu [kN/m³]	δ [°]
1	Düşük veya orta plastisiteli Kil (CL, CI), yumuşak kıvam		19.00	12.00	18.50	9.50	
2	Siltli çakıl (GM)		32.50	4.00	18.50	9.00	
3	Kumlu kil (CS), çok katı kıvam, Sr > 0.8		24.50	26.00	18.50	9.50	
4	Siltli kum (SM)		29.00	5.00	18.50	9.00	

Şekil 11. SK-208+800C Sondajı zemin parametreleri
Figure 11. *SK-208+800C Borehole ground parameters*

Sayı	Ad	Desen	φef [°]	cef [kPa]	γ [kN/m³]	γsu [kN/m³]	δ [°]
1	Düşük veya orta plastisiteli Kil (CL, CI), sert kıvam		19.00	12.00	18.50	9.50	
2	Killi kum (SC)		27.00	8.00	18.50	9.00	
3	Kumlu kil (CS), çok katı kıvam, Sr > 0.8		24.50	26.00	18.50	9.50	

Şekil 12. SK-208+800E Sondajı zemin parametreleri
Figure 12. *SK-208+800E Borehole ground parameters*

Sayı	Ad	Desen	φef [°]	cef [kPa]	γ [kN/m³]	γsu [kN/m³]	δ [°]
1	Kumlu kil (CS), yumuşak kıvam		24.50	14.00	18.50	9.50	
2	Kötü derecelenmiş kum (SP), sıkı		35.50	0.00	18.50	9.00	
3	Düşük veya orta plastisiteli Kil (CL, CI), çok katı kıvam, Sr > 0.8		19.00	24.00	18.50	9.50	

Şekil 13. SK-208+800H Sondajı zemin parametreleri
Figure 13. *SK-208+800H Borehole ground parameters*

Tasarımda temel boyutları, temel malzemesi ve temele gelen yük sabit tutularak 4 farklı sondaj için SPT verileri girilerek analizler yapılmıştır.

2.2. PMT Verileri ile GEO5 programında yüzeysel temel tasarımı
2.2.Shallow foundation design in GEO5 program with PMT data

Temelin oturacağı zeminin profilini oluşturmak için PMT verileri GEO5 programına aktarılmıştır PMT' de yer alan her bir veri, net limit basınç (PLnet), ve elastisite modülü (E_P) yeraltı suyu seviyesi (YASS), kuyu kotu, değerlerini gösterecek şekilde tablo haline getirilerek programa aktarılmıştır.

YASS seviyeleri için presiyometre deneyi yapılırken tekrar ölçüm alınmıştır. YASS seviyeleri SPT deney verileriyle kıyaslandığında ihmal edilebilir seviyede, 0.10 m ve 0.40 m aralığında-farklılıklar tespit edilmiştir. SK208+800A verisi Tablo 5'te, SK208+800C verisi Tablo 6'da, SK208+800E verisi Tablo 7'de, SK208+800H verisi Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 5. SK-208+80A PMT verileri
Table 5. SK-208+800A PMT data

PMT No	PMT No	PL_{NET} kg/cm²	E_P kg/cm²	Katman Derinlik (m)	Katman Tanım	UCSC
1	0.00	7.42	50	0.00-3.50	Kumlu KİL	CL
2	5.00	7.42	50	3.50-5.50	Killi kum	SC
3	10.00	10.94	138	5.50-10.20	Kumlu KİL	CL
4	16.50	18	127	10.20-20.50	Çakıllı KUM	SP
5	21.50	18.98	187	20.50-28.00	Siltli KİL	CL
6	25.00	23	464			
7	30.00	21	197	28.00-30.50	Killi KUM	SC

SK-208+800A sondaj kuyusunda yapılan ölçümlerde, yeraltı su seviyesi (YASS) 8.40 m derinlikte tespit edilmiştir.

Tablo 6. SK-208+80C PMT verileri
Table 6. SK-208+800C PMT data

PMT No	Derinlik m	PL_{NET} kg/cm²	E_P kg/cm²	Katman Derinlik (m)	Katman Tanım	UCSC
1	0.00	7.12	82	0.00-7.60	Siltli KİL	CL
2	5.00	7.12	82			
3	10.00	3.07	47	7.60-19.60	Çakıllı KUM	SM-GM
4	16.00	1.26	16			
5	20.00	20.22	277	19.60-28.60	Kumlu KİL	CL
6	25.00	22.98	171			
7	30.00	23.13	408	28.60-34.95	Siltli KUM	SM
8	35.00	19.45	415			

SK-208+800C sondaj kuyusunda yapılan ölçümlerde, yeraltı su seviyesi (YASS) 8.25 m derinlikte tespit edilmiştir.

Tablo 7. SK-208+80E PMT verileri
Table 7. SK-208+800E PMT data

PMT No	Derinlik m	PL_{NET} kg/cm²	E_P kg/cm²	Katman Derinlik (m)	Katman Tanım	UCSC
1	0.00	9.8	116	0.00-9.50	Siltli KİL	CL
2	5.00	9.8	116			
3	10.00	0.48	5	9.50-19.70	Çakıllı Siltli KUM	SC
4	16.50	0.44	18			
5	20.00	22.01	338	19.70-27.50	Kumlu KİL	CL
6	25.00	22.8	316			

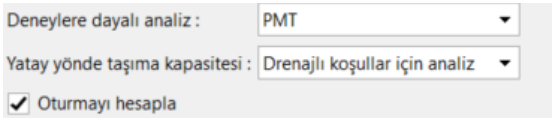
SK-208+800E sondaj kuyusunda yapılan ölçümlerde, yeraltı su seviyesi (YASS) 8.60 m derinlikte tespit edilmiştir.

Tablo 8. SK-208+80H PMT verileri
Table 8. SK-208+800H PMT data

PMT No	Derinlik m	PL_{NET} kg/cm^2	E_P kg/cm^2	Katman Derinlik (m)	Katman Tanım	UCSC
1	0.00	12.2	80	0.00-10.00	Kumlu KİL	CL
2	5.00	12.2	80			
3	10.00	4.49	32	10.00-22.00	Çakıllı KUM	SP
4	16.50	2.72	12			
5	21.00	20.67	198			
6	27.50	18.05	179	22.00-30.45	Siltli KİL	CL

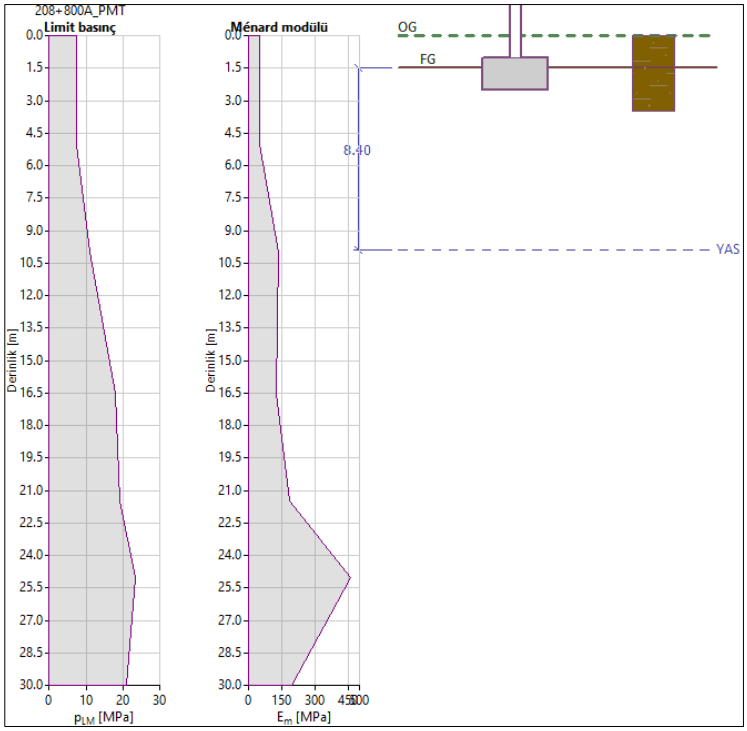
SK-208+800H sondaj kuyusunda yapılan ölçümlerde, yeraltı su seviyesi (YASS) 8.90 m derinlikte tespit edilmiştir.

Verileri programa aktarırken, ayarlar sekmesindeki PMT deneyine dayalı analiz bölümünde yalnızca analiz türü olarak sadece "NF P94-261" yönteminin (programın taşıma gücü yaklaşımı olarak yalnızca Fransız standardı yöntemini sunması) tercih edilebilmesi, süreci sınırlayan faktörlerden biridir. Yatay yönde taşıma kapasitesi için de "Drenajlı Durum" seçilmiştir. Bu veriler Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. PMT analizi için kullanılan yöntemlerin tayini
Figure 14*. PMT analizi için kullanılan yöntemlerin tayini*

PMT tasarımı için zemin profili ve zemin parametreleri SPT verileri ile aynı alınmıştır. Temel boyutu, temel malzemesi ve temele gelen yük sabit tutulmuştur.
Sonrasında, değerler tablodan alınarak SPT bölümüne aktarılmıştır. Programa girilen veriler Şekil 15'te gösterilmiştir.

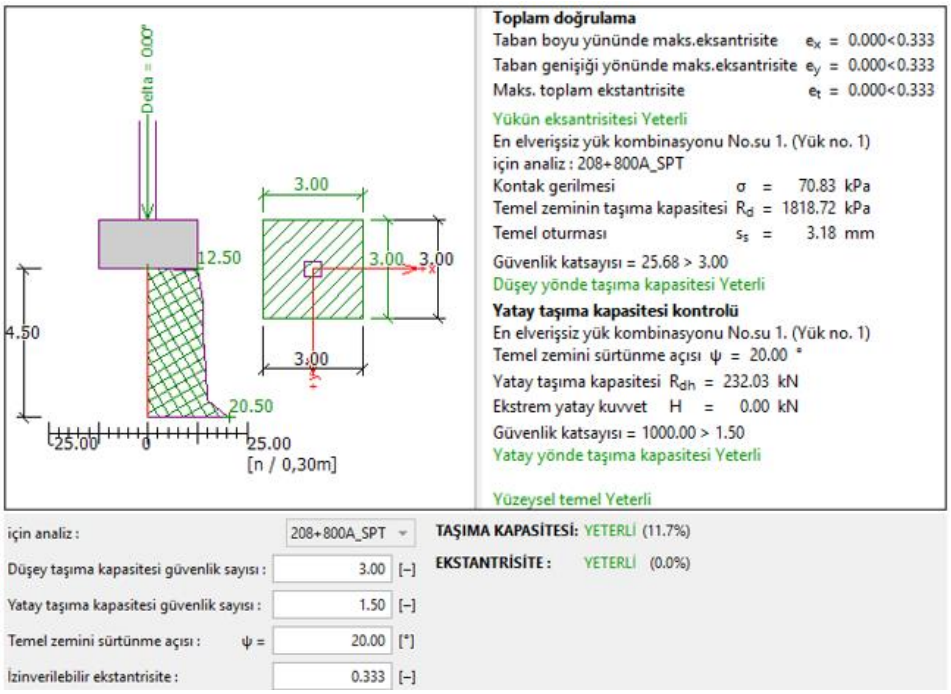


Şekil 15. PMT verilerinin girilmesi
Figure 15. *Entering PMT data*

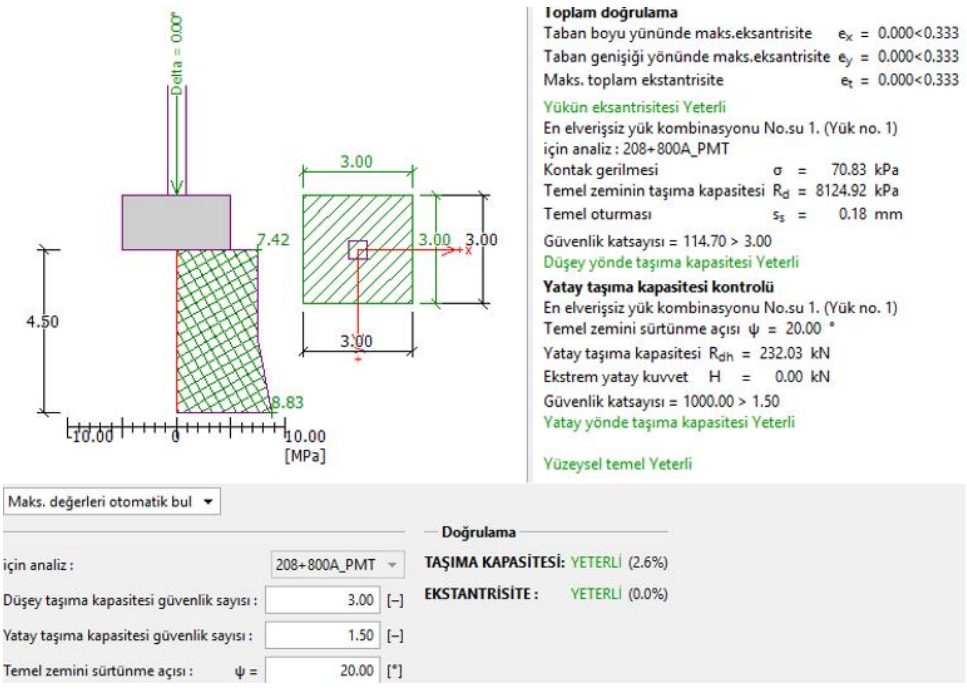
SPT analizi için yapılan adımlar tekrarlanarak 4 farklı kuyu için PMT verileri girilerek analizler yapılmıştır.

3. Bulgular
3. Results

SPT ve PMT verileri programa aktarıldan sonra analiz aşamasına geçilmiştir. Analizin sonunda, verilen analiz ekranında planlanan temel için zeminin taşıma kapasitesinin yeterli olup olmadığını göstermektedir. Taşıma kapasitesinin yeterli olduğunu gösteren sonuç elde edilene kadar temel tasarımın gerekli değişikler yapılmıştır. SK-208+800A sondajında, SPT için Şekil 16'da, PMT için ise Şekil 17'de analiz ekranı görülmektedir. Belirlenen 3,00 m x 3,00 m temel boyutları ile yapılan analizlerin sonuçları incelendiğinde, temel boyutunun yeterli olduğu görülmüş ve boyutlarda değişiklik yapılmamıştır.

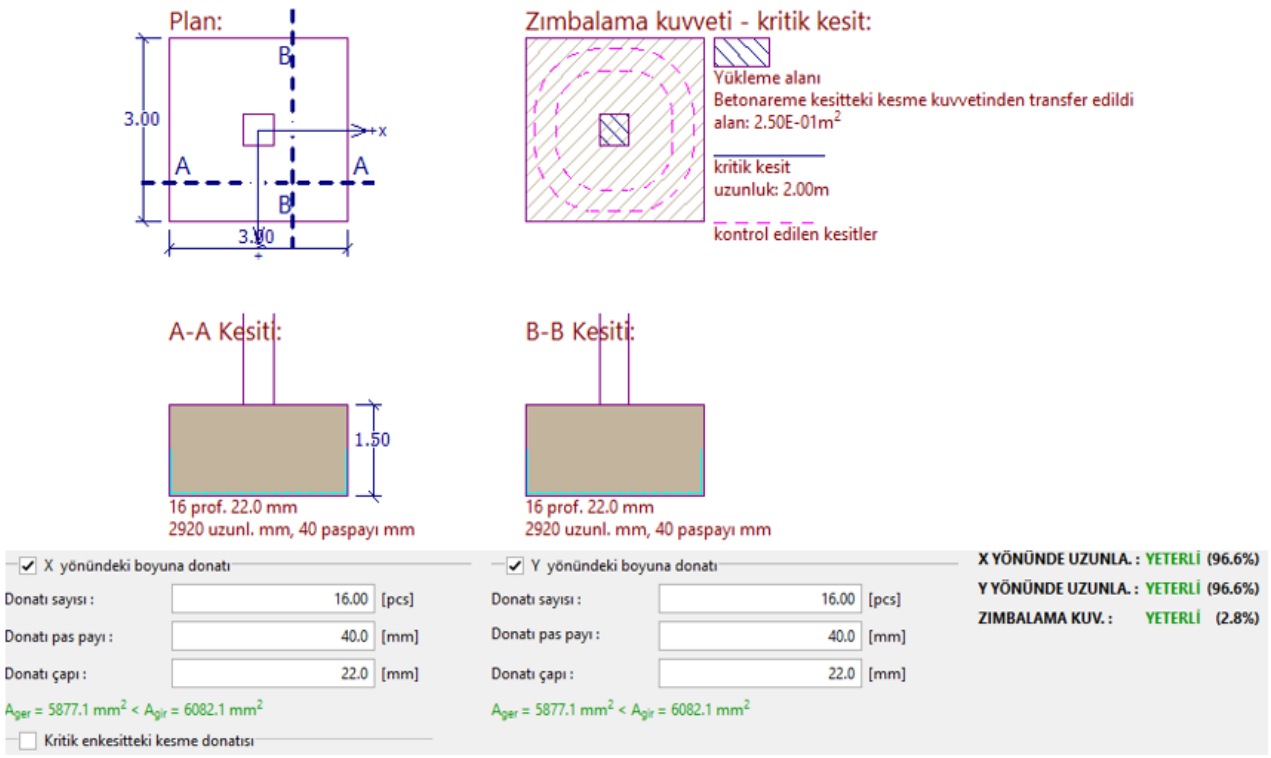


Şekil 16. SPT analiz sonuçları
Figure 16*. SPT analysis results*



Şekil 17. PMT analiz sonuçları
Figure 17. *PMT analysis results*

Boyutlandırma aşamasında, planlanan temele uygun donatı miktarı ve zımbalama tahkikleri yapılmıştır. Bu doğrultuda, X yönünde boyuna donatı 16 adet, 22 mm çapında; Y yönünde boyuna donatı ise 16 adet, 22 mm çapında olarak seçilmiştir. Yük ve temel boyutlarının sabit olması nedeniyle, bütün analizlerde donatı miktarı ve zımbalama kuvveti aynı kalmıştır. SK-208+800A sondajında, SPT ve PMT için Şekil 18'de, analiz ekranı görülmektedir.



Şekil 18. SPT ve PMT verilerine göre temel boyutları
Figure 18. *Foundation dimensions according to SPT data*

Dört adet sondaj kuyusunda SPT ve PMT deneylerinden faydalanılarak yukarıdaki adımlar izlenmiş ve sekiz adet analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar tablo haline getirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları Tablo 9'da sunulmaktadır.

Tablo 9. SK-208+800A SPT ve PMT için analiz sonuçları
Table 9. *Analysis results for SK-208+800A SPT and PMT*

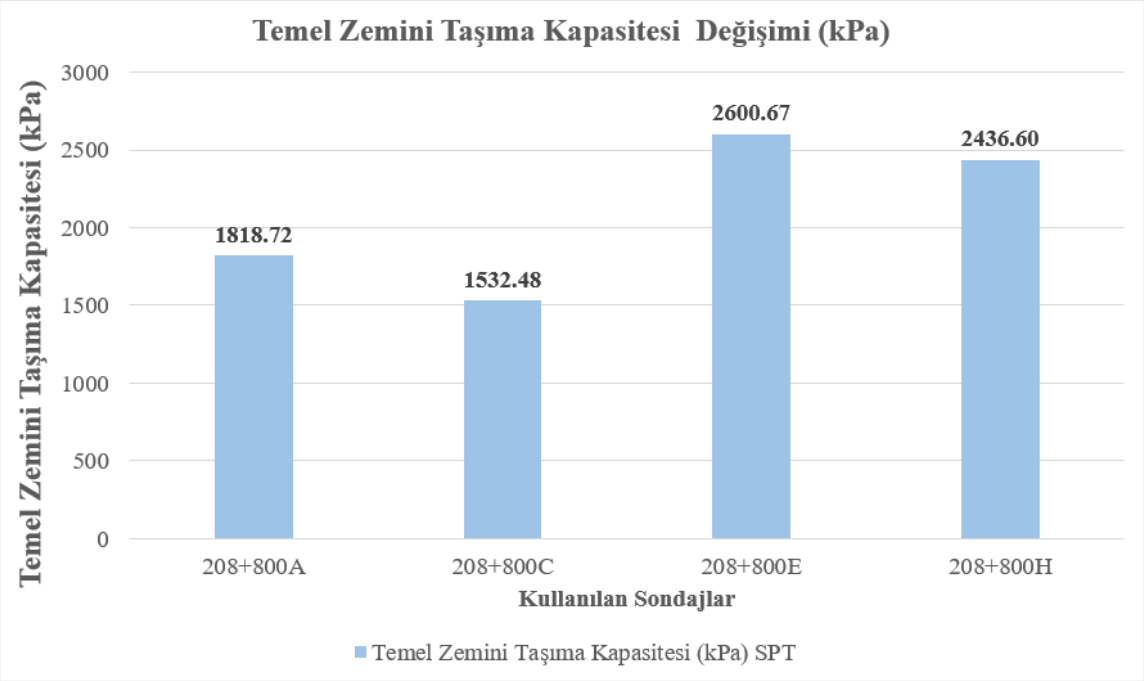
Sondaj No	Analiz Sonuçları	Kontak Gerilmesi σ (kPa)	Temel Zemini Taşıma Kapasitesi R_d (kPa)	Güvenlik Katsayısı 3 <	Temel Tasarımında Yapılan Değişiklik
SK-208+800A	**SPT**	70.83	1818.72	25.67	
	PMT	70.83	8124.92	114.71	
SK-208+800C	**SPT**	70.83	1532.48	21.63	Donatı sayısı ve çapı
	PMT	70.83	6241.01	88.11	arttırıldı.
SK-208+800E	**SPT**	70.83	2600.67	36.71	X Yönünde Donatı: 16Ø22
	PMT	70.83	8266.73	116.71	Y Yönünde Donatı: 16Ø22
SK-208+800H	**SPT**	70.83	2436.60	34.40	
	PMT	70.83	10629.96	150.07	

4. Tartışma ve sonuçlar
4. Discussion and conclusions

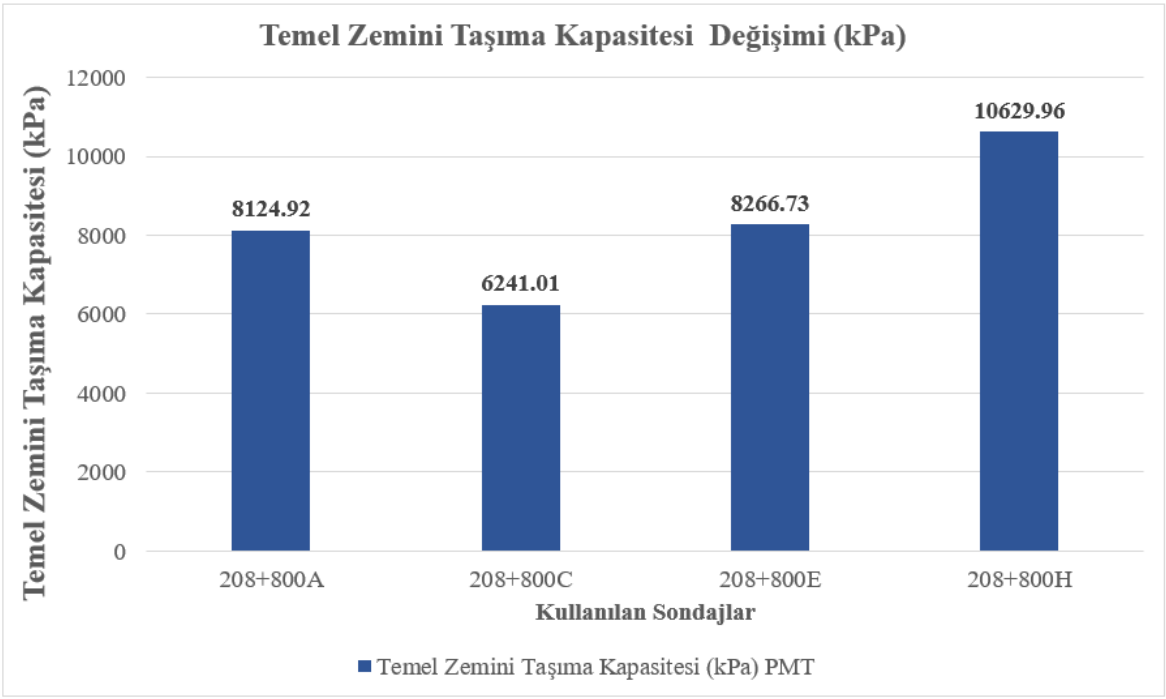
Bu çalışmada dört farklı sondaj kuyusunda yapılan SPT ve PMT verisi kullanılarak aynı yük ve temel boyutları için yüzeysel temel taşıma gücü analizleri yapılmıştır. Literatürde taşıma gücü analizlerinde "FS" güvenlik kat sayısının genellikle 2,5 ila 3,5 değerleri arasında olduğu belirtilmektedir (Das, 1999; Kanıt,

2003). Geo5 programıda yüzeysel temel taşıma gücü analizlerindende araştırmacılar tarafından önerilen güvenlik kat sayısı 3 değerini kullanmaktadır.

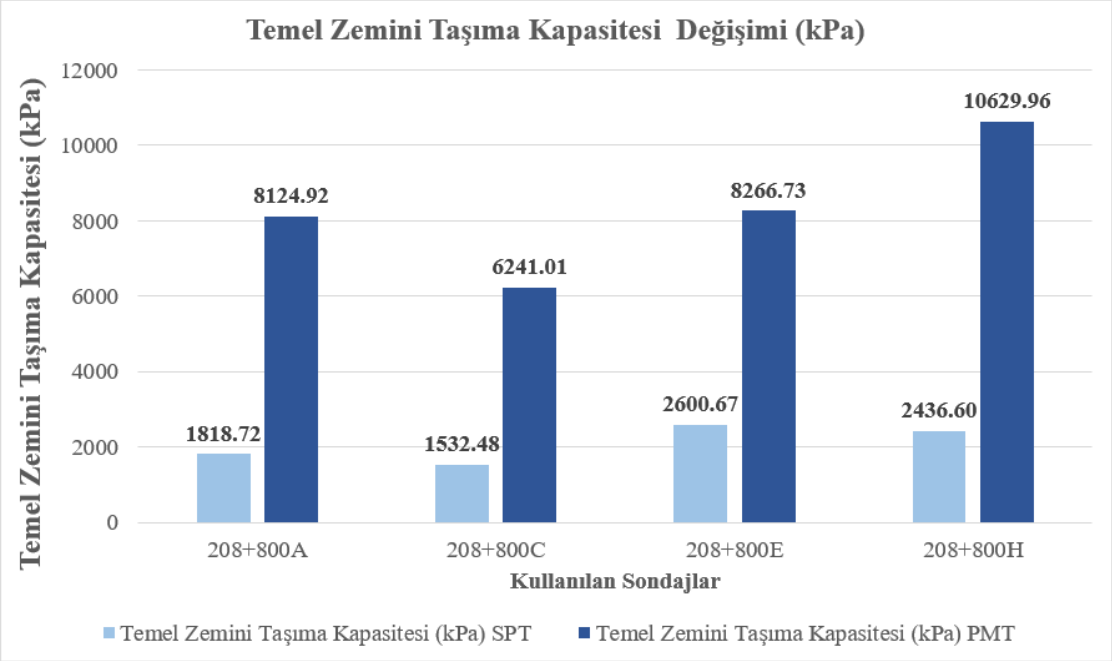
Analizler sonucunda elde edilen taşıma gücü değerleri SPT verilerine göre Şekil 19'da, PMT verilerine göre Şekil 20'de ve her iki değerin karşılaştırması Şekil 21'de verilmiştir.



Şekil 19. SPT verilerine göre taşıma gücü değeri değişimi
Figure 19. *Bearing capacity value change according to SPT data*



Şekil 20. PMT verilerine göre taşıma gücü değeri değişimi
Figure 20. *Bearing capacity value change according to PMT data*



Şekil 21. SPT ve PMT verilerine göre taşıma gücü değeri değişimi
Figure 21. *Bearing capacity value change according to SPT and PMT data*

Şekil 21'de görüldüğü gibi temel zemini taşıma kapasitesinin SPT deneyinde 2600,67 kPa ile 1532,48 kPa arasında; PMT deneyinde ise 6241,01 kPa ile 10629,69 kPa arasında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. 8 deney için temel zemini taşıma kapasitesine yönelik hesaplanan PMT/SPT oranı ortalaması 4,02 olarak hesaplanmıştır. Araştırma sonucunda presiyometre deneyinden elde edilen verilerin standart penetrasyon deneyinden elde edilen verilere göre taşıma gücünün anlamlı bir şekilde daha yüksek hesaplandığı tespit edilmiştir. Bu durum, temel tasarımının seçimi aşamasında zemin analizlerinin kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen sonuçlar, aynı kuyuda gerçekleştirilen iki farklı zemin araştırması deneyinin birbirinden belirgin şekilde farklı sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Bu farklılığın başlıca nedenlerinden biri olarak, SPT ve PMT deneylerinin zeminin davranışını farklı şekillerde ölçmesinden kaynaklanmaktadır. SPT deneyinin dinamik bir deney olup, zeminin darbe yüküne verdiği tepkiyi ölçerken, PMT deneyi ise statik bir deney olup, zeminin kademeli olarak artan basınca verdiği tepkiyi ölçmesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Literatürde PMT deneyi ve SPT deneyi bilgisayar yazılımında taşıma gücü karşılaştırması ile karşılaşılmamıştır Bu çalışmaya en yakın olarak; Tonyalı (2011), çalışmasında arazi, laboratuvar ve jeofizik deneylerden yararlanarak taşıma gücü hesap yöntemlerini karşılaştırılmıştır. 7 adet Presiyometre deney sonucu ile yapılan nihai taşıma gücü değerleri ile yapılan kıyaslamada, Meyerhof SPT-N analiz yöntemi ile %75'lik uyum belirlenmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda, klasik yöntemler ile arazide yapılan SPT ve Presiyometre deney sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu görülmektedir (Tonyalı, 2011).

Ağan (2014) çalışmasında, kumlu siltlerde elde edilen Menard presiyometresi, standart penetrasyon ve bazı laboratuvar test verileri arasındaki belirtiler incelenmiş, regresyon analizleri yapılmış, determinasyon katsayıları yüksek denklemler elde edilmiştir. Laboratuvar testlerinin zemin kütlelerini yeterince temsil edememiş, Menard presiyometre testi geoteknik incelemelerinde oldukça doğru sonuçlar verirken SPT verilerinde yüksek determinasyon sayılarının elde edildiği görülmüştür. Bu durumun silt birim içerisindeki bazı iri kum taneciklerinin üç eksenli basınç ve SPT sonuçlarını saptırmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır (Ağan, 2014).

Yıldız (2021) çalışmasında, dolgu alanında yapılan PMT ve SPT deneylerinden elde edilen zemin parametreleri incelenmiştir. İki deney sonucuna elde edilen, yatay ve düşey rijitlik değerleri derinlikle tutarsız bir şekilde artmaktadır. Presiyometre deneylerinden elde edilen taşıma gücü değerleri artan derinlikle tutarlı

bir şekilde artmaktadır. SPT Presiyometre deney sonuçları ile SPT-N darbe sayısı arasında elde edilen korelasyon katsayılarında yüksek sonuçlara ulaşmıştır (Yıldız, 2021).

Elde edilen bulgulardan ve yapılan araştırma çalışmalarından PMT test sonuçlarından elde taşıma gücü analizleri SPT test sonuçlarından elde taşıma gücü analizlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Sonuç olarak yüzeysel temellerin tasarımında zemin taşıma kapasitesinin daha doğru belirlenebilmesi için farklı zemin araştırma yöntemlerinden elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu amaçla, özellikle SPT ve PMT gibi yaygın kullanılan deneylerin birbirini tamamlayıcı şekilde kullanılması, daha güvenilir bir temel tasarımı yapılmasına katkı sağlayabilir. Farklı deney sonuçları arasındaki uyumsuzlukların minimize edilmesi ve her iki test yönteminin sağladığı avantajlardan yararlanılması için çoklu deney sonuçları doğrultusunda bir ortalama veya güven aralığı belirlemek, tasarım sürecinde daha güvenilir sonuçlara ulaşılmasına olanak tanıyacaktır.

Böylece, zemin taşıma gücünü daha detaylı bir şekilde çözümlenerek ve testler arasındaki farklılıkları göz önünde bullundurularak daha güvenli temel tasarımı yapılabilir.

Yazar katkısı
Author contribution

Yazar 1: Analiz yapma, Modelleme yapma, Literatür taraması,
Yazar 2: Fikir verme, Denetleme/Danışmanlık, Eleştirel inceleme

Etik beyanı
Declaration of ethicalcode

“Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir."

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

“Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder”

Bilgilendirme
Information

Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Kurumu, Fine Firması tarafından sağlanan GEO5 Geoteknik Yazılım Paketini kullanmaktadır.

Kaynaklar
References

Ağan, C. (2014) *Silt Biriminde (Kastamonu, Türkiye) Yapılan Menard Presiyometre, Standart Penetrasyon ve Laboratuvar Deney Sonuçları Arasındaki İlişkilerin Araştırılması*. İMO Teknik Dergisi, 25(122), 6679-6698.

Bekdemir, T. & Toprak, B. (2023). *Taşıma gücü düşük farklı zeminlerde cpt değerlerine göre yüzeysel temel tasarımı*. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi. 15(3), 270-288. DOI:10.29137/umagd.1370297.

Birand, A. (2006). *Sığ (yüzeysel) temeller*. Teknik Yayınevi.

Bowles, J., E. (1996). *Foundation analysis and design*. New York, The McGraw-Hill Companies, Inc.

Clarke, B., G. (1995). *Pressuremeters in Geotechnical Design*. Chapman&Hall, Boundary Row.

Coduto, Donald P. (2001). *Temel tasarımı ilkeler ve uygulamalar* (M. Mollamahmutoğlu, K. Kayabalı, Çeviri). Gazi Kitabevi.

Dağlı, E. (2013). *Sayısal ve Analitik Yöntemler ile Kohezyonsuz Zeminlerin Taşıma Gücü Hesabı*. [Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Das, B., M. (1999). *Shallow foundations bearing capacity and settlements*. CRC Press.

Erol, O., A. & Çekinmez, Z. (2014). *Geoteknik mühendisliğinde saha deneyleri*. Yüksel Proje Yayınları.

Federal Highway Administration. (2002b). *Revised forecast and benefit-cost analysis of the San Francisco Bay Area state highway project.* U.S. Department of Transportation.

Kanıt, R., (2003). *Temel İnşaatı*. Gazi Kitabevi.

Koçak, D., B. (2017). *Zemin taşıma gücünün belirlenmesi için bir yaklaşım*. [Yüksek lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Mair, R., J. & Wood, D. M. (1987). *Pressuremeter testing: Methods and interpretation.* CIRIA Ground Engineering Report: In-situ testing. Butterworths.

Önalp, A. & Sert, S., (2016). *Geoteknik bilgisi III bina temelleri temel tasarımı*. Birsen Yayınevi.

Pişen, S. & Pekşen, E. (2016). *Sığ zeminler için farklı yöntemlerden elde edilen zemin emniyet gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması*. Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi, 8(2), 36-46.

Sivrikaya, O. & Toğrol, E. (2019). *Arazi Deneyleri ve Geoteknik Tasarımda Kullanımları*. Birsen Yayınevi.

Tonyalı, İ. (2011). *Laboratuvar, Arazi ve jeofizik deney sonuçlarını kullanan zemin taşıma gücü hesap yöntemlerinin incelenmesi ve karşılaştırılması*. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Uzuner, B., A. (2007). *Temel Zemin mekaniği*. Derya Kitabevi.

Yıldırım, S. (2009). *Zemin incelemesi ve temel tasarımı*. Birsen Yayınevi.

Yıldırım, B. (2022). *Yüzeysel Temellerin Tasarımında Presiyometrenin Kullanımı*. [Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Yıldız, C. &Yıldırım, B. (2013). *Yüzeysel temellerin tasarımında presiyometrenin kullanımı*. [Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 140-160 doi: 10.17714/gumusfenbil.1568372 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Kırdağ ofiyoliti (Erzurum, KD Türkiye) manto bölümü içerisindeki ortopiroksenitlerin petrografisi, mineral kimyası ve tüm kaya jeokimyasal özellikleri

Petrography, mineral chemistry and whole-rock geochemical properties of orthopyroxenites in the mantle section of the Kırdağ ophiolite (Erzurum, NE Turkey)

Özgür BİLİCİ*

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum

• Geliş tarihi / *Received*: 16.10.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 17.01.2025

Öz

Bu çalışmada, Doğu Pontidlerin doğusunda, Erzurum-Kars Ofiyolit Zonu içerisinde yüzeyleyen Kırdağ ofiyolitinin (Erzurum, KD Türkiye) manto bölümündeki ortopiroksenitlerin oluşum koşulları ve petrojenetik özellikleri, mineral kimyası ve tüm kaya jeokimyasal verileri kullanılarak ilk kez değerlendirilmiştir. Ortopiroksenitlerden alınan örneklerde ana mineralojik bileşimi çoğunlukla ortopiroksenler, daha az oranda klinopiroksenlerle öz ve yarı özşekilli krom spineller oluşturmaktadır. Mineral bileşimlerinde krom spinellerin kısmen yüksek Cr#, düşük TiO_2 içerikleri ve piroksenlerin yüksek Mg# ve düşük Al_2O_3 içerikleri oluşum koşullarının tüketilmiş manto kaynağının yeniden ergimesini işaret etmektedir. Ayrıca, yüksek tüm kaya Mg# değerleri ile konkav şekilli nadir toprak element (NTE) desenleri ve büyük iyon yarıçaplı litofil elementler (BİLE) bakımından zenginleşmiş özellikleri, yitim zonundaki ergiyik-peridotit etkileşim süreçlerindeki metasomatik olayları açıklamaktadır. Sonuç itibariyle, incelenen ortopiroksenitlerin petrografik ve petrolojik özellikleri bir yitim ortamında ana peridotitin yüksek silisli ergiyiklerle reaksiyonu sonucu olivinlerin ortopiroksenlere dönüşümü yoluyla oluştuğu anlaşılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Kırdağ ofiyoliti, Mineral Kimyası, Ortopiroksenit, Petroloji, Erzurum, Türkiye

Abstract

In this study, the formation conditions and petrogenetic characteristics of orthopyroxenites in the mantle section of the Kırdağ ophiolite (Erzurum, NE Turkey), which outcrops within the Erzurum-Kars Ophiolite Zone in the Eastern Pontides, have been evaluated for the first time using mineral chemistry and whole-rock geochemical data. The main mineralogical composition of the samples taken from the orthopyroxenites consists predominantly of orthopyroxenes, with lesser amounts of clinopyroxenes and subhedral to euhedral chromian spinels. The mineral compositions, characterized by partially high Cr# and low TiO_2 contents in chromian spinels, and high Mg# and low Al_2O_3 contents in pyroxenes, indicate that the formation conditions involve the re-melting of a depleted mantle source. Additionally, high whole-rock Mg# values, concave-shaped rare earth element (REE) patterns, and enrichment in large-ion lithophile elements (LILE) explain metasomatic events during melt-peridotite interaction processes in the subduction zone. As a result, it is understood that the petrographic and petrological characteristics of the studied orthopyroxenites indicate that they formed through the transformation of olivines into orthopyroxenes via the reaction of the parent peridotite with high-silica melts in a subduction zone.

Keywords: *Kırdağ ophiolite, Mineral chemistry, Orthopyroxenite, Petrology, Erzurum, Turkey*

*Özgür BİLİCİ; ozgurbilici@atauni.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Üst mantonun hacimce oldukça küçük bir kısmını oluşturan piroksenitler, mantodaki en önemli litolojik heterojeniteler arasındadır. Bu kayalar sadece manto heterojenliğini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda ada yayı ve okyanus ortası sırtı bazaltlarının kaynak malzemeleri olarak da görülürler (örneğin, Frets vd., 2012; Lambart vd., 2016; Borghini vd., 2017). Piroksenitlerin Dünya'nın mantosunda önemli bir bileşen olduğu düşünülmektedir, ancak oluşumları halen tartışmalıdır. Bunlar litolojik ve kökensel olarak ortopiroksenit, klinopiroksenit ve vebsterit gibi türleri dâhil olmak üzere çeşitli modal mineralojik bileşimde bulunabilirler. Peridotitler içerisinde çoğunlukla damar ve/veya dayklar halinde gözlenen bu piroksenitler, tektonik ortamları ve oluşum mekanizmaları bakımından birçok araştırmacı tarafından incelenmişlerdir. Bunlar arasında; ofiyolitik peridotitlerle ilişkili (örneğin, Berly vd., 2006; Tamura & Arai, 2006; Borghini vd., 2013; Kaczmarex vd., 2015; Rogkala vd., 2017; Bilici & Kolaylı, 2018; Roux & Liang, 2019; Karimov vd., 2020; Xu vd., 2023; Zhang vd., 2023), abisal ve orojenik peridotitlerle ilişkili (örneğin, Garrido & Bodinier, 1999; Dantas vd., 2007; Downes, 2007; Bodinier vd., 2008; Laukert vd., 2014; Xiong vd., 2014) ve çeşitli tektonik ortamlarda manto ksenolitleri olarak (örneğin, Chen & Zhou, 2005; Arai vd., 2006; Dantas vd., 2009) birçok örnek yer almaktadır. Özellikle ofiyolitik zonlar, peridotitler yoluyla litosferik mantoya ulaşabilen ergiyiklerin bileşimini incelemek için ideal alanlardır. Bu çalışmada da, ofiyolitik peridotitlerle ilişkili olanlara örnek olacak şekilde, Kırdağ ofiyolitinin (Erzurum, KD Türkiye) manto bölümündeki ortopiroksenitlere ait mineral kimyası ve tüm kaya jeokimyasal verileri kullanılarak, yitim zonlarındaki yay mantosunu etkileyen çeşitli petrolojik olaylarının doğasının anlaşılması amaçlanmıştır.

Farklı türlerdeki piroksenit oluşumları için birçok petrolojik süreç önerilmiştir. Saha gözlemleriyle birlikte jeokimyasal ve deneysel çalışmalar, özellikle klinopiroksen minerallerinin çeşitli bazik magma türlerinde sıvılaşma fazı olabileceğini ve ilksel magmalardan yüksek basınçlı mineral ayrışmasının masif piroksenit oluşumuyla sonuçlanabileceğini göstermiştir (Pearson vd., 1993; Santos vd., 2002). Öte yandan, dalan okyanusal litosferin konvektif manto yoluyla geri dönüşümünün de (roll-back) piroksenit oluşumuna neden olabileceği belirtilmiştir (örneğin, Kerr vd., 1995). Ancak, bu iki süreç piroksenitler için geniş bir oluşum yelpazesini gösterse de manto peridotitlerindeki piroksenit damar ve/veya dayklarının kesişen ağsal yapılarını tam anlamıyla açıklayamamaktadır (Berly vd., 2006).

Manto piroksenitlerinin ağırlıklı olarak bir dalma-batma zonu ortamından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hâkim teori, bu kayaların, kristal parçalanması ve birikmesi (örneğin, Downes, 2007; Tribuzio vd., 2008), ergiyiklerin ve/veya sıvıların peridotitler ile etkileşimlerini içeren magmatik faaliyetler (örneğin, Berly vd., 2006; Tamura & Arai, 2006; Bilici & Kolaylı, 2018; Basch vd., 2019; Karimov vd., 2020; Belousov vd., 2021; Xu vd., 2023; Zhang vd., 2023) nedeniyle oluştuğunu öne sürmektedir. Bu piroksenitlerin modal mineralojisi ve birincil mineral bileşimleri, eriyik sızdırılması sonrası kısmi ergime, sıvı faz zenginleşmesi ve manto-ergiyik etkileşim süreçlerinin kapsamını sınırlamak ve yorumlamak için önemli rol oynamaktadır. Bununla birlikte, piroksenitlerin bir türü olan ve bu çalışmanın da odak noktasını oluşturan ortopiroksenitler ise dünyanın çeşitli bölgelerindeki ofiyolitlerin üst mantoyu temsil eden manto bölümleri içerisindeki peridotit masiflerinde dayklar halinde gözlenmiş ve birçok çalışmada irdenlenmiştir (Varfalvy vd., 1997; Phyton vd.,2003; Tamura & Arai 2006; Kaczmarek vd., 2015; Wang vd., 2016). Saha çalışmaları ve petrolojik yorumlamalarda hem peridotit masiflerinde damar ve/veya dayklar şeklinde hem de ksenolitler olarak gelişmiş olan ortopiroksenitlerin oluşumunu açıklamak için ergiyik/sıvı-peridotit etkileşimine başvurulur, ancak reaksiyona giren ergiyiğin, peridotitlerle olan ayrıntılı ergiyik-kaya reaksiyon rejiminin doğası tamamen anlaşılmış değildir.

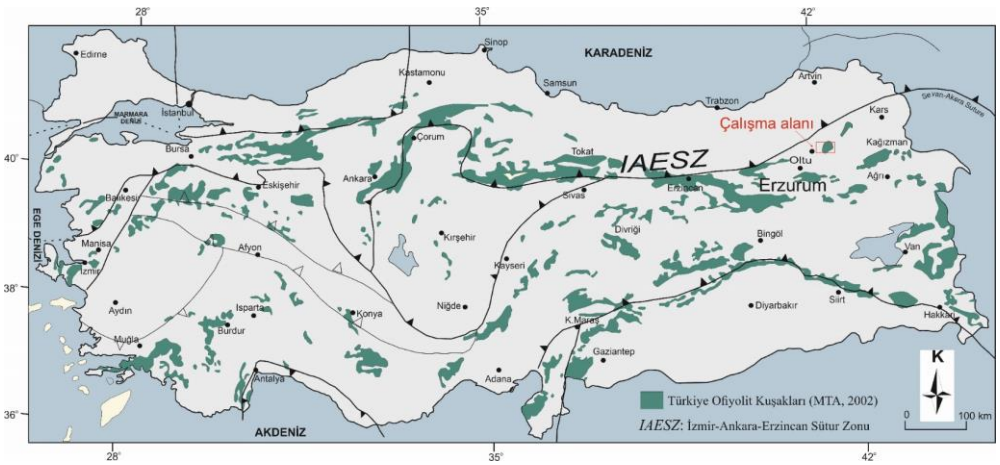
İnceleme alanında, Kırdağ ofiyolitinin (Erzurum, KD Türkiye) manto bölümünde harzburjitik peridotitler içerisinde ortopiroksenit dayklarına rastlanmıştır. Bu ortopiroksenitlerin ana kayaları olan peridotitlerin bir yitim zonunda dalma-batmanın ilk aşamalarında, manto kamasında çeşitli petrolojik süreçler sonucunda oluştukları ve yay önü peridotitleri ile benzer özellik gösterdikleri daha önceki çalışmalarda ortaya konulmuştur (Bilici, 2022). Bu çalışmada, Kırdağ ofiyolitinin manto bölümünden toplanan ortopiroksenit örneklerinin petrografisi, mineral kimyası, tüm kaya ana, iz ve nadir toprak element (NTE) jeokimyasal verileri ilk kez rapor edilmiş ve petrolojik açıdan değerlendirilmiştir. Detaylı mineralojik ve petrokimyasal çalışmalar, Kırdağ ofiyolitinin jeodinamik ortamıyla ilişkili olarak bu kayaçların magmatik evrimini aydınlatmak için kullanılmıştır. Bulgular, bir yitim ortamındaki manto kaması içinde ortopiroksenitlerin oluşumundan sorumlu petrolojik süreçleri daha iyi anlamak ve yorumlamak için önemli katkılar sunmaktadır.

2. Jeolojik geçmiş
2. Geological backgraund

2.1. Bölgesel jeoloji
2.1. Regional geology

Kuzeydoğu Anadolu Bölgesi, genel olarak Jura-Geç Kretase dönem aralığında meydana gelen açılma ile günümüze kadar süren aktif sıkışma süreçleri sonucunda meydana gelen jeotektonik ortamlardaki birimleri kapsamaktadır (örneğin, Şengör, 1980). Jura dönemindeki açılma ile meydana gelen ve Neotetis'in kuzey kolunu oluşturan okyanusal kabuk, Geç Kretase dönemindeki yitimle Eosen sonuna kadar kapanmış, bunun sonucunda da Pontidler ve Anatolidler bir araya gelmişlerdir (Şengör & Yılmaz, 1981). Bu bölge, Doğu Pontidler ve Doğu Toridler olmak üzere iki önemli tektonik kuşağı temsil etmektedir (Şengör & Yılmaz, 1981). Doğu Pontid Orojenik Kuşağı, Avrasya'nın aktif kıta kenarının bir bölümünü oluşturan Sakarya Zonu'nun bir parçası olarak kabul edilmiştir (Şengör & Yılmaz, 1981; Okay & Şahintürk, 1997). Bu kenar, Geç Kretase sırasında Neotetis'in kuzeye doğru dalması nedeniyle gelişmiştir (Şengör & Yılmaz, 1981; Okay & Şahintürk, 1997; Şengör vd., 2003; Ustaömer & Robertson, 2010; Aydınçakır, 2016). Bilimsel görüşler bölgedeki jeodinamik evrim konusunda farklılık gösterse de, bazıları Paleozoik'ten Eosen döneminin sonuna kadar güneye doğru dalma olduğunu öne sürmektedir (örneğin, Dewey vd., 1973).

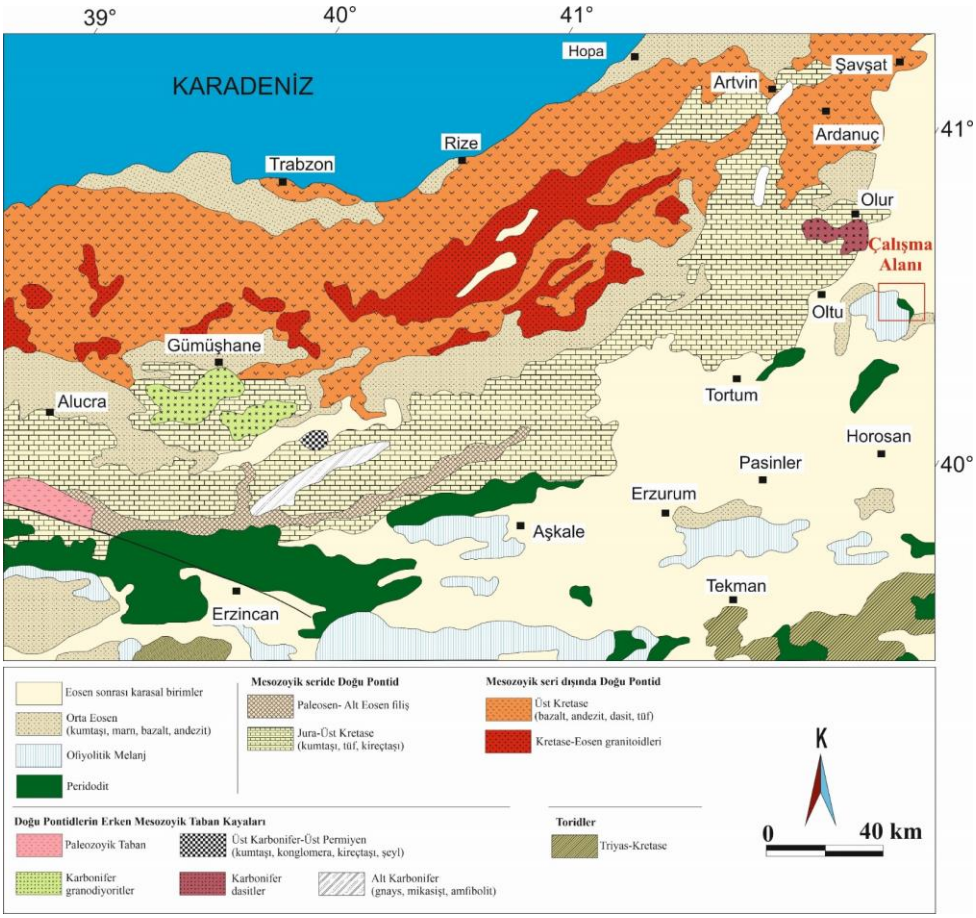
Doğu Akdeniz Mesozoik ofiyolit kuşakları içerisindeki Türkiye ofiyolit serileri, neredeyse doğu-batı yönlü eğrisel sütür bölgeleri boyunca Gondwana'dan türetilmiş bir dizi kıtasal bloğu ayırır ve bu mikro kıtalar arasında gelişen farklı alanlardaki Tetis okyanus litosferinin kalıntıları olarak temsil edilir (Şekil 1). Pontid ve Torid tektonik birimleri, Geç Kretase ofiyolitleri ve ofiyolitik melanjları barındıran İzmir-Ankara-Erzincan Sütur Zonu (IAESZ) ile sınırlandırılmıştır (örneğin, Şengör & Yılmaz, 1981; Robertson & Dixon, 1984; Okay & Şahintürk, 1997; Sarıfakıoğlu vd., 2009; Parlak vd., 2013; Robertson vd., 2013) (Şekil 1). Bu zon içerisindeki birçok ofiyolitik kaya topluluğu, oluşum yaşları, kabuksal kaya jeokimyaları ve üst manto peridotit bileşimleri açısından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Genel olarak, bu kenet zonu içinde yer alan ofiyolitik kabuksal kayalar ve üst manto peridotitleri üzerine yapılan son yıllardaki sistematik petrolojik ve jeokimyasal çalışmalar, bu ofiyolitlerin tektonik oluşum ortamları için yitim zonlarını (SSZ) işaret etmektedir (örneğin, Parlak vd., 2013; Robertson vd., 2013; Çelik vd, 2013; Uysal vd., 2015, 2017; Bilici, 2022).



Şekil 1. Türkiye ofiyolit kuşakları (MTA, 2002) ve kenet zonları (Okay & Tüysüz, 1999) üzerinde çalışma alanını gösteren yer bulduru haritası
Figure 1. *Location map showing the study area on Turkey's ophiolite belts (MTA, 2002) and suture zones (Okay & Tüysüz, 1999).*

Doğu Pontidler Geç Mesozoyik-Senozoyik jeodinamik evrimini değerlendirmek için önemli bir alandır. Pontidler ile Anatolid-Torid levhaları arasındaki yitim ve çarpışma süreçleri başlı başına bir tartışma konusunu oluşturmaktadır (örneğin, Okay & Şahintürk, 1997; Yılmaz vd., 1997; Okay & Tüysüz, 1999; Dilek vd., 2010; Kaygusuz vd., 2022; Aydınçakır vd., 2024). Birçok araştırmacı tarafından Permiyen' den Liyas öncesi olaylara kadar tümü Paleotetis'in kapanması şeklinde tanımlanmış, ultramafik masiflerin üzerlemesinin ise Senomaniyen ortalarından başlayarak, ilaveten Kretase'den Eosen'e kadar olan magmatik olayların gelişmesi ve Neotetis' in kuzey kolunun Geç Paleosen'den Erken Eosen dönemi arasında kuzeye doğru yitimin devam

etmesiyle geliştiği ileri sürülmüştür (Okay & Şahintürk, 1997; Yılmaz vd., 1997). Bununla birlikte farklı araştırmacılar tarafından Doğu Anadolu Bölgesi' nde ortaya çıkmış ultramafik kayaların, Geç Kretase-Orta Eosen arasında Mesozoyik ve Paleozoik kayaları üzerine bindirmeli olarak yerleşmiş olabilecekleri belirtilmiştir (örneğin, Buket & Ataman, 1982). Doğu Pontid güney zonu, volkanik kayaçlarla ve Geç Kretase yaşlı sedimanter kayaçlarla kaplıdır ve ayrı metamorfik masifler ile granitoyitik kayaçlarla karakterizedir. Ultramafik kayaçlar, gabro ve diyorit ile ilişkili derin pelajik sedimanlar ise Anatolid-Torid platformu ile Pontidler arasındaki sınır bölgesini temsil etmektedir (Okay & Şahintürk, 1997) (Şekil 2). Doğu Pontidler'in doğu kısmı ise dört litolojik alt gruptan oluşmaktadır; Doğu Pontidler'in otokton birimleri, alt karışık dilim, üst karışık dilim ve Geç Kretase ofiyolitleridir (Ustaömer & Robertson, 2010). Çalışma alanını kapsayan ve bölgede Erzurum-Kars Ofiyolit Zonu olarak da adlandırılan bu Geç Kretase ofiyolitleri, ofiyolitik melanj, metamorfik seriler ve sedimanter formasyonlardan oluşmaktadır (Konak vd., 2001).

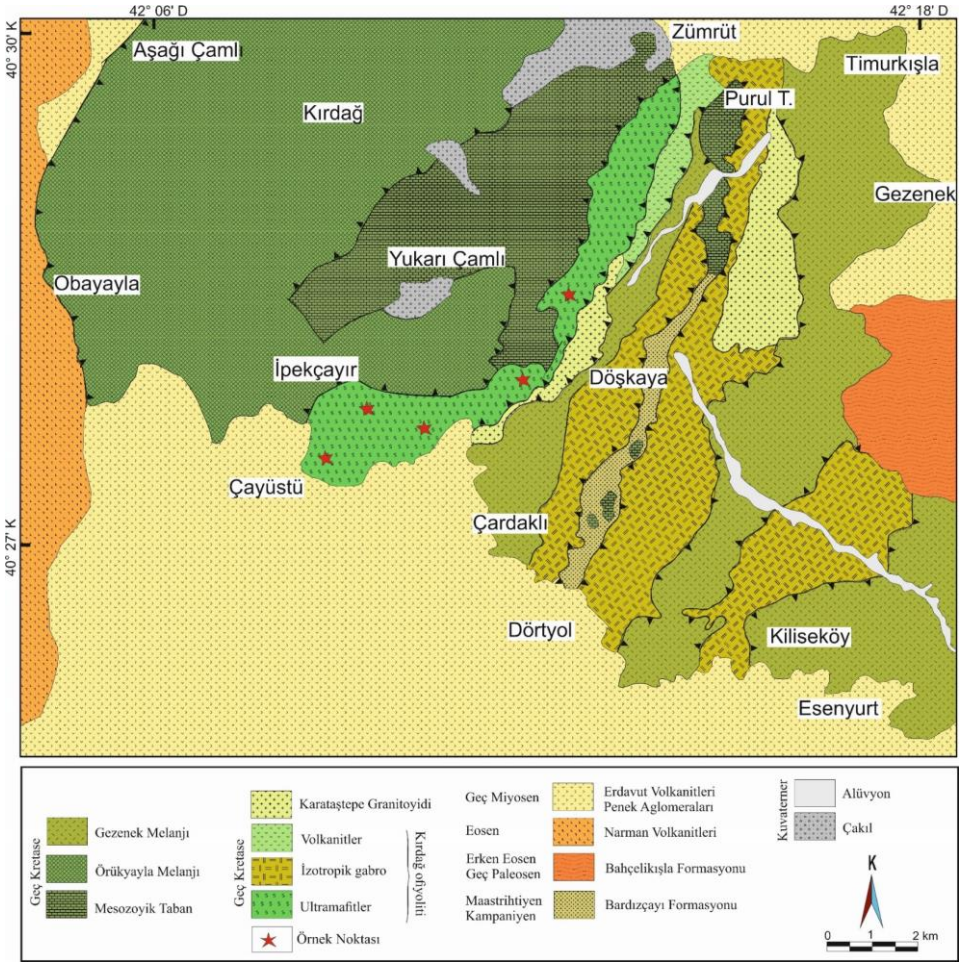


Şekil 2. Doğu Pontid Tektonik Birliği'nin kuzeydoğusunu temsil eden genelleştirilmiş jeoloji haritası (Okay & Şanintürk, 1997' den alınmıştır).
Figure 2. *Generalized geological map representing the northeast of the Eastern Pontid Tectonic Union (taken from Okay & Şanintürk, 1997).*

2.2. Çalışma alanı ve çevresinin jeolojisi
2.2. Geology of the study area and vicinity

Çalışma alanını kapsayan Kırdağ ofiyolit dizisi, tabanda gabroik kayaçlarla başlar ve yaklaşık 50 cm kalınlığında bazal konglomeralar ile örtülür. Bu birimi üzerleyen Bardızçayı Formasyonu kumtaşı, çamurtaşı, şeyl, silttaşı ve radyolaritten oluşmaktadır (Konak vd., 2001). Kireçtaşı blokları ve ofiyolitik parçalar dizinin üst kısmında gözlenir ve bunu serpantinit, gabro, diyabaz, volkanik birimler, granitoid, kireçtaşı, çört, kumtaşı, tüf ve silttaşı karışımı ile karakterize edilen Gezenek melanj birimi izler (Konak vd., 2001). Ultramafik kayaçlar ağırlıklı olarak kısmen serpantinleşmiş harzburgitlerden oluşmakta olup, daha az oranda verlit, dünit, kromitit ve piroksenit içermektedir (Konak vd., 2001; Bilici, 2022). Bu ultramafitler yapısal olarak çeşitli litolojileri barındıran tektonik bir birim olan Gezenek melanjı üzerinde konumlanmaktadır. Harzburjitik peridotitleri kesen piroksenitlerin yanı sıra, bölgede diyabaz ve gabroyik damar kayaçlar da bulunmaktadır (Konak vd., 2001; Konak & Sümengen, 2009). Ayrıca, Erken Jura yaşlı (Robertson vd., 2013) Karataştepe

Granitoyidi bölgede yüzeyleyen bazik volkanitler, volkanoklastik ve sedimanter kayaçlardan oluşan düşük dereceli metamorfik kayaçların gelişmesine yol açmıştır (Konak vd., 2001; Konak & Hakyemez, 2008; Konak & Sümengen, 2009). Bunların dışında, çalışma alanı çevresinde Erken Eosen-Geç Paleosen yaşlı Bahçekışla Formasyonu, Eosen yaşlı (Aydınçakır vd., 2024) Narman Volkanitleri ve Geç Miyosen yaşlı Erdavut Volkanitleri-Penek Aglomeraları yer almaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Kırdağ ofiyoliti ve çevresinin jeoloji haritası [Konak vd. (2001)'den değiştirilerek].
Figure 3. *Geological map of the Kırdağ ophiolite and vicinity [modified from Konak et al. (2001)].*

3. Analitik Yöntemler
3. Analytical methods

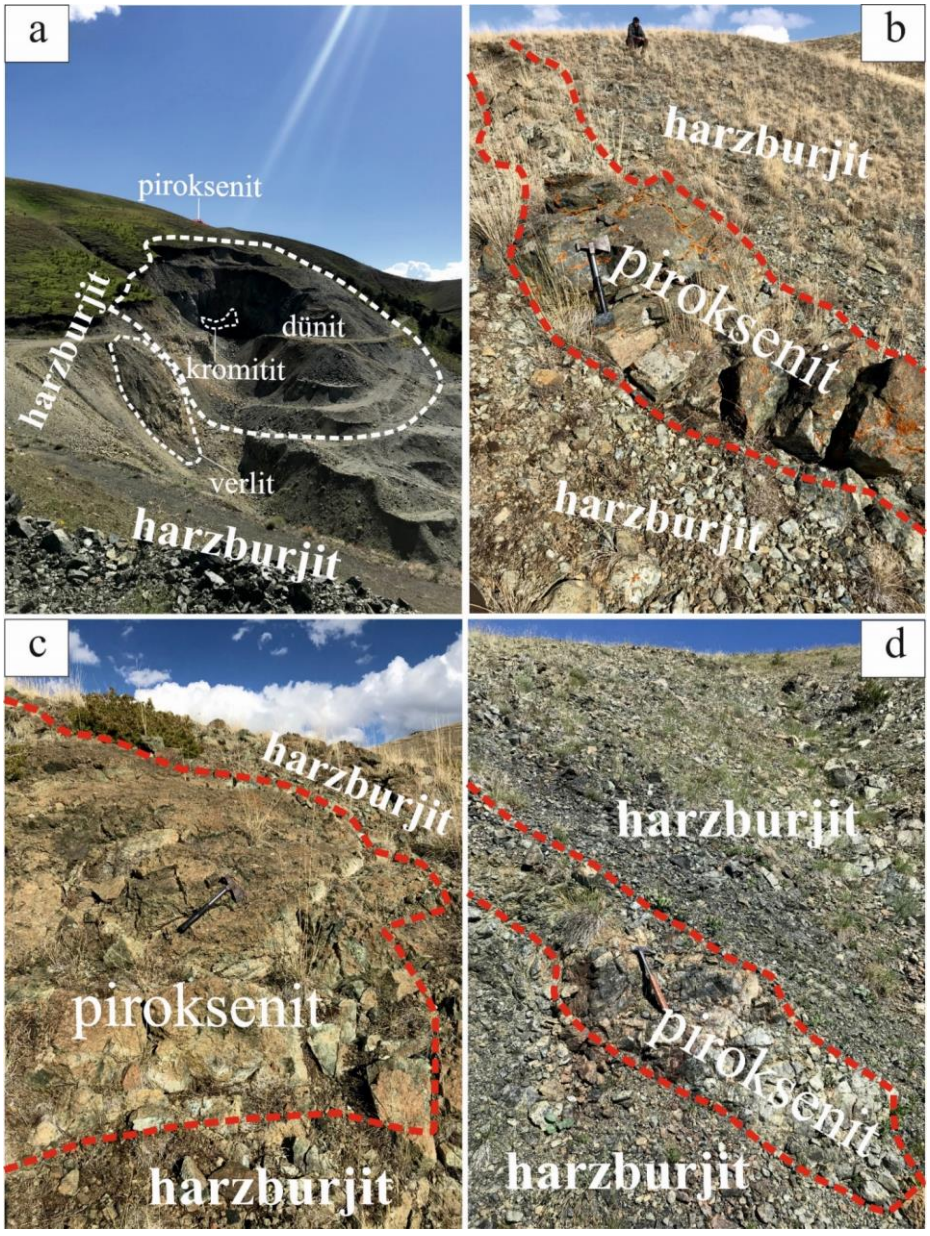
Arazi çalışmaları sırasında sistematik olarak derlenen ortopiroksenit örneklerinin ince kesitleri hazırlanarak detaylı petrografik analizleri polarizan mikroskobu altında gerçekleştirilmiştir. Ortopiroksenit örneklerinde gözlenen, ortopiroksen, klinopiroksen ve krom spinellerin mikroprob analizleri, Ifremer Brest (Fransa) laboratuvarlarında seçilmiş parlak ince kesitler üzerinde uygulanmıştır. Analizler, Cameca SX 100 taramalı elektron mikroskobuna bağlı enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX), EDS ve WDS dedektörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Seçilen mineraller daha sonra 200 nA ışın akımı, 20 kV voltaj, 180 ms alım süresi ve 5 Numm adım uzunluğu kullanılarak analiz edilmiştir. Gerilim 15 kV'a ve 0,6 m'lik ışın akımının çapı 3,3 nA'ya ayarlanarak, tespit limitleri % 0,01 ve kesinlik % 5'ten daha iyi olarak belirlenmiştir. Analiz verilerine göre, piroksen ve krom spinel stokiyometrileri sırasıyla 6 ve 32 oksijen atomuna göre hesaplanmıştır.

İncelenen örneklerdeki ana ve iz elementlerin tüm kaya jeokimyasal analizleri Acme Analitik Laboratuvarlarında (Kanada) gerçekleştirilmiştir. Ana element analizi, bir XRF spektrometresi ve bir dizi spektrometresi (ICP-ES) kullanılarak yapılmıştır. İz ve nadir toprak elementleri, tamamen sindirilmiş numunelerde indüktif olarak eşleşmiş plazma kütle spektrometresi (ICP-MS) ile belirlenmiştir. Ana elementler için algılama limitleri ağırlıkça % 0,01 ila % 0,04 arasında, iz elementler için 0,01 ppm ila 10 ppm arasındadır. Tekrarlanan analizlerden hesaplanan analitik hassasiyet genellikle çoğu ana element için %3'ten, eser elementler için ise %5'ten daha iyi olarak tespit edilmiştir.

4. Bulgular
4. Results

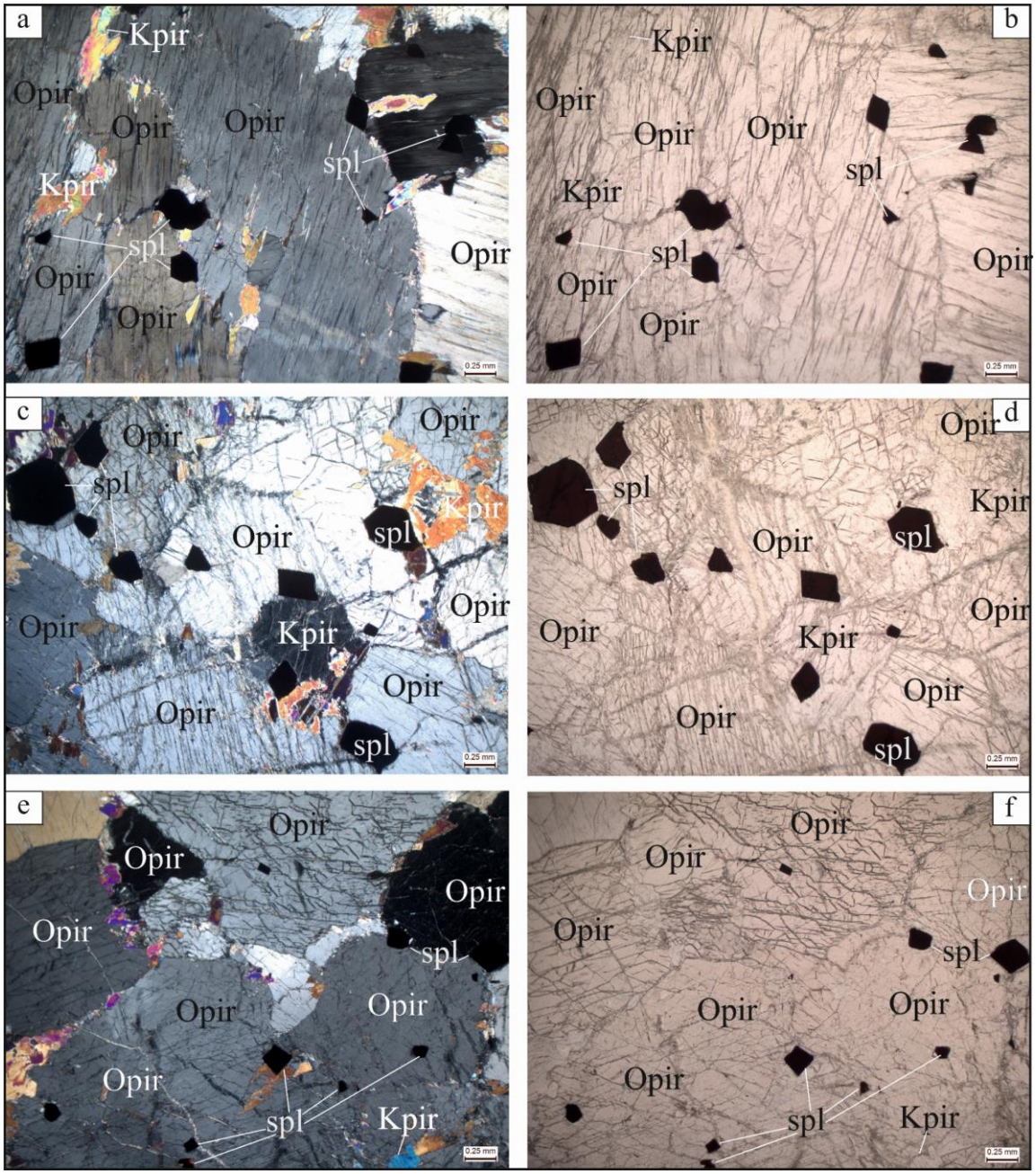
4.1. Saha gözlemleri ve petrografi
4.1. Field observations and petrography

Doğu Pontidlerin kuzeydoğusunda, Erzurum-Kars Ofiyolit Zonu içerisinde yer alan Kırdağ ofiyolitinin manto kesitini oluşturan litolojik birimlerden peridotitler, çoğunlukla harzburjit, daha az oranda dünit ve verlitlerden oluşmaktadır (Şekil 4a). Çalışma alanındaki en yaygın litolojiyi oluşturan harzburjitler içerisinde farklı boyutlarda dayklar halinde piroksenitler gözlenmiştir (Şekil 4b-d). Bu piroksenitler, harzburjitlerle olan keskin dokanakları sayesinde arazi çalışmaları sırasında kolayca ayırt edilmişlerdir. Ayrıca, piroksen minerallerinin modal bollukları sayesinde peridotitlerden daha farklı renk ve yapılarda oldukları, alterasyon süreçlerinden de daha az oranda etkilendikleri anlaşılmaktadır (Şekil 4b-d). Kırdağ ofiyoliti manto kesiti içerisinde gözlenen bu piroksenitlerin genel olarak çoklu kuşak ağ şeklinde harzburjitleri kesen yapıda ve yer yer birkaç metreyi geçen boyutlarda oldukları görülmüştür.



Şekil 4. (a) Kırdağ ofiyoliti manto kesitini oluşturan birimlerin arazi görünümü, (b-d) harzburjitik peridotit içerisindeki ortopiroksenitlere ait yakın görünümler.
Figure 4. *(a) Field view of the units forming the mantle section of the Kırdağ ophiolite, (b-d) close-up images of orthopyroxenites in the harzburgitic peridotite.*

Çalışma alanından alınan piroksenit örneklerine ait ince kesitler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda genel mineralojik ve petrografik özellikleri tanımlanmıştır. Genel olarak holokristalen dokuda olan piroksenitlerin modal mineralojik bileşimlerine göre çoğunlukla ortopiroksen kristallerinden oluştukları belirlenmiştir (Şekil 5). İncelenen kesitlerde krom spinellerin özşekilli ve yarı özşekilli kristaller halinde ortopiroksen kristalleri arasında ve yer yer inklüzyon olarak yoğunlaştıkları görülmektedir (Şekil 5a-f). Örneklerde ortopiroksen mineralleri, kayacın % 85-90'ını oluşturmaktadırlar. Boyutları 0.5-5mm arasında değişen ve genellikle serpantinleşmeye dayanıklı oldukları gözlenen ortopiroksenlerin bazı örneklerde yer yer alterasyona izlerine rastlanmıştır. Klinopiroksenler ise ortopiroksenler arasında daha küçük boyutlarda gözlenmiş olup, kayaç içerisinde modal olarak % 1-5 arasında değişmektedirler (Şekil 5a-f). Krom spinel kristalleri, incelelen tüm örneklerde oldukça yüksek modal mineralojik bileşimde ve kayacın yaklaşık % 3-5'ini oluşturacak hacimde görülmüştür (Şekil 5b, d). Olivin mineraline ise incelenen örneklerin hiçbirinde rastlanmamıştır. Bütün bu gözlemler ve incelemeler doğrultusunda çalışma alanından derlenen piroksenit örneklerinin tümünün "ortopiroksenit" oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 5. Kırdağ ofiyoliti ortopiroksenit örneklerine ait mikro fotoğraflar (a,c ve e ÇN, b,d ve f ise TN görünümleridir). Kısaltmalar; Opir: ortopiroksen, Kpir: klinopiroksen, spl: krom spinel

Figure 5. *Microphotographs of orthopyroxenite samples (a, c, e are CPL and b, d, f are PLL views). Abbreviations; Opir: orthopyroxene, Kpir: clinopyroxene: spl: chromian spinel.*

4.2. Mineral kimyası
4.2. Mineral chemistry

Kırdağ ofiyoliti manto kesitindeki ortopiroksenitlerde bulunan krom spinel, ortopiroksen ve klinopiroksen minerallerine ait kimyasal analiz sonuçları ve hesaplanan değerler bu bölümde farklı başlıklar halinde özetlenmiş olup, Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3' te sırasıyla verilmiştir.

4.2.1. Krom spinel
4.2.1. Chromian spinel

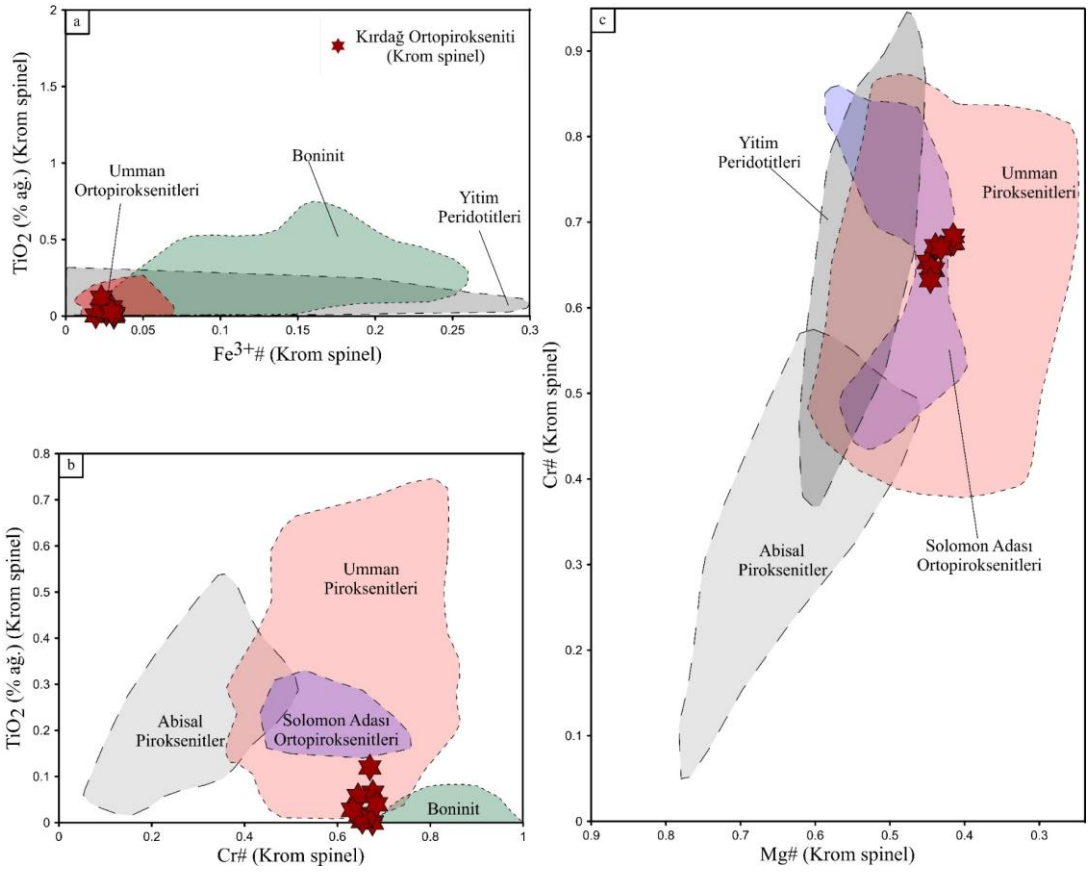
Kırdağ ofiyoliti manto bölümü içerisindeki ortopiroksenit örneklerinden seçilen ve analizleri yapılan krom spinel kristallerinin genel olarak homojen kimyasal bileşimde oldukları söylenebilir. Krom spinellerin Cr_2O_3 (% ağ.) içerikleri oldukça yüksek olup, 47.87-51.80 arasında değişirken, Al_2O_3 (% ağ.) içerikleri 16.05-18.69 arasında değişmektedir. MgO ve FeO (% ağ.) içerikleri ise sırasıyla 8.39-9.21 ve 21.56-23.23 arasında değişim göstermektedir. Ayrıca, spineller çok düşük TiO_2 (% ağ.) içerikleri (0.00-0.12) ile de karakteristiktirler. Bunlara ilaveten, krom spinel minerallerinden elde edilen mikroprop analiz sonuçlarının stikiyometrik hesaplamalarına göre Cr# [Cr/(Cr+Al)] değerleri 0.63-0.68 arasında, Mg# [Mg/(Mg+Fe^{2+})] değerleri 0.42-0.45 arasında değişim göstermişlerdir. Bunlara ilave olarak, hesaplanan Fe^{3+}# [Fe^{3+}/(Cr+Al+ Fe^{3+})] değerleri de oldukça düşük olup, 0.02-0.03 arasında değişim gösterir.

Tablo 1. Ortopiroksenitlerden seçilen krom spinellere ait mikroprob analiz sonuçları (% ağ.) ve hesaplanan katyon değerleri.
Table 1. *Microprobe analysis results (% wt.) of chromian spinels selected from orthopyroxenites and calculated cation values.*

Örnek	P-11	P-11	P-11	P-11	P-11	P-11	PX-9	PX-9	PX-9
SiO_2	0.04	0.02	0.05	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
TiO_2	0.00	0.06	0.00	0.06	0.02	0.01	0.04	0.12	0.03
Al_2O_3	16.25	16.42	17.73	17.99	16.61	17.81	16.05	16.65	18.69
Cr_2O_3	50.39	51.07	49.84	48.60	50.75	48.52	51.80	50.33	47.87
FeO*	23.23	23.05	21.56	22.52	22.30	22.43	22.74	22.26	22.47
MnO	0.34	0.32	0.26	0.29	0.29	0.32	0.36	0.29	0.31
MgO	8.46	8.46	9.21	9.03	8.94	9.04	8.39	8.78	9.15
CaO	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.00	0.00
Na_2O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.00	0.00
K_2O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
NiO	0.07	0.05	0.07	0.08	0.04	0.03	0.09	0.09	0.08
Toplam	**98.81**	**99.50**	**98.75**	**98.60**	**99.00**	**98.23**	**99.54**	**98.52**	**98.60**
Si	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01
Al	5.07	5.08	5.45	5.55	5.14	5.52	4.97	5.18	5.75
Cr	10.54	10.59	10.28	10.06	10.53	10.09	10.76	10.50	9.88
Fe^{+2}	4.64	4.67	4.39	4.46	4.47	4.43	4.63	4.54	4.42
Fe^{+3}	0.50	0.39	0.31	0.48	0.42	0.51	0.37	0.37	0.48
Mn	0.08	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.06	0.07
Mg	3.34	3.31	3.58	3.53	3.50	3.54	3.28	3.45	3.56
Ca	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Na	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Cr#	0.68	0.68	0.65	0.64	0.67	0.65	0.68	0.67	0.63
Mg#	0.42	0.42	0.45	0.44	0.44	0.44	0.42	0.43	0.45
Fe^{3+}#	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03

FeO*= toplam demir içeriği. Cr#, Mg# ve Fe^{3+}# değerleri atomik oranlara göre hesaplanmıştır.

Krom spinellerin TiO_2 içeriklerine göre Fe^{3+}# ve Cr# değerlerinin gösterildiği diyagramlarda herhangi bir yönseme görülmemekte, ancak farklı çalışmalardaki benzer ortopiroksenit oluşumlarıyla karşılaştırılabilir düzeydedir (Şekil 6a, b). Bununla birlikte, krom spinellerin Mg# değerlerindeki artışa bağlı olarak Cr# değerlerinde negatif yönseme belirgindir (Şekil 6c). Spinel kimyası verilerine göre, Kırdağ ortopiroksenitlerinin boninit alanlarına yakın dağılım gösterdikleri ve hem Umman hem de Solomon Adası ortopiroksenitleriyle benzer oldukları görülmektedir (Şekil 6a-c)



Şekil 6. Kırdağ ortopiroksenitleri içerisindeki krom spinel kimyalarına göre gösterilen değişim diyagramları. (a) TiO_2 içeriklerine karşı Fe^{3+}# oranları, (b) Cr# ve Mg# değerleri arasındaki ilişki, (c) TiO_2 içeriklerine karşı Cr# değerleri. Karşılaştırma amacıyla yitim peridotit alanı Ishii vd. (1992)'den, abisal piroksenit alanı Dantas vd. (2007)'den, Umman piroksenit alanı Tamura & Arai (2006)'dan, Umman ortopiroksenit alanı Python vd. (2003)' ten, boninit alanı Barnes & Roeder (2001)'den ve Solomon Adası ortopiroksenitleri ise Berly vd. (2006)'dan alınmıştır.

Figure 6. *Variation diagrams according to the chromium spinel chemistry in the Kırdağ orthopyroxenites. (a) TiO_2 contents versus Fe^{3+}# values, (b) relationship between Cr# and Mg# values, (c) TiO_2 contents versus Cr# values. For comparison, the subduction peridotite field is taken from Ishii et al. (1998), the abyssal pyroxenite field from Dantas et al. (2007), the Oman pyroxenite field from Tamura & Arai (2006), the Oman orthopyroxenite field from Python et al. (2003), the boninite field from Barnes & Roeder (2001), and the Solomon Island orthopyroxenites from Berly et al. (2006).*

4.2.2. Ortopiroksen
4.2.2. Orthopyroxene

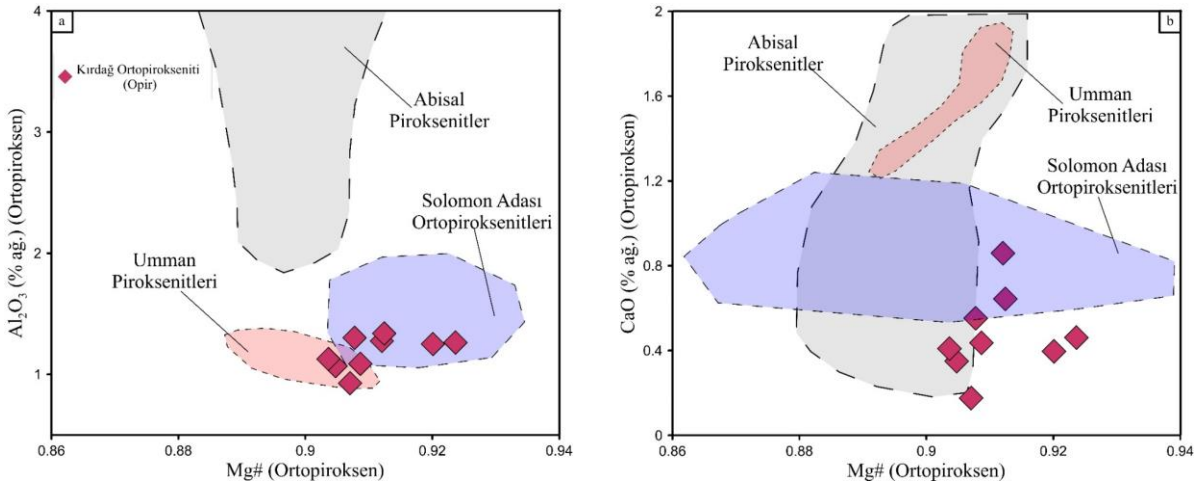
Kırdağ ofiyoliti manto kesiminde yer alan ortopiroksenit örneklerinden seçilen ve modal mineralojik bakımdan en fazla bulunan ortopiroksenlerin mineral kimyası analiz sonuçlarına göre ortopiroksenlerin Al_2O_3 (% ağ.) içerikleri düşük olup 0.93-1.30 arasında değişmektedir. CaO ve FeO (% ağ.) içerikleri ise sırasıyla 0.18-0.86 ve 6.22-6.55 arasında değişim göstermektedirler. Ayrıca, ortopiroksenler 0.38-0.52 (% ağ.) arasında değişen düşük Cr_2O_3 içeriklerine sahiptirler. Mikroprop analiz sonuçlarının stikiyometrik hesaplamalarında ortopiroksenlerin Mg# [Mg/(Mg+Fe^{2+})] değerleri 0.90-0.92 arasında değişmektedir. Ayrıca, hesaplanan Wo (0.33-1.61), En (89.16-90.10) ve Fs (9.05-9.63) değerlerine göre Kırdağ ortopiroksenitlerini oluşturan ortopiroksen minerallerinin enstatit bileşimde oldukları anlaşılmaktadır.

Tablo 2. Ortopiroksenitlerden seçilen ortopiroksenlerin mikroprop analiz sonuçları (% ağ.) ve hesaplanan katyon değerleri.
Table 2. *Microprobe analysis results (% wt.) of orthopyroxenes selected from orthopyroxenites and calculated cation values.*

Örnek	P-11	P-11	P-11	P-11	P-11	P-11	PX-9	PX-9	PX-9
SiO_2	56.99	57.15	57.07	56.90	57.17	57.33	56.99	57.16	57.50
TiO_2	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Al_2O_3	1.26	1.30	1.28	1.07	1.13	0.93	1.34	1.25	1.09
Cr_2O_3	0.48	0.45	0.39	0.42	0.42	0.42	0.52	0.46	0.38
FeO*	6.25	6.22	6.31	6.55	6.51	6.48	6.34	6.39	6.35
MnO	0.17	0.13	0.20	0.17	0.18	0.14	0.16	0.15	0.16
MgO	34.92	34.32	34.20	34.22	34.23	34.68	34.37	34.92	34.68
CaO	0.46	0.55	0.86	0.35	0.41	0.18	0.64	0.40	0.44
Na_2O	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
Toplam	**100.53**	**100.13**	**100.37**	**99.68**	**100.07**	**100.17**	**100.36**	**100.74**	**100.60**
Si	1.95	1.97	1.96	1.97	1.97	1.97	1.96	1.95	1.97
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04
Cr	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe^{3+}	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00
Fe^{2+}	0.15	0.18	0.17	0.19	0.19	0.18	0.17	0.15	0.18
Mn	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	1.78	1.76	1.75	1.77	1.76	1.78	1.76	1.78	1.77
Ca	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wo	0.85	1.04	1.61	0.66	0.77	0.33	1.20	0.73	0.81
En	90.10	89.83	89.16	89.71	89.67	90.21	89.53	90.03	89.95
Fs	9.05	9.13	9.23	9.63	9.56	9.46	9.27	9.24	9.24
Mg#	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.91	0.91	0.92	0.91

FeO*= toplam demir. Wo, En, Fs ve Mg# değerleri atomik oranlara göre hesaplanmıştır.

Hesaplanan Mg# değerlerine göre çizilen Al_2O_3 ve CaO içeriklerinin gösterildiği diyagramlarda Mg# oranındaki artışa bağlı olarak Al_2O_3 içeriklerinde hafif, CaO içeriklerinde ise belirgin olmak üzere pozitif bir yönsemeden söz etmek mümkündür (Şekil 7a, b). Bununla birlikte, sonuçlar farklı bölgelerdeki ortopiroksenitlerle karşılaştırılabilir kimyasal bileşimleri yansıtmaktadır. Özellikle Kırdağ ortopiroksenitleri içerisindeki ortopiroksenlerin Al_2O_3 içeriklerine göre Umman ve Solomon Adası ortopiroksenitleriyle benzer oldukları (Şekil 7a), ancak CaO içeriklerinin kısmen daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 7b).



Şekil 7. Kırdağ ortopiroksenitleri içerisindeki ortopiroksenlerin Al_2O_3 (a) ve CaO (b) içeriklerine karşı Mg# değerlerini gösteren değişim diyagramları. Karşılaştırılan alanlar Şekil 6' daki gibidir.

►***Figure 7****. Change diagrams showing in Mg# values against Al_2O_3 (a) and CaO (b) contents of the orthopyroxenes in the Kırdağ orthopyroxenites. The comparison areas are same as in Figure 6.*

4.2.3. Klinopiroksen
4.2.3. Clinopyroxene

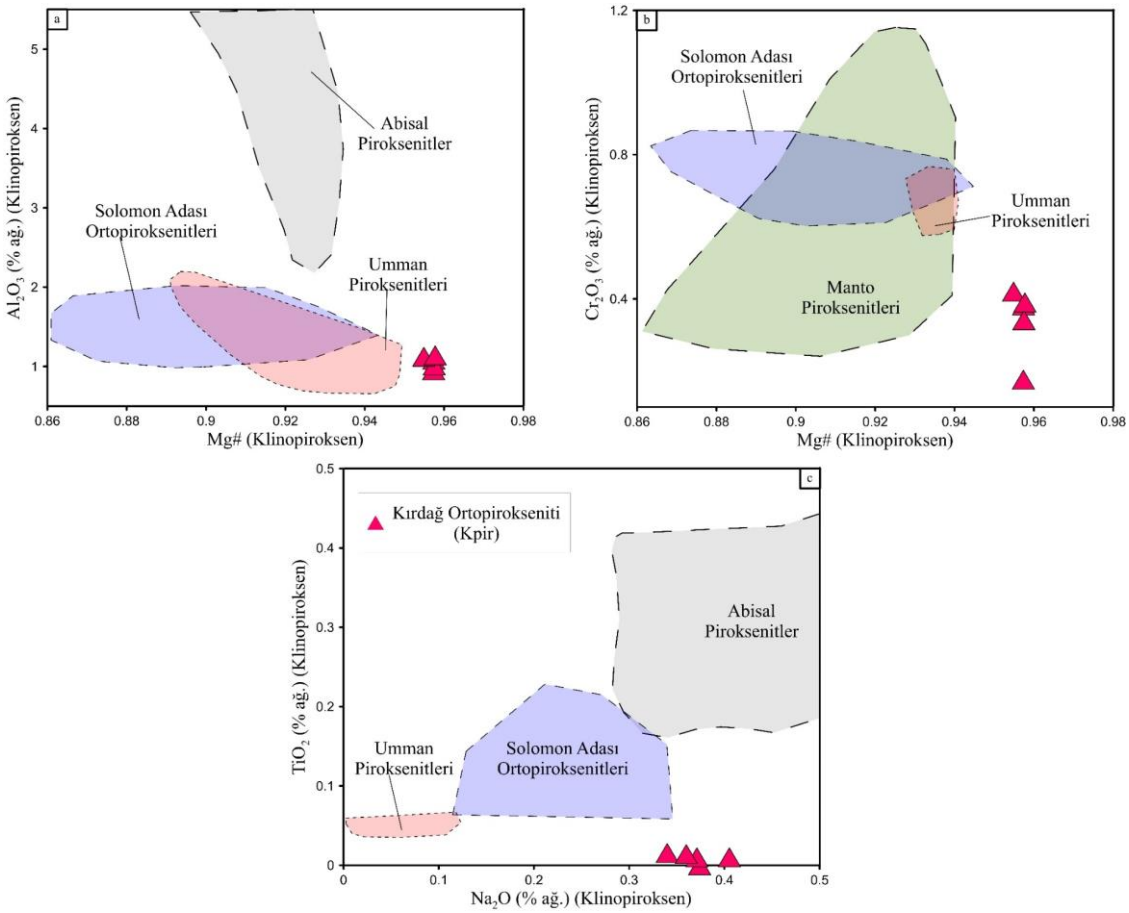
Klinopiroksenler, Kırdağ ofiyoliti perdiotitleri içerisindeki ortopiroksenitlerde düşük modal mineralojik bileşimde olsalar da petrografik çalışmalar sırasında tespit edilmiş ve analizlenmişlerdir. Klinopiroksenlerin mineral kimyası analiz sonuçlarına göre Al_2O_3 (% ağ.) içerikleri düşük olup 0.95-1.14 arasında değişmektedir. TiO_2 (% ağ.) içerikleri 0.00-0.02 arasında, Cr_2O_3 (% ağ.) içerikleri ise 0.18-0.42 arasında değişim göstermektedirler. FeO ve Na_2O_3 (% ağ.) içerikleri ise sırasıyla 1.88-1.98 ve 0.34-0.41 arasındadır. Mikroprop analiz sonuçlarının stikiyometrik hesaplamaları ile klinopiroksenlerin Mg# [$Mg/(Mg+Fe^{2+})$] değerlerinin yüksek ve 0.95-0.96 arasında değiştikleri tespit edilmiştir. Wo (26.01-27.22), En (69.50-70.83) ve Fs (3.09-3.28) değerlerine göre çoğunlukla ojit bileşimde oldukları belirlenmiştir.

Tablo 3. Ortopiroksenitlerden seçilen seçilen klinopiroksenlere ait mikroprop analiz sonuçları (% ağ.) ve hesaplanan katyon değerleri.
Table 3. *Microprobe analysis results (% wt.) of clinopyroxenes selected from orthopyrxenites and calculated cation values.*

Örnek	**P-11**	**P-11**	**P-11**	**PX-9**	**PX-9**		**Örnek**	**P-11**	**P-11**	**P-11**	**PX-9**	**PX-9**
SiO_2	57.04	56.95	57.00	57.84	58.02		**Al**	0.05	0.04	0.04	0.05	0.048
TiO_2	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01		**Cr**	0.01	0.01	0.01	0.01	0.011
Al_2O_3	1.09	0.95	1.01	1.12	1.14		**Fe^{3+}**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Cr_2O_3	0.38	0.18	0.34	0.42	0.39		**Fe^{2+}**	0.06	0.06	0.06	0.06	0.057
FeO*	1.92	1.90	1.88	1.98	1.89		**Mn**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004
MnO	0.10	0.11	0.04	0.09	0.12		**Mg**	1.31	1.30	1.29	1.27	1.283
MgO	24.18	23.91	23.81	23.51	24.02		**Ca**	0.48	0.48	0.50	0.50	0.493
CaO	12.35	12.36	12.73	12.81	12.84		**Na**	0.03	0.03	0.03	0.02	0.025
Na_2O	0.41	0.37	0.37	0.34	0.36		**Wo**	26.01	26.24	26.89	27.22	26.90
Toplam	**97.47**	**96.72**	**97.19**	**98.13**	**98.79**		**En**	70.83	70.62	70.00	69.50	70.01
Si	2.07	2.08	2.07	2.09	2.079		**Fs**	3.15	3.15	3.11	3.28	3.09
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000		**Mg#**	0.96	0.96	0.96	0.95	0.96

FeO* toplam demir. Wo, En, Fs ve Mg# değerleri atomik oranlara göre hesaplanmıştır.

Hesaplanan Mg# değerlerine karşı çizilen Al_2O_3 ve Cr_2O_3 içeriklerinde belirgin bir değişim görülmemektedir (Fig 8a, b). Na_2O_3 içeriklerine karşı TiO_2 içeriklerinde de benzer durum söz konusudur (Şekil 8c). Kırdağ ortopiroksenitleri içerisindeki klinopiroksenlerin mineral kimyası sonuçları farklı bölgelerdeki (Solomon Adası) ortopiroksenitlerle karşılaştırıldığında, özellikle Mg# değerlerinin daha yüksek, Al_2O_3 içeriklerinin benzer, TiO_2 ve Cr_2O_3 içeriklerinin ise daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 8a, b).



Şekil 8. Kırdağ ortopiroksenitleri içerisindeki klinopiroksenlere ait değişim diyagramları. (a) Al_2O_3 içeriğine karşı Mg# değeri, (b) TiO_2 içeriğine karşı Na_2O dağılımı, (c) Cr_2O_3 içeriğine karşı Mg# değeri. Karşılaştırma alanları Şekil 6'daki gibidir. Manto piroksenit alanı için Berly vd. (2006) ve ordaki referanslar dikkate alınmıştır.

Figure 8. *Variation diagrams of the clinopyroxenes in the Kırdağ orthopyroxenites. (a) Al_2O_3 content versus Mg# value, (b) TiO_2 content versus Na_2O distribution, (c) Cr_2O_3 content versus Mg# value. The comparison areas are same as in Figure 6. For the mantle pyroxenite field, Berly et al. (2006) and references therein were taken into consideration.*

4.3. Tüm kaya jeokimyası
4.3. Whole-rock geochemistry

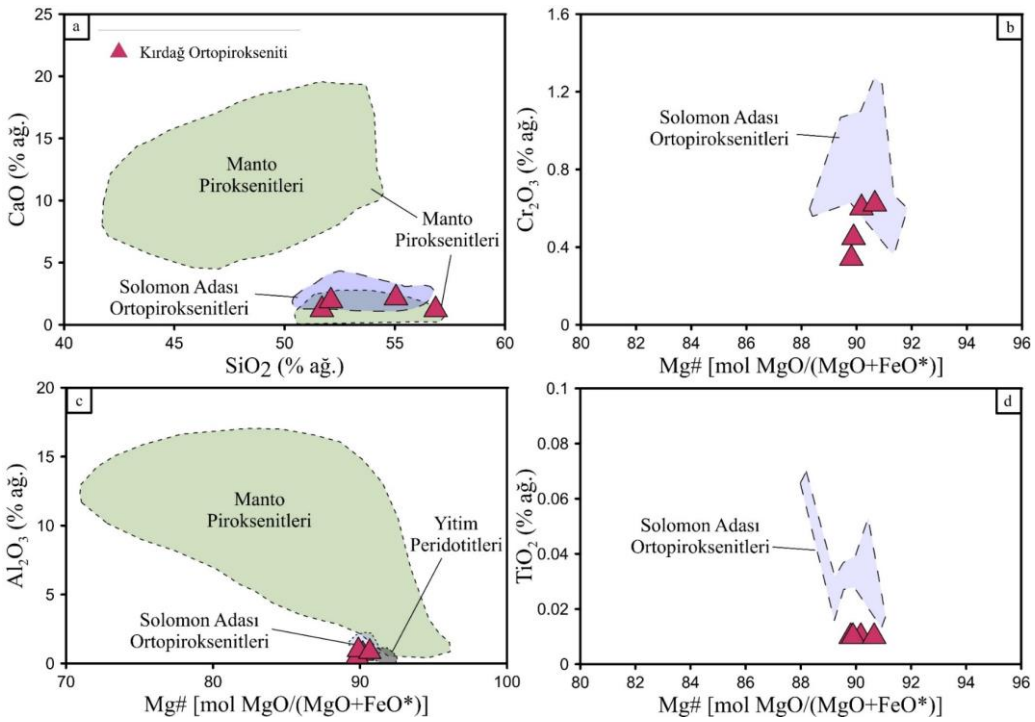
Kırdağ ofiyoliti manto kesiti içerisinde bulunan ortopiroksenitlerin tüm kayaç ana, iz ve nadir toprak element (NTE) analiz sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Bu bölümde, analiz edilen ortopiroksenit örneklerinden elde edilen sonuçlar farklı diyagramlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Petrografik çalışmalar sırasında taze örneklerin seçilmesine dikkat edilmesine rağmen, ateşte kayıp (% A.K.) değerleri 1.00-8.70 arasında değişmektedir. Bu durum bazı örneklerin serpantinleşmeden daha fazla etkilendiklerini yansıtmaktadır. Modal mineralojik bileşimleriyle uyumlu olarak, ortopiroksenitlerin SiO_2 (% ağ.) içerikleri 51.69-56.85 arasında, MgO (% ağ.) içerikleri 30.39-32.55 arasında değişmektedir. 0.50-0.97 arasında değişen Al_2O_3 (% ağ.) içeriklerine sahip olan bu ortopiroksenitlerin Fe_2O_3 (% ağ.) içerikleri ise 6.64-7.11 arasındadır. TiO_2 (% ağ.) içerikleri 0.01 seviyesinde kalan ortopiroksenitler, sırasıyla 1.21-2.16 ve 0.34-0.62 arasında değişim gösteren CaO ve Cr_2O_3 (% ağ.) içeriklerine sahiptir.

Örneklerin SiO_2 içeriklerine göre CaO içerikleri modal mineralojileriyle uyumlu dağılım segilemektedirler (Şekil 9a). Bunlara ilave olarak, ortopiroksenitlerin tüm kayaç Mg# [mol MgO/(MgO+FeO*)] değerleri hasaplanmış ve 89.81-90.66 arasında değişen oranlarda oldukları belirlenmiştir. Mg# değerlerine göre Cr_2O_3 içerikleri pozitif yönseme gösterirken (Şekil 9b), Al_2O_3 ve TiO_2 içeriklerinde ise belirgin bir yönseme görülmemektedir (Şekil 9c, d). Bu veriler ışığında genel olarak Kırdağ ortopiroksenitlerinin Solomon Adası ortopiroksenitleriyle benzer oldukları görülmektedir.

Tablo 4. Ortopiroksenit örneklerine ait tüm kayaç ana oksit (% ağ.), iz ve nadir toprak element (ppm) analiz sonuçları.
Table 4. *Whole-rock major (% wt.), trace, and rare earth element (ppm) anaysis results of orthopyroxenite samples.*

Örnek	P-11	PX-6	PX-7	PX-9		**Örnek**	P-11	PX-6	PX-7	PX-9
SiO_2	55.05	51.69	52.10	56.85		**Nb**	0.20	0.10	0.10	0.10
Al_2O_3	0.70	0.50	0.97	0.84		**Rb**	1.30	1.30	1.20	0.60
Fe_2O_3*	6.84	6.83	7.11	6.64		**Sr**	9.90	11.30	8.10	6.00
MgO	31.70	30.39	31.90	32.55		**V**	31.00	33.00	47.00	34.00
CaO	2.16	1.22	1.92	1.21		**Zr**	1.00	0.20	0.80	0.40
Na_2O	0.02	0.03	0.03	0.02		**Y**	1.12	0.94	0.61	0.44
K_2O	0.01	0.01	0.01	0.01		**La**	0.20	0.10	0.20	0.40
TiO_2	0.01	0.01	0.01	0.01		**Ce**	0.18	0.16	bdl	bdl
P_2O_5	0.01	0.02	0.02	0.01		**Pr**	0.03	0.04	0.02	bdl
MnO	0.14	0.13	0.13	0.14		**Nd**	bdl	bdl	bdl	bdl
Cr_2O_3	0.60	0.34	0.45	0.62		**Sm**	bdl	bdl	bdl	bdl
A.K (%)	2.70	8.70	5.20	1.00		**Eu**	bdl	bdl	bdl	bdl
Toplam	**99.94**	**99.87**	**99.85**	**99.90**		**Gd**	bdl	bdl	bdl	bdl
Ba	3.00	12.00	6.00	3.00		**Tb**	0.04	0.04	0.01	0.02
Ni	619.00	827.00	851.00	507.00		**Dy**	bdl	bdl	bdl	bdl
Sc	10.00	12.00	15.00	9.00		**Ho**	0.02	bdl	0.02	bdl
Be	1.00	1.00	1.00	1.00		**Er**	bdl	bdl	bdl	bdl
Co	69.50	70.00	78.10	68.20		**Tm**	bdl	bdl	bdl	bdl
Cs	0.50	1.20	0.50	0.20		**Yb**	0.05	0.05	0.05	0.05
Hf	bdl	bdl	bdl	bdl		**Lu**	0.25	0.23	bdl	0.02

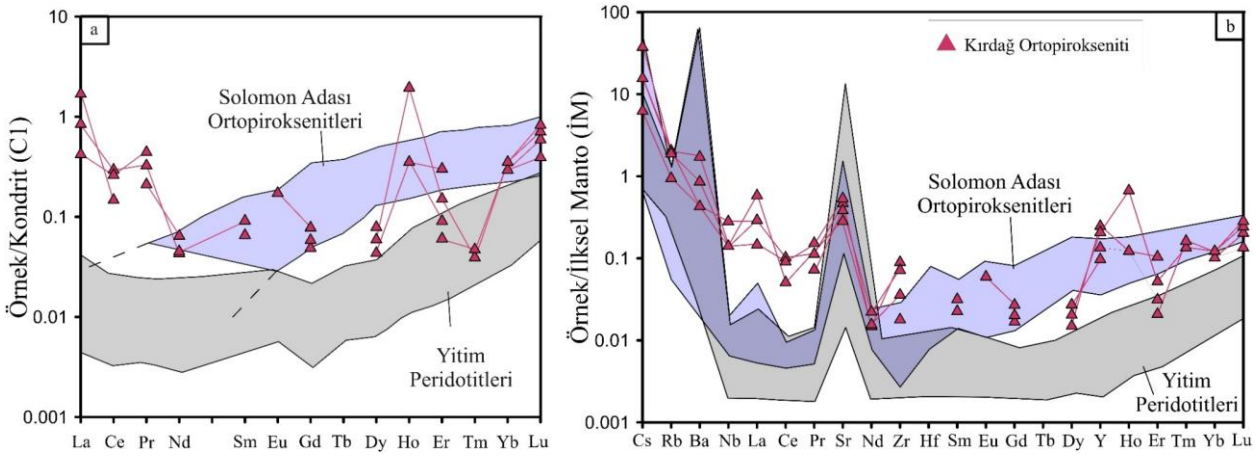
Fe_2O_3* =Toplam demir. A.K (%)= Ateşte kayıp oranları. bdl= Algılama limiti altı



Şekil 9. Kırdağ ortopiroksenitlerinin tüm kayaç değişim diyagramları. (a) CaO içeriğine karşı SiO_2, (b) Cr_2O_3 içeriğine karşı Mg# değeri, (c) Al_2O_3 içeriğine karşı Mg# ve (d) TiO_2 içeriğine karşı Mg# değişimleri. Karşılaştırma alanları: manto piroksenit ve Solomon Adası ortopiroksenit alanları Berly vd. (2006)' dan, yitim peridotitleri alanı Parkinson ve Pearce (1998)'den alınmıştır.

►***Figure 9.*** *Whole rock binary diagrams of Kırdağ orthopyroxenites. (a) CaO content versus SiO_2, (b) Cr_2O_3 content versus Mg# value, (c) Al_2O_3 content versus Mg#, (d) TiO_2 content versus Mg# value. Comparison areas: mantle pyroxenite, Solomon Island orthopyroxenite from Berly et al. (2006), and subduction peridotite from Parkinson and Pearce (1998).*

Kırdağ ortopiroksenit örneklerinin tüm kayaç iz ve nadir toprak element (NTE) içerikleri bakımından genel olarak tüketilmiş karakterde oldukları söylenebilir. Analizlerde bazı NTE'lerin ise tespit limiti altında kaldıkları görülmektedir (Tablo 4). Bu durum düşük klinopiroksen modal bolluklarıyla ilişkili olarak değerlenirilebilir. Kondrit normalize edilmiş NTE diyagramında (Şekil 10a), analiz edilen örneklerin hemen hemen hepsinin tükenmiş NTE desenleri sergilediği görülmektedir. Ancak, La, Ce ve Pr gibi hafif NTE' lerde orta ve ağır NTE içeriklerine göre belirgin bir zenginleşme görülmektedir (Şekil 10a). İlksel mantoya göre normalleştirilmiş çoklu iz element örümcek diyagramında (Şekil 10b), ortopiroksenitler büyük iyonlu litofil elementlerden (BİLE) akışkan-hareketli olanlar (örneğin, Cs, Rb, Ba ve Sr) bakımından belirgin zenginleşmeler göstermektedir. Özellikle, yüksek çekim alanlı elementler (YÇAE) açısından hafif negatif Nb yönsemesi gösterirken, Zr bakımından pozitif bir yönseme söz konusudur (Şekil 10b). Kırdağ ortopiroksenitlerinin kondrit ve ilksel mantoya normalize edilmiş NTE ve çoklu element dağılımlarının yitim peridotitlerine göre zenginleşme gösterdikleri, Solomon Adası ortopiroksenitleriyle de hemen hemen benzer dağılım sergiledikleri söylenebilir. Ancak, hafif NTE içerikleri bakımından daha yüksek bileşime sahip oldukları görülmektedir (Fig 10a, b).



Şekil 10. Kırdağ ortopiroksenitlerinin (a) kondrit normalize edilmiş nadir toprak element (NTE) ve (b) ilksel mantoya normalize edilmiş çoklu element dağılımları. Normalize değerler Sun & McDonough (1989)'dan alınmıştır. Karşılaştırma alanları; yitim peridotitleri Parkinson & Pearce (1998)'den, Solomon Adası ortopiroksenitleri Berly vd. (2006)'dan alınmıştır.

Figure 10. *(a) Chondrite normalized rare earth element (REE) and (b) primitive mantle normalized multi-element patterns of the Kırdağ orthopyroxenites. Normalized values are from Sun & McDonough (1989). Comparison areas: subduction peridotites from Parkinson & Pearce (1998), Solomon Island orthopyroxenites from Berly et al. (2006).*

5. Tartışma
5. Discussion

5.1. Petrojenez ve metasomatik süreçler
5.1. Petrogenesis and metasomatic processes

Yitim zonlarında gelişen ofiyolitlerin manto kesiminde çeşitli piroksenit damar veya dayklarına rastlamak mümkündür. Bu piroksenitlerin, yitim ortamlarında oluşan boninit tipi ergiyiklerin erken kümülat kayalarını temsil ettiğine dair görüşler vardır (örneğin, Varfalvy, 1997). Bununla birlikte, farklı yay ortamlarındaki piroksenitlerle ilgili çalışmalarda, piroksenit bileşimlerinin üst mafik kabukla eş kökenli olmadığı ileri sürülmüştür (örneğin, Bouilhol vd., 2009). Bu tür piroksenitler için de yay ergiyiklerinin yay altı manto peridotitleriyle reaksiyonu önerilmiştir. Bu nedenle, kristal birikimiyle oluşan piroksenitler için bile bir dereceye kadar eriyik-peridotit etkileşimi söz konusudur (örneğin, Belousov vd., 2021). Doğal olarak oluşan piroksenitlerin belirli bir silis içeriğinde deneysel olarak üretilen piroksenitlere göre piroksen minerallerinde

daha yüksek Mg# değerleri görülmekte ve bu da muhtemelen birleşik fraksiyonel kristalleşmeyi ve onları çevreleyen peridotitlerle reaksiyonlarını yansıtmaktadır (Belousov vd., 2021). Ayrıca, yitim zonu ofiyolitlerindeki harzburjit-dünit-kromitit-ortopiroksenit birlikteliği, mantonun çeşitli ergiyik etkileşim süreçleri (boninitik, toleyitik) tarafından meydana gelen magmatik modifikasyonun bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (örneğin, Tamura & Arai, 2006; Page vd., 2008). Benzer litolojik birliktelik Kırdağ ofiyoliti manto kesimi için de büyük olasılıkla geçerli olduğu düşünülmektedir (Şekil 4a) (Bilici, 2022).

Kırdağ ofiyoliti manto kayaçlarından en yaygın litolojiyi oluşturan harzburjitler içerisinde çeşitli boyutlarda ortopiroksenitler dayklar halinde bulunmaktadır (Şekil 4b, c, d). Petrografik incelemeler sırasında ortopiroksen mineralleri arasında gözlenen küçük boyutlu klinopiroksenlerin varlığı ve yine ortopiroksen kristalleri içerisinde eksolusyon lamelleri şeklinde gözlenen klinopiroksen oluşumları (Şekil 5a-f), tipik kümülat doku ve köken ile birebir örtüşmemektedir. Bu özellikler daha çok peridotit ile metasomatik bir madde (sıvı ve/veya ergiyik) arasındaki reaksiyonlar yoluyla ortaya çıkan kökenlerle ilişkilendirilebilir.

Son yıllarda yapılan araştırmalarda, ergiyik-kaya reaksiyon süreci piroksenit oluşumları için aktif olarak tartışılan modeldir. Buna göre başlangıçta peridotit ana kayaların olivinleri silis bakımından zengin ergiyik ile etkileşime girerek çözünmekte ve daha sonra piroksen mineralleri kristalleşmektedir (örneğin, Kelemen vd., 1992; Morishita vd., 2003; Python vd., 2003; Berly vd., 2006; Bodinier vd., 2008; Laukert vd., 2014; Bilici & Kolaylı, 2018; Basch vd., 2019; Karimov vd., 2020; Belousov vd., 2021; Xu vd., 2023; Zhang vd., 2023). Piroksenitlerin kökeni peridotitlerle ilişkili olduğundan genel olarak yüksek piroksen Mg# değerlerine sahiptirler ve modal mineralojilerinde olivinler oldukça azdır veya hiç yoktur. Peridotitlerin doğrudan ergimesi silisce zengin ergiyikler üretemez, ancak yiten okyanus kabuğunun kısmi ergimesinden sonra silisce zengin ergiyikler üretebilir ve ortaya çıkan ergiyikler Na_2O ve Al_2O_3 içerikleri bakımından nispeten zengin olabilir (örneğin, Borghini vd., 2017). Manto peridotitlerinde silisce zengin sıvı/ergiyik etkileşimi meydana gelmişse piroksenit oluşabilir. Yiten okyanusal kabuk ve tortullar önce daha yüksek basınç altında ergimeye başlar ve bunun sonucunda silis bakımından zengin ergiyik, peridotitler içerisinde olivin içermeyen ortopiroksenit oluşumunu gerçekleştirebilir (örneğin, Xu vd., 2023). Ayrıca, deneysel çalışmalarda ortopiroksenit oluşumlarının peridotit-piroksenit sınırları boyunca silisce zengin ergiyikler ile peridotit arasındaki reaksiyonlarda da gözlendikleri rapor edilmiş (örneğin, Lambart vd., 2012; Wang vd., 2013; Borghini vd., 2017) ve Si-ergiyik+olivin → ortopiroksen±klinopiroksen reaksiyonuyla açıklanmıştır.

Bu çalışmada, Kırdağ ofiyoliti manto bölümünde bulunan ortopiroksenitlerdeki krom spineller göreceli olarak yüksek modal bollukta ve genellikle yarı özşekilli ve özşekilli kristaller halinde gözlenmektedir (Şekil 5). Değişik boyutlu yarı özşekilli ve özşekilli bu krom spinellerin varlığı harzburjitlerden kalıntı olmadıklarını, ergiyik etkileşimi sonucunda kristalleştiklerinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir (örneğin, Karimov vd., 2020). Tüketilmiş karakter segileyen piroksen bileşimleri (Opir Mg# 0.90-0.92 ve Kpir Mg# 0.95-0.96) ve boninitik alana yakın olan krom spinel bileşimleri (Cr# 0.63-0.68) ile daha çok refrakter özellikler sergilemektedirler (Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8). Bu tükenmiş bileşim ve klinopiroksenlerin modal mineralojik azlığı, çalışılan ortopiroksenitllerin silis ve krom bakımından nispeten zengin, alüminyum ve kalsiyum bakımından ise oldukça fakir olan tükenmiş bir ergiyikten kristalleştiklerini düşündürmektedir. Bu durum, Cr_2O_3 içerikleri bakımından kısmen zengin ve Al_2O_3 içerikleri bakımından fakir olan piroksenlerin kimyasal bileşimi ile desteklenmektedir (Şekil 7a ve Şekil 8a-c). Ayrıca, ortopiroksenitlerdeki krom spinellerin ve piroksenlerin kimyasal bileşimleri nispeten dar aralıkta değişen konsantrasyon dağılımı gösterir (Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8) ve bu da homojen bir kaynağa işaret etmektedir (örneğin, Python vd., 2003). Özellikle ortopiroksenlerin oldukça yüksek Mg# değerleri, ergiyik-kayaç reaksiyon sürecinin ortopiroksenitlerin oluşumunda büyük bir rol oynadığının önemli bir kanıtı olarak değerlendirilebilir.

Kırdağ ofiyoliti ortopiroksenitleri modal mineralojik bileşimleriyle de ilişkili olarak oldukça yüksek tüm kaya Mg# değerlerine sahiptir ve SiO_2, CaO, Cr_2O_3, Al_2O_3 ve TiO_2 içeriklerine göre manto piroksenitlerine ve Solomon Adası ortopiroksenitlerine benzer oldukları görülmektedir (Şekil 9). Yüksek modal piroksen bileşiminin, piroksenitler ve peridotit arasındaki reaksiyon doğası ile birlikte, ana ergiyiğin silis bakımından zengin bileşimini yansıtmaktadır. Ayrıca, jeokimyasal olarak bu kayaçların hafif NTE dağılımlarının orta ve ağır NTE'lere göre zenginleşmesi (Şekil 10a), boninitik ergiyiklere benzer şekilde yüksek sıvı bileşen içeriğini yansıtmaktadır. Kayaçlardaki klinopiroksenlerin düşük Na_2O ve düşük Al_2O_3 içerikleri de bu durumu destekler niteliktedir (Şekil 8a, c), çünkü bu içeriklerin örneğin artan sıvı içeriği ile azalması beklenir (örneğin, Green vd., 2014). Ekileşime giren ergiyik veya sıvılar, özellikle BİLE gibi önemli miktarlarda sıvı-hareketli elementler içermesi gerekir ve bu elementlerin normal harzburjitik mantoya göre zenginleşmesine neden olur

(örneğin, Berly vd., 2006). Kırdağ ofiyoliti ortopiroksenitlerinde bu zenginleşmeler açıkça görülmektedir (Şekil 10b). Çalışılan ortopiroksenit örneklerinin kondrite normalize NTE ve ilksel mantoya normalize çoklu element dağılımlarının Solomon Adası ortopiroksenitlerine (Berly vd., 2006) benzer oldukları görülmektedir (Şekil 10a, b). Buna ilave olarak, çalışılan ortopiroksenitlerin ana kayaları olan harzburjitler için de ergiyik/sıvı-kaya etkileşimini yansıtan bu element zenginleşmeleri daha önce belirlenmiş ve reaktif bir köken ile ilişkilendirilmiştir (Bilici 2022).

5.2. Tektonik etkiler
5.2. Tectonic implications

Bu çalışmada, Kırdağ ofiyoliti ortopiroksenitlerinin tektonik kökeni mineral komposizyonları ve tüm kayaç jeokimyasal bileşimleriyle desteklenmiştir. Krom spinel kimyalarına göre, incelenen ortopiroksenitlerin yüksek Cr#, düşük Mg# ve Fe^{3+}# değerleri ile düşük TiO_2 içeriklerinin (Şekil 6), birçok araştırmacı tarafından da önerildiği gibi (örneğin, Python vd., 2003; Berly vd., 2006; Tamura & Arai 2006; Kaczmarek vd., 2015; Uysal vd., 2016) dünyanın çeşitli bölgelerindeki ofiyolit kuşaklarındaki yitim zonu ortamını yansıtan krom spinellerin karakteristik özellikleriyle benzer oldukları görülmektedir. Ortopiroksen ve klinopiroksen bileşimleri yitim zonunda gelişen piroksenitlerin piroksen kimyalarıyla benzerdir (Şekil 7 ve Şekil 8). Ayrıca, tüm kaya iz element jeokimyasal bileşimleri kondrite göre hafif ve ağır NTE bakımından zenginleşme (Şekil 10a) ve ilksel mantoya göre BİLE bakımından zenginleşme göstemektedirler (Şekil 10b). Bu elementlerin yitim zonu ortamlarında hareketli oldukları bilinmektedir (Brenan vd., 1995; Ayers vd., 1997). Elde edilen bu veriler, Kırdağ ofiyoliti manto bölümündeki ortopiroksenitlerin yitim zonu bölgesi petrolojik süreçleriyle ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, ortopiroksenitlerin peridotitler içerisinde dayklar şeklinde gözlenmiş olmaları da bunların bir ada yayı kabuğunun tabanında gelişen kümülatlardan ziyade, bir yitim zonu üzerindeki manto kaması içinde oluştuklarını kanıtlar niteliktedir.

6. Sonuçlar
6. Conclusions

Bu çalışmada, Kırdağ ofiyolitinin (Erzurum, NE, Türkiye) manto kesitindeki ortopiroksenitlerin petrografisi, mineral kimyası ve tüm kaya jeokimyasal verilerine göre bir yitim zonu üzerindeki manto kamasında meydana gelen ergiyik-kaya etkileşim süreci irdelenerek açıklanmaya çalışılmıştır. Petrografik incelemelerde ortopiroksenit örneklerinde gözlenen klinopiroksen eksolüsyon lamelleri ile öz ve yarı öz şekilli krom spinel kristallerin varlığı, tipik kümülat dokuya nazaran ergiyik etkileşim sürecini yansıtan özellikler sunmaktadır. Özellikle, krom spinellerin karakteristik şekilleri bunların peridotitlerden kalıntı olmadıklarını, ortopiroksenitlerin oluşumu sırasında ergiyik etkileşimine bağlı olarak kristalleştiklerini kanıtlamaktadır. Ortopiroksenit örneklerinin mineral kimyası analizleri, hem krom spinellerin hem de piroksenlerin yitim zonunda gelişen köken kayaçlarla ilişkili olduklarını göstermektedir. Ayrıca, kondrite normalize tüm kaya NTE dağılımları ve ilksel mantoya normalize çoklu element dağılımlarındaki tüketilme ve zenginleşme oranları yitim zonu manto kamasında uçucularca zengin ergiyiklerle etkileşim süreçlerinin etkisini açıklamaktadır. Yani, ana harzburjitlerin bu ergiyiklerle etkileşimi sonucu peridotiti reaktif bir çözünmeye uğratarak yoğun ortopiroksen kristalleşmesini, dolayısıyla ortopiroksenit oluşumunu sağlamıştır. Böylelikle, çalışılan ortopiroksenitlerin yitim ortamındaki manto kamasında Si açısından zengin boninit benzeri ergiyikle etkileşimi nedeniyle harzburgitlerdeki olivinlerin ortopiroksenlerle yer değiştirmesi sonucunda geliştikleri söylenebilir.

Katkı belirtme
Acknowledgement

Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2018-6828 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir. Mineral kimyası analizlerinin yapımında Prof. Dr. Emre AYDINÇAKIR ve Prof. Dr. Cem YÜCEL'in katkıları çok kıymetlidir. Ayrıca yazar, editöryal yönetim için Doç Dr. Mehmet Ali GÜCER' e ve yapmış oldukları eleştirilerden dolayı üç hakeme teşekkürlerini sunar.

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmemektedir.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazar bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Arai, S., Shimizu, Y., Ismail, S.A. & Ahmed, A.H. (2006). Low-T formation of high-Cr spinel with apparently primary chemical characteristics within podiform chromitite from Rayat, northeastern Iraq. *Mineralogical Magazine*, 70, 499–508.

Aydınçakır, E. (2016). Subduction-related Late Cretaceous high K volcanism in the Central Pontides orogenic belt: Constraints on geodynamic implications. *Geodinamica Acta*, 28 (4), 379–411.

Aydınçakır, E., Yücel, C., Kaygusuz, A., Bilici, Ö. & Yılmazer, S. (2024). Eocene magmatism related to postcollisional extension in the Eastern Pontides (NE Türkiye): 40Ar-39Ar geochronology, geochemistry, and whole-rock Sr-Nd-Pb-Hf isotopes. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 33, 530-556. doi:10.55730/1300-0985.1928

Ayers, J. C., Dittmer, S. K. & Layne, G. D. (1997). Partitioning of elements between peridotite and H2O at 2.0–3.0 GPa and 900–1100 °C, and application to models of subduction zone processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 150, 381–398.

Barnes, S.J. & Roeder, P.L. (2001). The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of Petrology*, 42 (12), 2279–2302.

Basch, V., Rampone, E., Crispini, L., Ferrando, C., Ildefonse, B. & Godard, M. (2019) Multi-stage reactive formation of troctolites in slowspreading oceanic lithosphere (Erro-Tobbio, Italy): a combined field and petrochemical study. *Journal of Petrology*, 60 (5), 873-906. https ://doi.org/10.1093/petrology/egz019

Belousov, I., Batanova, V., Sobolev, A., Savelieva, G., Danyushevsky, L. & Draayers, E. (2021) Pyroxenites from mantle section of Voykar Ophiolite–Melt/peridotite reaction and crystallization in SSZ mantle. *Lithos*, 388:106063

Berly, T.J., Hermann, J., Arculus, R.J. & Lapierre, H. (2006). Supra-subduction zone pyroxenites from San Jorge and Santa Isabel (Solomon Islands). *Journal of Petrology*, 47(8), 1531–1555.

Bilici, Ö. (2022). Reactive harzburgite and ultimate dunite formation as a result of boninite-like melt interaction: Petrological evidence from the Kırdağ ophiolite (Erzurum, NE Turkey). *Journal of African Earth Science*, 193, 104601. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104601

Bilici, Ö., & Kolayli, H. (2018). Mineral records of the pyroxenites formed within harzburgites (Ulaş, Sivas, Turkey): implications on petrogenesis and tectonic setting. *Turkish Journal of Earth Science, 27*(5), 384-404. doi:10.3906/yer-1802-13

Bodinier, J.L., Garrido, C.J., Chanefo, I., Bruguier, O. & Gervilla, F. (2008). Origin of pyroxenite-peridotite veined mantle by refertilization reactions: Evidence from the Ronda peridotite (Southern Spain). *Journal of Petrology*, 49(5), 999–1025. doi: 10.1093/petrology/egn014.

Bouilhol, P., Burg, J.P., Bodinier, J.L., Schmidt, M.W., Dawood, H. & Hussain, S. (2009). Magma and fluid percolation in arc to forearc mantle: evidence from Sapat (Kohistan, Northern Pakistan). *Lithos*, 107 (1–2), 17–37.

Borghini, G., Fumagalli, P. & Rampone, E. (2017). Partial melting of secondary pyroxenite at 1 and 1.5 GPa and its role in upwelling heterogeneous mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172, 70–93.

Borghini, G., Rampone, E., Zanetti, A., Class, C., Cipriani, A., Hofmann, A.W. & Goldstein, S.L. (2013). Meter-scale Nd isotopic heterogeneity in pyroxenite-bearing Ligurian peridotites encompasses global-scale upper mantle variability. *Geology*, 41(10), 1055–1058. doi: 10.1130/G34438.1.

Bodinier, J.L., Garrido, C.J., Chanefo, I., Bruguier, O. & Gervilla, F. (2008) Origin of pyroxenite–peridotite veined mantle by refertilization reactions: evidence from the Ronda peridotite (Southern Spain). *Journal of Petrology*, 49,999–1025.

Brenan, J.M., Shaw, H.F., Ryerson, F.J. & Phinney, D.L. (1995). Mineral–aqueous fluid partitioning of trace elements at 900°C and 2.0 GPa: constraints on the trace element chemistry of mantle and deep crustal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 3331–3350.

Buket, E. & Ataman, G. (1982). Erzincan – Refahiye ultramafik ve mafik kayaçlarının petrografik ve petrolojik özellikleri. *Yerbilimleri*, 91, 5-17.

Chen, L.H. & Zhou, X.H. (2005) Subduction-related metasomatism in the thinning lithosphere: Evidence from a composite dünite orthopyroxenite xenolith entrained in Mesozoic Laiwu high-Mg diorite, North China Craton. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6, Q06008. https:// doi. org/ 10. 1029/ 2005GC000938

Çelik, O.F., Chiaradia, M., Marzoli, A., Billor, Z. & Marschik, R. (2013). The Eldivan ophiolite and volcanic rocks in the Izmir-Ankara-Erzincan suture zone, northern Turkey: geochemistry, whole-rock geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic characteristics. Lithos 172–173, 31–46.

Dantas, C., Ceuleneer, G., Gregoire, M., Python, M., Freydier, R., Warren, J. & Dick, H.J.B. (2007) Pyroxenites from the Southwest Indian Ridge, 9°–16°E: cumulates from incremental melt fraction produced at the top of a cold melting regime. *Journal of Petrology*, 48:647–660.

Dantas, C., Gregoire, M., Koester, E., Conceicao, R.D. & Rieck, N. (2009) The lherzolite–websterite xenolith suite from Northern Patagonia (Argentina): evidence of mantle–melt reaction processes. *Lithos*, 107:107–120.

Dewey, J.F., Pitman, W.C., Ryan, W.B.F. & Bonnin, J. (1973). Plate tectonics and evolution of the Alpine system. *Geological Society of American Bulletin*, 84, 3137–3180.

Dilek Y, Imamverdiyev N & Altunkaynak Ş (2010). Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: Collisioninduced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *International Geology Review*, 52 (4-6), 536-578. https://doi.org/10.1080/00206810903360422

Downes, H. (2007). Origin and significance of spinel and garnet pyroxenites in the shallow lithospheric mantle: Ultramafic massifs in orogenic belts in Western Europe and NW Africa. *Lithos*, 99(1−2), 1–24. doi: 10.1016/j.lithos.2007.05.006.

Frets, E., Tommasi, A., Garrido, C.J., Padron-Navarta, J.A., Amri, I. & Targuisti, K. (2012). Deformation processes and rheology of pyroxenites under lithospheric mantle conditions. *Journal of Structural Geology*, 39, 138-157. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.02.019

Garrido, C.J. & Bodinier, J.L. (1999). Diversity of mafic rocks in the Ronda peridotite: Evidence for pervasive melt-rock reaction during heating of subcontinental lithosphere by upwelling asthenosphere. *Journal of Petrology*, 40(5), 729–754.

Green, D.H., Hibberson, W.O., Rosenthal, A., Kovacs, I., Yaxley, G.M., Falloon, T.J. & Brink, F. (2014). Experimental study of the influence of water on melting and phase assemblages in the upper mantle. *Journal of Petrology*, 55 (10), 2067–2096.

Ishii, T., Robinson, P.T., Maekawa, H. & Fiske, R. (1992). Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawra–Mariana forearc, Leg 125. In: *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. Vol. 125 of Izu- Bonin–Mariana Region* (ss. 445-485). Texas A & M University, Ocean Drilling Program, College Station, TX.

Kaczmarek, M.A., Jonda, L. & Davies, H.L. (2015) Evidence of melting, melt percolation and deformation in a supra-subduction zone (Marum ophiolite complex, Papua New Guinea). *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 170(2), 19. https:// doi. org/ 10.1007/ s00410- 015-1174-z

Karimov, A.A., Gornova, M.A., Belyaev, V.A., Medvedev, A.Y. & Bryanskiy, N.V. (2020). Genesis of pyroxenite veins in supra-subduction zone peridotites: Evidence from petrography and mineral composition of Egiingol massif (Northern Mongolia). *China Geology*, 3(2), 299-313.

Kaygusuz A, Yücel C, Aydınçakır E, Gücer MA & Ruffet G (2022). 40Ar-39Ar dating, whole-rock and Sr-Nd isotope geochemistry of the Middle Eocene calc-alkaline volcanic rocks in the Bayburt area Eastern Pontides (NE Turkey): implications for magma evolution in extension-related setting. *Mineralogy and Petrology*, 116, 379-399. https://doi.org/10.1007/s00710-022-00788-w

Kelemen, P.B., Dick, H.J.B. & Quick, J.E. (1992). Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle. *Nature*, 358, 635–641.

Kerr, A.C., Saunders, A.D., Tarney, A.D., Berry, N.H. & Hards, V.L. (1995). Depleted mantle-plume geochemical signatures: no paradox for plume theories. *Geology*, 23, 843–846.

Konak, N. & Hakyemez, H.Y. (2008). 1/100.000 Scale Turkish Geology Map Series, Tortum- H47 Sheet, vol. 95. General Directorate of Mineral Research and Exploration, Geology Department, Ankara, p. 46.

Konak, N., Hakyemez, H.Y., Bilgic, T., Bilgin, R., Hepşen, N. & Ercan, T. (2001). Geology of Northeast Pontides (Oltu-Olur-Şenkaya-Narman-Uzundere-Yusufeli). General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA), Ankara. Report 10489.

Konak, N. & Sumengen, M. (2009). 1/100.000 Scale Turkish Geology Map Series, Kars-H48 Sheet, vol. 106. General Directorate of Mineral Research and Exploration, Geology Department, Ankara, p. 23.

Lambart S, Laporte D, Provost A, Schiano P (2012) Fate of pyroxenite-derived melts in the peridotitic mantle. Thermodynamic and experimental constraints. *Journal of Petrology*, 53, 451–476.

Lambart, S., Baker,M.B., Stolper, E.M., 2016. The role of pyroxenite in basalt genesis:Melt-PX, a melting parameterization for mantle pyroxenites between 0.9 and 5GPa. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121 (8), 5708–5735. https://doi.org/10.1002/2015JB012762

Laukert, G., Von der Handt, A., Hellebrand, E., Snow, J., Hoppe, P. & Klugel, A. (2014) High-pressure reactive melt stagnation recorded in abyssal pyroxenites from the ultraslow-spreading Lena Trough, Arctic Ocean. *Journal of Petrology*, 55, 427–458. https://doi.org/10. 1093/petrology/egt073

Le Roux, V. & Liang, Y. (2019). Ophiolitic pyroxenites record boninite percolation in subduction zone mantle. *Minerals*, 9 (9), 22.

Morishita, T., Arai, S. & Green, D.H. (2003). Evolution of low-Al orthopyroxene in the Horoman Peridotite, Japan: an unusual indicator of metasomatizing fluids. *Journal of Petrology*, 44, 1237–1246.

Okay, A. & Sahintürk, Ö. (1997). Geology of the eastern Pontides. In: Robinson, A.G. (Ed.), Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region, vol. 68. AAPG Memoir, pp. 291–311.

Okay, I.A. & Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. *Journal of Geological Society*, 156, 475–515. London Special Publication.

Page, P., Bedard, J.H., Schroetter, J.M. & Tremblay, A. (2008). Mantle petrology and mineralogy of the Thetford Mines ophiolite complex. *Lithos*, 100, 255–292.

Parkinson, I.J. & Pearce, J.A. (1998). Peridotites from the Izu – Bonin – Mariana forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt- mantle interaction in a suprasubduction zone setting. *Journal of Petrology*, 39, 1577–1618.

Parlak, O., Çolakoğlu, A., Dönmez, C., Sayak, H., Yıldırım, N., Türkel, A. & Odabaşı, I. (2013). Geochemistry and tectonic setting of ophiolites along the Izmir–Ankara–Erzincan suture zone in northeastern Anatolia. *Geological Society*, 372, 75–106. Special Publications.

Pearson, D.G., Davies, G.R. & Nixon, P.H. (1993). Geochemical constraints on the petrogenesis of diamond facies pyroxenites from the Beni Bousera peridotite massif. *Journal of Petrology*, 34, 125–172.

Python, M. & Ceuleneer, G. (2003). Nature and distribution of dykes and related melt migration structures in the mantle section of the Oman ophiolite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4 (7), 8612.

Robertson, A., Parlak, O., Ustaomer, T., Taslı, K., Inan, N., Dumitrica, P. & Karaoglan, F. (2013). Subduction, ophiolite genesis and collision history of Tethys adjacent to the Eurasian continental margin: new evidence from the Eastern Pontides, Turkey. *Geodinamica Acta*, 26, 230–293.

Robertson, A.H.F. & Dixon, J.E. (1984). Introduction: Aspects of the geological evolution of the eastern Mediterranean. Geological Society, London, 17, 1–74. Special Publications.

Rogkala, A., Petrounias, P., Tsikouras, B. & Hatzipanagiotou, K. (2017). New occurrence of pyroxenites in the Veria-Naousa Ophiolite (North Greece): Implications on their origin and petrogenetic evolution. *Geosciences*, 7(4), 92. doi: 10.3390/geosciences7040092.

Santos, J.F., Scharer, U., Ibarguchi, J.I.G. & Girardeau, J. (2002). Genesis of pyroxenite-rich peridotite at Cabo Ortegal (NW Spain): geochemical and Pb–Sr–Nd isotope data. *Journal of Petrology*, 43, 17–43.

Sarifakioğlu, E., Özen, H. & Winchester, J.A. (2009). Petrogenesis of Refahiye ophiolite and its tectonic significance for Neotethyan ophiolites along the Izmir–Ankara–Erzincan suture zone. *Turkish Journal of Earth Science*, 18, 187–207.

Sun, S.S. & McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD, Norry MJ (eds) *Magmatism in the ocean basins*. *Geological Society*, London, 42, 313–345. Special Publications.

Şengör, A. M. C. (1980). Türkiye'nin Neotektoniğinin Esasları [Fundamentals of the neotectonics of Turkey]. *Publication of Geological Society of Turkey*, 1-40.

Şengör, A.M.C. & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 81–241.

Şengör, A.M.C., Özeren, S., Genç, T. & Zor, E. (2003). Anatolian high plateau as a mantle supported, north-south shortened domal structure. *Geophysical Research Letter*, 30, 8045.

Tamura, A. & Arai, S. (2006). Harzburgite–dunite–orthopyroxenite suite as a record of supra- subduction zone setting for the Oman ophiolite mantle. *Lithos*, 90, 43–56.

Tribuzio, R., Tiepolo, M. & Fiameni, S. (2008). A maficultramafic cumulate sequence derived from boninite-type melts (Niagara Icefalls, northern Victoria Land, Antarctica). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(5): 619–633.

Ustaömer, T. & Robertson, H.F.A. (2010). Late Paleozoic–early Cenozoic development of the eastern Pontides (Artvin area), Turkey: stages of closure of Tethys along the southern margin of Eurasia. *Geological Society*, London 340, 281–327. Special Publications.

Uysal, I., Ersoy, E.Y., Dilek, Y., Kapsiotis, A. & Sarıfakıoğlu, E. (2016). Multiple episodes of partial melting, depletion, metasomatism and enrichment processes recorded in the heterogeneous upper mantle sequence of the Neotethyan Eldivan ophiolite, Turkey. *Lithos*, 246–247, 228–245.

Uysal, I., Ersoy, E.Y., Dilek, Y., Escayola, M., Sarıfakıoğlu, E., Saka, S. & Hirata, T. (2015). Depletion and refertilization of the Tethyan oceanic upper mantle as revealed by the early Jurassic Refahiye ophiolite, NE Anatolia, Turkey. *Gondwana Research*, 27, 594–611.

Uysal, I., Dokuz A., Kapsiotis, A., Saka, S., Karslı, O., Kaliwoda, M. & Müller, D. (2017). Petrogenesis of ultramafic rocks from the eastern Orhaneli ophiolite, NW Turkey: Hints on the initiation and evolution of melt-peridotite interaction processes within a heterogeneously depleted mantle section. *Journal of Asian Earth Sciences*, 148, 51–64.

Varfalvy, V. (1997). Petrology and geochemistry of pyroxenite dykes in upper mantle peridotites of the North Arm Mountain Massif, Bay of Islands Ophiolite, Newfoundland: Implications for the genesis of boninitic and related magmas. *The Canadian Mineralogist*, 35(2), 543–570.

Wang, J.G., Hu, X.M., Garzanti, E. & Wu, F.Y. (2013). Upper Oligocene–Lower Miocene gangrinboche conglomerate in the Xigaze area, Southern Tibet: Implications for Himalayan uplift and paleo-Yarlung–Zangbo Initiation. *The Journal of Geology*, 121, 425–444.

Wang, C., Liang, Y., Dygert, N. & Xu, W. (2016). Formation of orthopyroxenite by reaction between peridotite and hydrous basaltic melt: an experimental study. Contribution to Mineralogy and Petrology, 171(8), 77. https://doi.org/10.1007 s004100161287z

Xiong, Q., Zheng, J.P., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y. & Pearson, N.J. (2014). Pyroxenite Dykes in Orogenic Peridotite from North Qaidam (NE Tibet, China) Track Metasomatism and Segregation in the Mantle Wedge. *Journal of Petrology*, 55(12), 2347–2376.

Xu, X.Z., Xiong, F.H., Zoheir, B., Yan, J.Y., Zhang, B.Y., Gao, J. & Yang, J.S. (2023). Genesis of pyroxenite veins in the Zedang ophiolite, southern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 97(3), 707–726. https://doi.org/10.1111/1755-6724.14989

Yılmaz, Y., Tüysüz, O., Yiğitbaş,, E., Genç, S.C. & Şengör, A.M.C. (1997). Geology and tectonic evolution of the Pontides. In: Robinson, A.G. (Ed.), *Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Regions*, (68, 183-226). American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, OK, Memoirs.

Zhang, Z.Y., Liu, C.Z., Liang, Y., Liu, T., Zhang, C., Liu, B.D., Lin, Y.Z., Zhang, W.Q. & Ji, W.B. (2023). Pyroxenite–harzburgite sequences in the Dazhuqu ophiolite (Southern Tibet) formed through hydrous melt infiltration and melt–peridotite reaction. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 178, 92.

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 161-169 doi: 10.17714/gumusfenbil.1549384 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Bebek pudralarında doğal radyoaktivite ve radyolojik risklerin değerlendirilmesi

Evaluation of natural radioactivity and radiological risks in baby powders

Serdar DİZMAN*[1], Kübra CAMGÖZ[2]

[1]*Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 53100, Rize*

[2]*Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 53100, Rize*

• Geliş tarihi / *Received*: 13.09.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 19.01.2025

Öz

Tüm canlılar yaşamları boyunca sürekli olarak dünyada mevcut olan doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından yayımlanan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaktadır. Bu nedenle, özellikle insanların kullandıkları ürünler ve yaşadıkları çevrenin radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu kapsamda, yerel marketlerden satışa hazır farklı firmalara ait 12 adet bebek pudrası örneği temin edildi. Pudra örneklerinde ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K konsantrasyonları yüksek saflıkta germanyum detektörü (HPGe) kullanılarak ölçüldü. İncelenen pudra örneklerinde ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotop konsantrasyonlarının sırasıyla 2.31-12.71 Bq/kg, 1.26-13.68 Bq/kg ve 4.69-38.21 Bq/kg aralığında değiştiği belirlendi. Pudra örneklerinde ortalama ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktivite konsantrasyonları sırasıyla 5.11 ± 0.81 Bq/kg, 4.17 ± 0.59 Bq/kg ve 17.30 ± 1.59 Bq/kg olarak bulundu. İncelenen pudra örneklerindeki doğal radyoizotoplardan kaynaklanan radyolojik tehlikeleri değerlendirmek için yıllık etkin doz değerleri (YED) hesaplandı ve saygın uluslararası kuruluşlar tarafından önerilen ortalama değerlerle kıyaslandı. Sonuç olarak, incelenen pudra örneklerinin kullanılmasının radyolojik olarak bir risk oluşturmayacağı belirlendi.

Anahtar kelimeler: Pudra, Radyoaktivite, Radyolojik risk, Yıllık etkin doz

Abstract

All living things are constantly exposed to ionizing radiation emitted from natural and artificial radiation sources present in the world throughout their lives. Therefore, it is very important to determine the radioactivity levels of the products that people use and the environment they live in. In this context, 12 baby powder samples of different companies were obtained from local markets. The concentrations of ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K in the powder samples were measured using a high purity germanium detector (HPGe). It was determined that ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K radioisotope concentrations in the examined powder samples ranged between 2.31-12.71 Bq/kg, 1.26-13.68 Bq/kg and 4.69-38.21 Bq/kg, respectively. The average ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K radioactivity concentrations in the powder samples were 5.11 ± 0.81 Bq/kg, 4.17 ± 0.59 Bq/kg and 17.30 ± 1.59 Bq/kg, respectively. To assess the radiological hazards from natural radioisotopes in the examined powder samples, the annual effective dose values (YED) was calculated and compared with the average values recommended by reputable international organizations. As a result, it was determined that the use of the examined powder samples would not pose a radiological risk.

Keywords*: Powder, Radioactivity, Radiological risk, Annual effective dose*

*Serdar DİZMAN; serdar.dizman@erdogan.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Dünya var olduğu zamandan bu yana doğada bulunan uzun ömürlü radyoaktif çekirdekler her ortamda doğal bir radyasyon düzeyi oluşturmaktadır. İnsanlar hayatta bulundukları süre boyunca doğal kaynaklardan yayımlanan radyasyonlardan önemli oranlarda doz almaktadırlar (Azeem vd., 2024; Basaran vd., 2024; Özden vd., 2023).

Halk arasında pişik olarak tanımlanan diaper dermatit, perinede, perinealtı bölgede ve etrafında kapalılık, nem ve iritasyon sonucu meydana gelen bir cilt sorunudur. Pişiği oluşturan asıl sebep, derinin aşırı nem ve sürtünme sonucunda tahriş olmasıdır. Bebeğin altındaki bezin sıklıkla değiştirilmemesinden dolayı idrarla temas eden cildin pH'ı asidikten alkaliye dönüşerek mikroorganizmalar ile kolonize olur. Alkali pH gaitadaki proteaz ve lipaz enzimini aktifleştirip stratum korneum tabakasında hasara sebep olur (Bukhari vd., 2013; Gözen vd., 2011; Güler vd., 2016; Nnorom, 2011). Bebek talk pudrası, nemi emme yeteneği ve sürtünmeyi minimize etme konusundaki becerisi nedeniyle bebeklerin cildini kuru tutmak ve pişik oluşumunu önlemek için yaygın olarak kullanılan bir bebek bakım ürünüdür (Almugren vd., 2023; Bukhari vd., 2013; Nnorom, 2011; Wudke vd., 2024). Dünya'nın kabuğundaki kaya yataklarından çıkarıldığından, ^{238}U, ^{232}Th ve ^{40}K gibi bol miktarda primordial radyonüklidlerin yanı sıra gerekli olmayan ağır metaller içerir ve kontrolsüz endüstriyel süreçler nedeniyle potansiyel bir sağlık tehlikesi oluşturabilir. Bu nedenle, Türkiye'de yaygın olarak kullanılan bebek pudralarının radyoaktivite konsantrasyonları değerlendirilmiştir. Böyle bir değerlendirme, sağlık tehlikesi varlığında tıbbi ihtiyaçlar için ilgili bilgileri sağlayabilir ve bebek talk pudrasında bulunan radyoaktif maddelere maruz kalmanın etkileri hakkında tüketicileri bilinçlendirmek için önemlidir.

Bebeklerin kullandığı yiyeceklerde radyoaktivitenin belirlenmesi üzerine literatürde son yıllarda yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Ababneh vd., 2021; Okedeyi vd., 2024; Ong vd., 2024; Skoko vd., 2024). Son yapılan çalışmalara bakıldığında bebek yiyeceği olarak mama, gevrek ve süt tozları öne çıkmaktadır. Yapılan çalışmalarda, belirtilen bu yiyeceklerde hem doğal hem de yapay radyoaktivitenin bulunması dikkat çekicidir. Bu nedenle bebek ürünlerinde radyoaktivitenin izlenmesi son derece önemlidir. Bebek talk pudralarında da ağır metal toksisitesi ile ilgili çalışmalar literatürde yaygın olarak bulunurken radyonüklidlerin dağılımı ile ilgili çok az çalışma bulunmaktadır (Almugren vd., 2023; Apostoaei & Kocher, 2010; Bukhari vd., 2013; Moon vd., 2011; Nnorom, 2011; Wudke vd., 2024). Türkiye'de marketlerde satılan bebek pudraları için daha önce radyoaktivite değerlendirmesi yapılmamıştır. Bundan dolayı, bu çalışma ile Türkiye'de yaygın olarak kullanılan bebek pudralarının doğal radyoaktivite seviyelerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Türkiye'deki marketlerde satılan ve tüketiciler tarafından en çok tercih edilen farklı markalara ait 12 adet bebek pudrasında Radyum (^{226}Ra), Toryum (^{232}Th) ve Potasyum (^{40}K) radyoizotop değerleri yüksek saflıkta germanyum dedektörü (HPGe) ile belirlenmiştir. Bebek pudralarındaki radyoaktivite içeriğinin sağlık risklerini değerlendirmek amacıyla yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR) tarafından sağlanan referans limitlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu çalışma ile elde edilen veriler literatürdeki diğer çalışmaların verileriyle karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve metot
2. Material and method

2.1. Örneklerin toplanması
2.1. Collection of samples

Öncelikle, çevrimiçi satış gerçekleştiren bir sitedeki satış verileri kullanılarak Türkiye'de en çok satılan ve tercih edilen 12 adet bebek pudrası markası belirlenmiştir. Daha sonra, belirlenen bu markalara ait bebek pudraları yerel marketlerden son kullanıcı ürünü olarak temin edildi. Pudra örnekleri alınırken ürünün toz ve en az 100 g içerecek olmasına dikkat edilmiştir. Temin edilen pudra örnekleri, analizlere hazırlanmak üzere nükleer fizik laboratuvarına transfer edildi.

2.2.Örneklerin analize hazırlanması
2.2. Preparation of samples for analysis

Laboratuvarda, örnekler ilk olarak dedektörde kullanılan ölçüm kapları (60 mL) içerisine boşluk kalmayacak şekilde sıkıştırılarak doldurulduu. Daha sonra, doldurulan ölçüm kaplarının kapakları sıkıca kapatıldı ve

ardından parafilm ile hava almayacak şekilde bantlandı. Akabinde hazırlanan ölçüm kaplarının kütleleri hassas terazi ile belirlendi. Son olarak hazırlanmış olan numune kapları, radyoaktif dengeye gelmeleri için yaklaşık olarak 30 gün süre boyunca bekletildi.

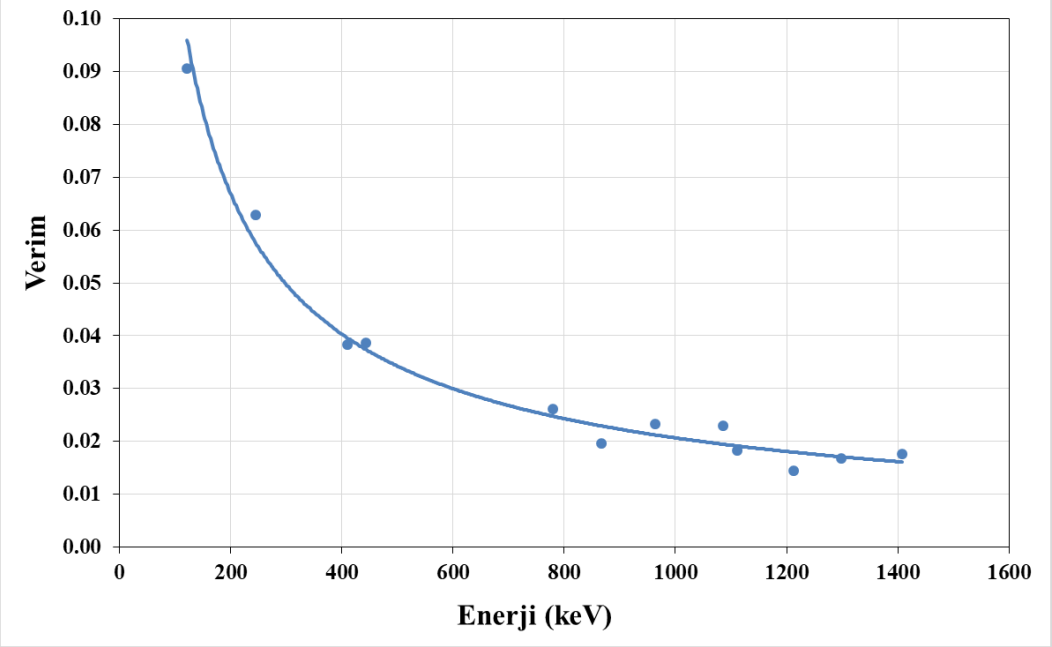
2.3. Gama spektrometrik ölçümler
2.3. Gamma spectrometric measurements

Radyoaktivite ölçümleri (^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K) 1332.5 keV'de 1.9 keV ayırma gücüne ve % 55'lik relatif verime sahip ORTEC markasının GEM55P4-95 model numaralı yüksek saflıkta germanyum dedektörü (HPGe) kullanılarak gerçekleştirildi. Bu gama spektrometre sistemi dedektörle birlikte önyükselteç, spektroskopi yükselteci, analog sayım değerlerini elektronik sinyallere dönüştüren sistem (ADC) ve çok kanallı analizörden (MCA) oluşur. Dedektör içerisindeki numunelerin koyulduğu oda, kozmik ışınlardan ve inşaat malzemelerinden yayınlanan ışınımlardan gelen arkaplan (background) radyasyona karşı 10 cm kalınlıkta kurşun blokla zırhlanmıştır. Gama spektrometre sistemleri gıda, su ve toprak gibi çevresel örneklerin analizinde yaygın olarak kullanılan sistemlerdir (Basaran vd., 2024; Coulibaly vd., 2023; Cruz da Silva vd., 2020; Dizman vd., 2020, 2024; Siraz vd., 2023).

Dedektörün verim kalibrasyonu, sertifikalı ve aktivitesi bilinen radyoaktif Eu-152 sıvı kaynak (Amersham Company UK) kullanılarak gerçekleştirildi. Eu-152 sıvı kaynağı, %3-29 bolluklarda yayımlanma olasılığında çok geniş enerji aralığına (122, 244, 344, 411, 443, 779, 964, 1112 ve 1408 keV) sahip olduğundan verim kalibrasyonunun belirlenmesi için çok yaygın olarak kullanılır (Grigorescu vd., 2002). Verim kalibrasyonu için ilk olarak ^{152}Eu sıvı kaynağı dedektörde ölçüldü ve yayınlanan enerjilerde meydana gelen spektrumların sayım hızı değerleri belirlendi. Bu değerler kullanılarak, ilgili enerjilerdeki dedektörün verim değerleri Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır (Khandaker vd., 2017).

$$E = \frac{N}{A.I\gamma} \tag{1}$$

Burada; N toplam sayım hızı (sayım/zaman), A kullanılan radyoaktif kaynağın şimdiki aktivitesi (Bq), Iγ ilgilenilen gama enerjisinin yayınlanma olasılığıdır. Hesaplanan değerler yardımıyla elde edilen enerji-verim grafiği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kullanılan dedektör için elde edilen enerjiye karşılık verim grafiği
Figure 1. *Graph of efficiency versus energy obtained for the used detector*

Hazırlanan numuneler dedektörde 50000 saniye süresince sayılmış ve elde edilen spektrum görüntülerinden biri Şekil 2'de verilmiştir. Sayımdan elde edilen spektrumları değerlendirmek için bir veri analiz programı

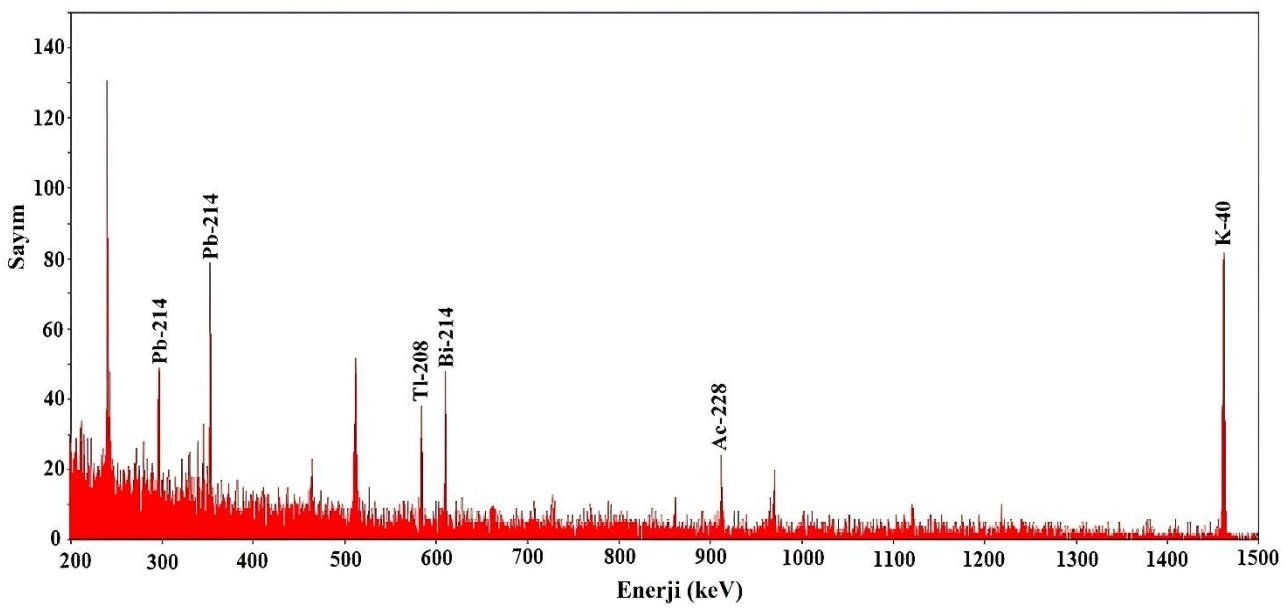
olan Gamma Vision kullanılmıştır. ^{226}Ra konsantrasyonu ^{214}Pb'ün 295.22 ve 351.92 keV ve ^{214}Bi'ün 609.32 keV'deki gama ışını piklerinden tahmin edilmiştir. ^{232}Th konsantrasyonu ^{208}Tl'in 583.19 keV ve ^{228}Ac'in 911.16 keV'deki gama ışını piklerinden tahmin edilmiştir. ^{40}K konsantrasyonları 1460 keV gama ışını piki kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu enerjilerdeki pik alanları belirlendikten sonra pudra örneklerindeki radyoaktivite konsantrasyonları denklem 2 kullanılarak belirlenmiştir.

$$A\ (Bq/kg) = \frac{N}{E.I\gamma.t.m} \quad (2)$$

Burada, N ilgili gama enerjisinin net sayım alanı, E ilgili gama enerjisinde dedektörün verim değeri, Iγ gama ışınının ilgili enerjideki yayınlanma olasılığı, t ölçüm süresi (s) ve m numune kütlesidir (kg). Ölçümlerde kullanılan dedektör sisteminde ilgilenilen radyonüklidler için minimum ölçülebilir aktivite değerleri (MDA) Bq/kg biriminde Denklem 3 kullanılarak hesaplandı (Currie, 1968; Zare vd., 2015).

$$MDA = \frac{1{,}645\sqrt{B}}{E.I\gamma.t.m} \quad (3)$$

Burada, B ilgili gama enerjisinin arkaplan (background) sayım alanı, E ilgili gama enerjisinde dedektörün verim değeri, Iγ gama ışınının ilgili enerjideki yayınlanma olasılığı, t ölçüm süresi (s) ve m numune kütlesidir (kg).



Şekil 2. Dedektörde numune ölçümlerinden elde edilen tipik bir spektrum görüntüsü
Figure 2. *A typical spectrum image from sample measurements at the detector*

2.4. Yıllık etkin doz (YED)
2.4. Annual effective dose (YED)

İncelenen pudra örneklerinin bebeklerde kullanılması sonucunda alınacak yıllık etkin doz (YED) değerleri Denklem 4 kullanılarak hesaplanmıştır (Basaran vd., 2024).

$$\text{YED (mSv/y)} = A \times CR \times DC \quad (4)$$

Burada; A her bir pudra örneği için ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotop konsantrasyonlarının toplamı (Bq/kg), CR bebeklerde yıllık olarak kullanılan pudra miktarı (kg/y) (yaklaşık 0.04 kg) (Gözen et al., 2011; Güler et al., 2016), DC radyoizotoplar için doz katsayılarıdır (^{226}Ra için 2.8×10^{-4}, ^{232}Th için 6.9×10^{-4} ve ^{40}K için 6.2×10^{-6} mSv/Bq) (IAEA, 2010). Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP) tarafından yıllık etkin doz değerinin en çok 1 mSv/y olması önerilmektedir (ICRP, 2007).

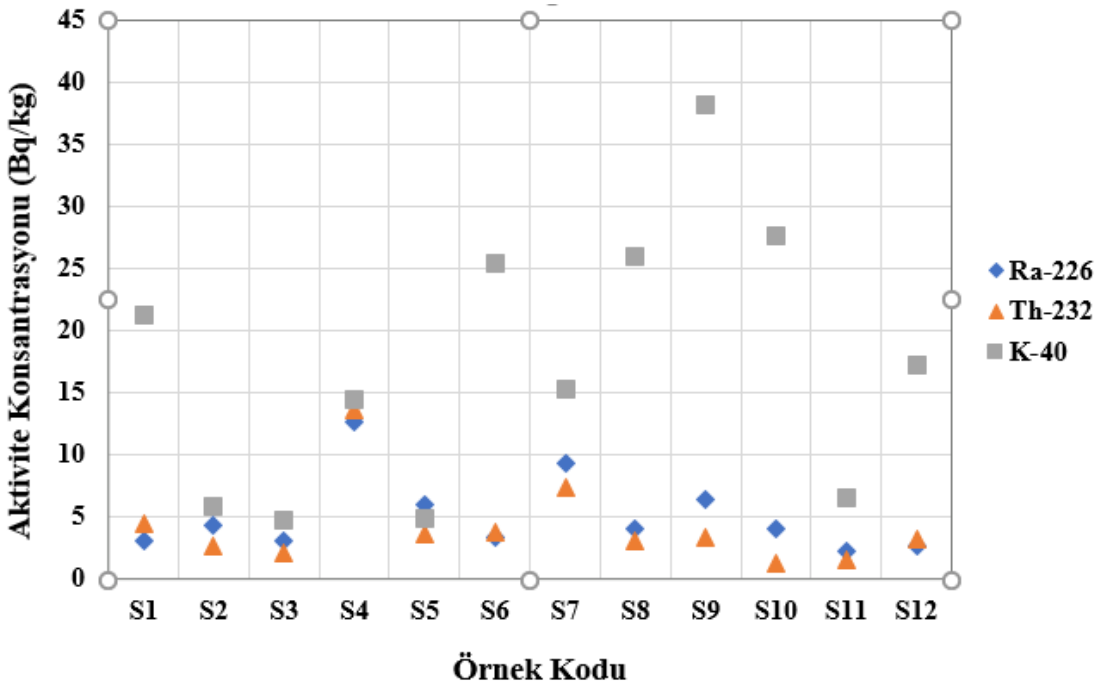
3. Bulgular ve tartışma
3. Results and discussion

Radyoaktivite ölçümlerinde kullanılan dedektör sistemi için minimum ölçülebilir aktivite değerleri (MDA) ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotopları için sırasıyla 0.37 Bq/kg, 0.44 Bq/kg ve 3.51 Bq/kg olarak hesaplandı. İncelenen pudra örneklerinde belirlenen ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotoplarının radyoaktivite konsantrasyonları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Pudra örneklerinde belirlenen radyoaktivite konsantrasyonları
Table 1. *Radioactivity concentrations determined in powder samples*

Örnek Kodu	Radyoaktivite Konsantrasyonu (Bq/kg)		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
S1	3.06 ± 0.81	4.45 ± 0.53	21.28 ± 0.90
S2	4.32 ± 0.87	2.67 ± 0.42	5.84 ± 0.99
S3	3.09 ± 0.43	2.04 ± 0.32	4.69 ± 1.07
S4	12.71 ± 0.79	13.68 ± 0.89	14.52 ± 2.23
S5	5.96 ± 0.94	3.56 ± 0.52	4.81 ± 0.51
S6	3.35 ± 0.82	3.80 ± 0.60	25.48 ± 1.74
S7	9.29 ± 1.05	7.31 ± 0.98	15.31 ± 2.83
S8	4.08 ± 0.76	3.07 ± 0.64	25.96 ± 2.76
S9	6.43 ± 0.99	3.37 ± 0.57	38.21 ± 1.43
S10	4.06 ± 0.91	1.26 ± 0.53	27.63 ± 2.43
S11	2.31 ± 0.52	1.59 ± 0.48	6.61 ± 0.62
S12	2.62 ± 0.88	3.23 ± 0.59	17.21 ± 1.58

İncelenen pudra örneklerinde ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K'ın aktivite konsantrasyonları sırasıyla 2.31 – 12.71 Bq/kg, 1.26 – 13.68 Bq/kg, 4.69 – 38.21 Bq/kg aralığında değişmekte olup ortalama değerleri 5.11 ± 0.81 Bq/kg, 4.17 ± 0.59 Bq/kg ve 17.30 ± 1.59 Bq/kg olarak bulunmuştur. Araştırılan pudra örneklerinde tespit edilen radyoaktivite konsantrasyonları (^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K) grafiksel olarak Şekil 3'te ayrıca gösterilmektedir. Bu çalışmada incelenen pudra örneklerinde belirlenen tüm radyoaktivite konsantrasyon değerleri UNSCEAR tarafından önerilen limit değerlerden (^{226}Ra için 35, ^{232}Th için 30 ve ^{40}K için 400 Bq/kg) daha düşük bulunmuştur (UNSCEAR, 2000). Dolayısıyla incelenen pudra örneklerinin kullanılmasında radyolojik yönden herhangi bir risk bulunmadığı söylenebilir.



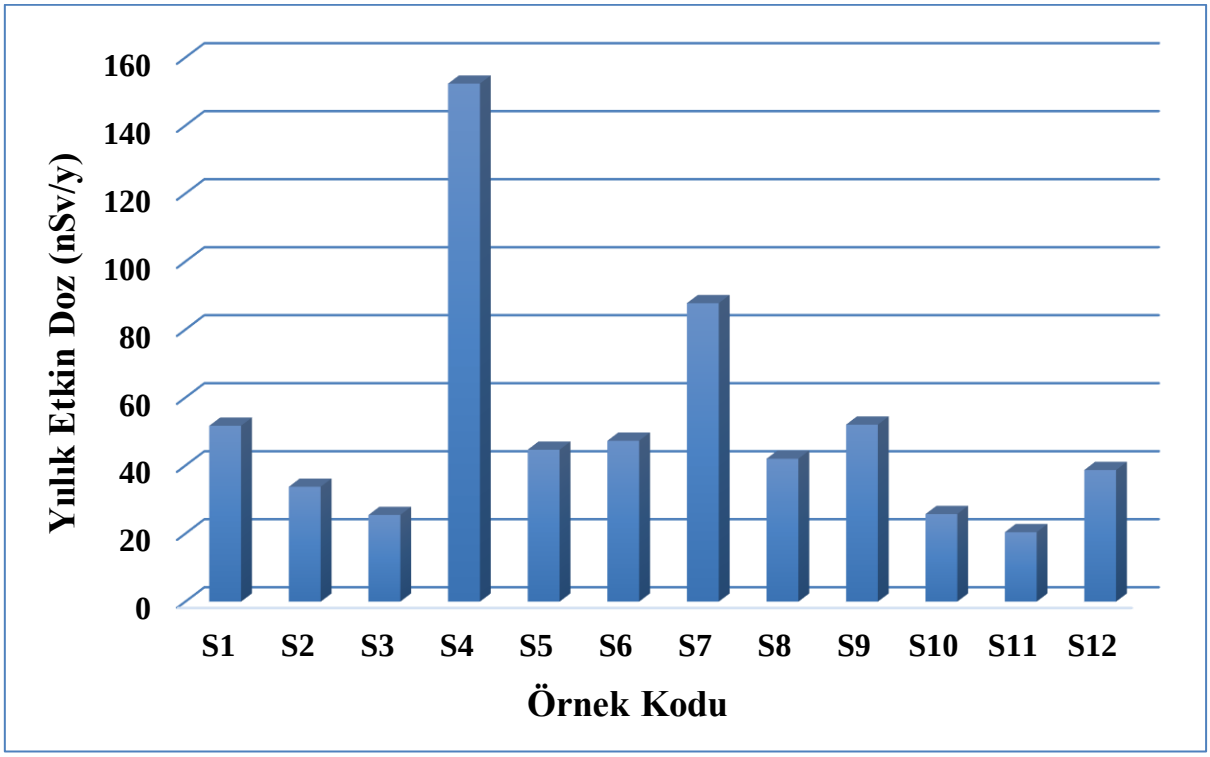
Şekil 3. Pudra örneklerinde belirlenen radyoaktivite konsantrasyonlarının dağılımı
Figure 3. *Distribution of radioactivity concentrations determined in powder samples*

Şekil 3 incelendiğinde, ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotop konsantrasyonlarının en yüksek değerlerinin sırasıyla S4, S4 ve S9 kodlu örneklerde olduğu görülmektedir. İncelenen pudra örneklerinin kullanılması sonucunda bebeklerin yıllık olarak alacağı etkin doz değerleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Pudra örneklerinin kullanılması sonucu bebekler tarafından alınacak yıllık etkin doz değerleri
Table 2. *Annual effective dose values to be received by infants as a result of the use of powder samples*

Örnek Kodu	Yıllık Etkin Doz (nSv/y)		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
S1	5.51	40.94	5.28
S2	7.78	24.56	1.45
S3	5.56	18.77	1.16
S4	22.88	125.86	3.60
S5	10.73	32.75	1.19
S6	6.03	34.96	6.32
S7	16.72	67.25	3.80
S8	7.34	28.24	6.44
S9	11.57	31.00	9.48
S10	7.31	11.59	6.85
S11	4.16	14.63	1.64
S12	4.72	29.72	4.27

İncelenen bebek pudrası örneklerinde yıllık etkin doz değerleri ^{226}Ra için 2.31-12.71 µSv/y, ^{232}Th için 1.26-13.68 µSv/y ve ^{40}K için 4.69-27.63 µSv/y aralığında değişmekte olup, ortalama değerleri sırasıyla 5.11 µSv/y, 4.17 µSv/y ve 17.30 µSv/y olarak bulunmuştur. İncelenen pudra örneklerinin kullanılması sonucunda incelenen radyoaizotoplar kaynaklı bebeklerin yıllık olarak alacağı toplam etkin doz değerleri Şekil 4'te grafiksel olarak ayrıca gösterilmektedir.



Şekil 4. Pudra örneklerinin kullanılması sonucu bebekler tarafından alınacak yıllık etkin doz değerlerinin dağılımı
Figure 4. *Distribution of annual effective dose values to be received by infants as a result of the use of powder samples*

Şekil 4 incelendiğinde, en yüksek yıllık etkin doz değerinin S4 kodlu örnekte, en düşük doz değerinin ise S11 kodlu örnekte olduğu görülmektedir. UNSCEAR tarafından gıdaların tüketilmesiyle alınan yıllık etkin doz değerinin 2400 µSv/y'ı aşmaması önerilmektedir (UNSCEAR, 2000). İncelenen bebek pudrası örneklerinin kullanılması sonucu bebekler tarafından alınacak yıllık etkin doz değerleri, bu değerin oldukça altındadır. Dolayısıyla bu çalışma ile incelenen bebek pudrası örneklerinin kullanılmasının radyolojik yönden herhangi bir sağlık riski oluşturmayacağı gösterilmiştir. Bunlarla birlikte, bu çalışmada deri yoluyla emilimin spesifik tahmini değil, genel kullanım sonucunda alınan doz hesabı yapılmıştır. Ayrıca, dermal kontaminasyondan kaynaklanan cilt dozlarının, radyoaktif maddenin cilt üzerinde birikme ve tutulma derecesine bağlı olduğu unutulmamalıdır.

Bebek pudrası örneklerinde radyoaktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi üzerine Türkiye'de hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Buna karşın Malezya'da 2023 yılında yapılan yeni bir çalışmada yaygın olarak kullanılan bazı bebek talk pudralarının radyoaktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Bu çalışma ile bebek pudralarında belirlenen radyoaktivite konsantrasyonları, Malezya'da yapılan çalışmada belirlenen radyoaktivite konsantrasyonlarından (^{226}Ra için 0.174 Bq/kg, ^{232}Th için 0.317 Bq/kg ve ^{40}K için 0.742 Bq/kg) oldukça yüksek bulunmuştur (Almugren vd., 2023). Benzer olarak Ürdün'de yapılan bir çalışmada 0-6 yaş için üretilen bebek mamalarında ^{226}Ra radyoizotopu hiç tespit edilmezken ^{232}Th radyoizotopunun ortalaması 0.34±0.34 Bq/kg ve ^{40}K radyoizotopunun ortalaması ise 160.2±33.5 Bq/kg olarak belirlenmiştir. Bulunan ^{40}K değeri, bu çalışmada bulunan değerlerden oldukça yüksektir (Ababneh vd., 2021). Yine, Singapur'da yapılan bir çalışmada süt tozu örneklerinde ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotop konsantrasyonları sırasıyla 0.49±0.05 Bq/kg, 0.50±0.07 Bq/kg ve 204±9 Bq/kg olarak belirlenmiştir. ^{226}Ra ve ^{232}Th konsantrasyonları bu çalışmada belirlenen değerlerden düşük iken ^{40}K konsantrasyonu ise daha yüksek bulunmuştur (Ong vd., 2024).

Gama spektrometre sisteminde (HPGe) yaptığımız ölçüm ve hesaplamaların doğruluğunu test etmek için Uluslararası Atom Enerji Ajansı'ndan temin edilen IAEA 375 referans materyali örneklerle birlikte aynı şartlar altında ölçülmüştür (URL, 2024). Ölçüm sonuçlarına göre kullanılan dedektörün geri kazınım miktarı yüzde olarak ^{226}Ra için 92.05, ^{232}Th için 96.15 ve ^{40}K için 97.18 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, çalışmada kullanılan HPGe dedektörünün ölçüm sonuçlarının doğruluğunu ortaya koymaktadır.

4. Sonuç
4. Conclusion

Bu çalışmada, Türkiye'deki marketlerde satılan ve tüketiciler tarafından en çok tercih edilen farklı markalara ait 12 adet bebek pudrasında ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotop konsantrasyonları yüksek saflıkta germanyum dedektörü (HPGe) kullanılarak belirlenmiştir. Alınan pudra örneklerinde ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K'ın aktivite konsantrasyonları sırasıyla 2.31-12.71 Bq/kg, 1.26-13.68 Bq/kg, 4.69-38.21 Bq/kg aralığında değişmekte olup ortalama değerleri 5.11±0.81 Bq/kg, 4.17±0.59 Bq/kg ve 17.30±1.59 Bq/kg olarak belirlenmiştir. İncelenen pudra örneklerindeki doğal radyoizotoplardan kaynaklanan radyolojik tehlikeleri değerlendirmek için yıllık etkin doz değerleri (YED) hesaplandı ve saygın uluslararası kuruluşlar tarafından önerilen ortalama değerlerle kıyaslandı. Sonuç olarak, incelenen pudra örneklerinin kullanılmasının radyolojik olarak bir risk oluşturmayacağı belirlendi. Ayrıca, Türkiye'de pudra örneklerinde radyoaktivite seviyelerinin tespiti üzerine herhangi bir çalışma olmadığından bu çalışma özgün olup benzer çalışmalara referans olabilecek niteliktedir. Bunların yanında, hem bebeklerin yiyeceklerinde hem de bebeklerin bakımında kullanılan diğer tüm malzemelerin radyolojik olarak izlenmesi ve gerekli değerlendirmelerin yapılması önerilmektedir.

Yazar katkısı
Author contribution

Yazarlar, literatür taraması, deneysel çalışmaların yürütülmesi, sonuçların yorumlanması, makalenin yazımı ve düzenlenmesine katkı sunduklarını beyan ederler.

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Ababneh, A.M. Jaradat, B., Samarah, Q.M. & Ababneh, Z.Q. (2021). Assessment of the radioactivity of gamma emitters in baby formula for different age groups and baby cereal consumed in Jordan. *Radiation Protection Dosimetry*, 193(1), 8-15. https://doi.org/10.1093/rpd/ncab015

Almugren, K. S., Sani, S. F. A., Azim, M. K. M., Ismail, N. N., Khandaker, M. U., Alsufyani, S. J., Alkallas, F. H., Almajid, H. F., Bradley, D. A., & Naseer, K. A. (2023). The presence of NORMs and toxic heavy metals in talcum baby powder. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, *16*(4), 100660. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100660

Apostoaei, A. L., & Kocher, D. C. (2010). Radiation Doses to Skin From Dermal Contamination. *Defense Threat Reduction Agency, DTRA-TR-09*, 1–223.

Azeem, U., Younis, H., ullah, N., Mehboob, K., Ajaz, M., Ali, M., Hidayat, A., & Muhammad, W. (2024). Radionuclide concentrations in agricultural soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in district Swabi, KPK, Pakistan. *Nuclear Engineering and Technology*, *56*(1), 207–215. https://doi.org/10.1016/j.net.2023.09.026

Basaran, B., Dizman, S., & Turk, H. (2024). Radionuclides and metal levels of sea, lake, and rock salts and health risk assessment: Türkiye. *Journal of Food Composition and Analysis*, *134*, 106514. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106514

Bukhari, I. H., Riaz, M., Rasool, N., Sattar, U., & Manzoor, H. S. (2013). Determination of Toxic Heavy Metals in Different Brands of Talcum Powder. *International Journal of Applied and Natural Sciences (IJANS)*, *2*(2), 45–52.

Coulibaly, A., Kpeglo, D. O., & Darko, E. O. (2023). Assessment of Radiological Hazards in Some Foods Products Consumed by the Malian Population Using Gamma Spectrometry. *Journal of Radiation Protection and Research*, *48*(2), 84–89. https://doi.org/10.14407/jrpr.2022.00178

Cruz da Silva, R., Lopes, J. M., Barbosa da Silva, L., Domingues, A. M., da Silva Pinheiro, C., Faria da Silva, L., & Xavier da Silva, A. (2020). Radiological evaluation of Ra-226, Ra-228 and K-40 in tea samples: A comparative study of effective dose and cancer risk. *Applied Radiation and Isotopes*, *165*, *109326*. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109326

Currie, L. A. (1968). Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry. *Analytical Chemistry*, *40*(3), 586–593. https://doi.org/10.1021/ac60259a007

Dizman, S., Akdemir, T., Yeşilkanat, C. M., Nevruzoglu, V., Bal, E., & Keser, R. (2024). Investigation and mapping of natural and artificial radioactivity in sediment samples from Borçka Black Lake, Artvin-Turkey. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, *104*(9), 2165–2179. https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2060084

Dizman, S., Hodolli, G., Kadiri, S., Aliu, H., & Makolli, S. (2020). Radioactivity in Kosovo honey samples. *Polish Journal of Environmental Studies*, *29*(2), 1119–1127. https://doi.org/10.15244/pjoes/105968

Gözen, D., Çağlar, S., & Doğan, Z. (2011). 0-24 Ay arası bebeği olan annelerin pişiği önleme ve bakımına yönelik uygulamaları. *Florence Nightingale Journal of Nursing*, *19*(1), 17–22.

Grigorescu, E. L., Sahagia, M., Razdolescu, A. C., Luca, A., & Ivan, C. (2002). Standardization of Eu-152. *Applied Radiation and Isotopes*, *56*, 435–439.

Güler, S., Avcı, S., Yiğit, F., & Ortabağ, T. (2016). 0-12 Aylık Bebeği Olan Annelerin Bebek Bakımında Başvurdukları Geleneksel Uygulamalar ve Tutumlarının Belirlenmesi. *KASHED*, *4*(1), 35–50.

IAEA. (2010). Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments. *International Atomic Energy Agency, Vienna*, Technical Report Series No. 472.

ICRP. (2007). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *International Commission on Radiological Protection, Ann. ICRP*(2-4).

Khandaker, M. U., Nasir, N. L. M., Zakirin, N. S., Kassim, H. A., Asaduzzaman, K., Bradley, D. A., Zulkifli, M. Y., & Hayyan, A. (2017). Radiation dose to the Malaysian populace via the consumption of bottled mineral water. *Radiation Physics and Chemistry*, *140*, 173–179. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.01.018

Moon, M. C., Park, J. D., Choi, B. S., Park, S. Y., Kim, D. W., Chung, Y. H., Hisanaga, N., & Yu, I. J. (2011). Risk assessment of baby powder exposure through inhalation. *Toxicological Research*, *27*(3), 137–141. https://doi.org/10.5487/TR.2011.27.3.137

Nnorom, I. C. (2011). Trace metals in cosmetic facial talcum powders marketed in Nigeria. *Toxicological and Environmental Chemistry*, *93*(6), 1135–1148. https://doi.org/10.1080/02772248.2011.577075

Okedeyi, S.A., Ikuemonisan, F.E., Olajuwon, O.O., Atilade, A.O., Mustapha, A.O. Coker, J.O., Kayode, Y.O. Ajose, A.S., Kasika, F.A. & Odubote, B.O. (2024). Assessment of natural radioactivity levels of 40K, 226Ra and 232Th in some selected baby food in southwestern Nigeria. *Caliphate Journal of Science & Technology*, 2, 175-183. https://dx.doi.org/10.4314/cajost.v6i2.6

Ong, J.X., Gan, P., Lee, K.K.M., Wu, Y. & Chan, J.S.H. (2024). An assessment of natural and artifical radionuclide content in powdered milk consumed by infants and toddlers in Singapore. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 333, 951–959. https://doi.org/10.1007/s10967-023-09331-3

Özden, S., Pehlivanoğlu, S. A., & Günay, O. (2023). Evaluation of natural radioactivity in soils of Konya (Turkey) and estimation of radiological health hazards. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(12), 1–13. https://doi.org/10.1007/s10661-023-12162-0

Siraz, M. M. M., Das, S. K., Mondol, M. S., Alam, M. S., Al Mahmud, J., Rashid, M. B., Khandaker, M. U., & Yeasmin, S. (2023). Evaluation of transfer factors of 226Ra, 232Th, and 40K radionuclides from soil to grass and mango in the northern region of Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(5), 579. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11223-8

Skoko, B., Košiček, K.M., Ilievski, T., Karanović, G., Grahek, Z., Coha, I., Pavičić-Hamer, D. & Tucaković, I. (2024). Radionuclides determination by alpha (210Po, 228,230,232Th) and gamma (226,228Ra, 137Cs, 40K) spectrometry in children's food in Croatia with assessment of cumulative ingestion dose for infants. Journal of Food Composition and Analysis, 136, 106828. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106828

UNSCEAR. (2000). Exposures from natural radiation sources. *United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation Sources, Annex B*, 140.

URL. (2024). *Information on the IAEA 375 Reference sample*. https://analytical-reference-materials.iaea.org/iaea-375

Wudke, H., Brown, K., Murchland, M., Gillis, M., Gokey, K., Bank, J., Lytle, M., McLeod, C. L., & Krekeler, M. P. S. (2024). Mineralogical and geochemical characterization of Johnson's baby powder from 1985: Evidence of contamination. *Applied Clay Science*, *250*, 107252. https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107252

Zare, M. R., Kamali, M., Omidi, Z., Khorambagheri, M., Mortazavi, M. S., Ebrahimi, M., & Akbarzadeh, G. (2015). Evaluation of natural radioactivity content in high-volume surface water samples along the northern coast of Oman Sea using portable high-resolution gamma-ray spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*, *144*, 134–139. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.03.003

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 170-183 doi: 10.17714/gumusfenbil.1604525 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Elipsoidin düzleme lambert konform konik tasvirinde, coğrafi ve düzlem koordinatlar arasında dönüşüm, jeodezik temel problem çözümü

Transformation of plane coordinates with geographic in plane lambert conform conic mapping of ellipsoid and solution of geodesic basic problem in this mapping

Kemal ÇELİK*[1], Ahmet KAYA[2]

[1]*Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane*

[2]*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Emekli Öğretim Üyesi, 61080, Trabzon*

• Geliş tarihi / *Received*: 20.12.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 06.02.2025

Öz

Yeryüzünde yapılan ölçülerin değerlendirilmesinde, referans yüzeye ihtiyaç duyulur. Bu yüzey, çalışma alanı büyüklüğüne göre; düzlem, küre ya da elipsoid olarak seçilir. Elipsoid üzerinde yapılacak jeodezik hesaplamaların, düzlem hesabına göre daha zor yapıya sahip olması nedeniyle; yüzey üzerindeki bilgilerin düzleme geçirilmesi yoluna gidilir. Bu çalışmada elipsoidin düzleme tasvirinde kullanılan metotlardan biri olan Lambert Konform Konik (LKK) tasvir incelenmiştir. LKK tasvirinde, elipsoid üzerindeki bilgiler bir yardımcı yüzey aracılığı ile düzleme taşınır. LKK'da, yardımcı yüzey olarak koni kullanılır. Bu çalışmada sözkonusu tasvirin temel yapısı tanımlandıktan sonra, elipsoid coğrafi koordinatları ile düzlem koordinatları arasındaki dönüşümler için kapalı formüller incelenmiş sayısal örnekler verilmiştir. Ayrıca bu tasvir koordinatlarıyla, elipsoid çözüme eşdeğer jeodezik temel problem çözüm formülleri de sayısal çözümlerle incelenmiştir. Bir noktanın koordinatları ile koordinatı bilinmeyen noktayı birleştiren jeodezik eğri ve bu eğrinin azimutu bilindiği durumda ikinci noktanın koordinatları ve azimutun hesaplanması yapılmıştır. Bilinen iki noktanın koordinatlarından jeodezik eğri uzunluğu ve bu eğrinin iki ucundaki azimutların hesaplaması yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Elipsoid, Jeodezi, Konform konik, Lambert

Abstract

In the evaluation of measurements made on the earth, a reference surface is needed. This surface is selected as plane, sphere or ellipsoid according to the size of the study area. Since geodetic calculations to be made on the ellipsoid have a more difficult structure compared to plane calculations; the information on the surface is transferred to the plane. In this study, Lambert Conform Conic (LCC) mapping, which is one of the methods used in the plane depiction of the ellipsoid, is examined. In the LCC mapping, the information on the ellipsoid is transferred to the plane by means of an auxiliary surface. In LCC, a cone is used as the auxiliary surface. After defining the basic structure of the depiction in question in this study, closed formulas for transformations between ellipsoid geographic coordinates and plane coordinates are examined and numerical examples are given. In addition, with these depiction coordinates, geodetic problems solution formulas equivalent to ellipsoid solutions are also examined with numerical solutions. When the coordinates of a point and the geodetic curve connecting the unknown coordinate point and the azimuth of this curve are known, the coordinates and azimuth of the second point are calculated. The length of the geodetic curve and the azimuths at both ends of this curve are calculated from the coordinates of the two known points.

***Keywords**: Ellipsoid, Geodesy, Conformal conic, Lambert*

*Kemal ÇELİK; kemalcelik@gumushane.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Jeodezi, yerkürenin modellenmesini, koordinat sistemlerinin tanımlanması, referans ağlarını oluşturan, mekansal bilgileri bu ağ ve sistemlerle ilişkilendiren, yeryüzünün çizilmesi, zamana bağlı değişimini izleyen ve genel anlamda yerkürenin şeklini tespit ve yeryüzünü ölçme işlemlerini konu edinen bilim koludur. Fiziksel yeryüzünde yapılan jeodezik ölçülerin değerlendirilmesinde bir referans yüzeyine ihtiyaç duyulur. Bu yüzey çalışma alanı büyüklüğüne göre yatay düzlem, küre ya da elipsoid olarak seçilir. Küre ve elipsoid üzerinde yapılacak jeodezik hesaplamaların düzlem hesabına göre daha zor yapıya sahip olacağı aşikârdır. Bu bakımdan, uygulamalar için sade bir yüzeyden hesap ve çizim kolaylığından yararlanabilmek amacı ile elipsoid üzerindeki bilgilerin herhangi bir şekilde düzleme geçirilmesi yoluna gidilir. Düzleme geçiş işlemi paralel, dik veya merkezi izdüşüm gibi geometrik yollarla yapılabileceği gibi; geometrik yorumu mümkün olmayan matematik bağıntılarla da gerçekleştirilebilir. Geometrik yolla yapılan geçişe izdüşüm veya projeksiyon, matematiksel yolla sağlanan geçişe de tasvir adı verilir. Tasvir, üç boyutlu orijinal sistemden iki boyutlu sisteme geçişi veya bunun tersini ifade eder (Çelik, 1993; Çelik & Kaya, 1995).

Geniş anlamda projeksiyon da bir tasvir türüdür. Ancak tasvir kavramını projeksiyon terimi ile tam olarak ifade etmek mümkün değildir. Almanca kaynaklarda "Abbildung" (tasvir), "Projektion" (projeksiyon) ayrı ayrı kavramlardır. Fakat İngilizce kaynaklarda "mapping, projection" her iki kavram yerine de kullanılabilmektedir.

Jeodezi uygulamalarında esas olan elipsoidin veya kürenin düzleme tasviridir (Kaya, 2015). Ancak elipsoid ve küre gibi düzleme açılımı doğrudan mümkün olmayan yüzeylerdeki jeodezik bilgilerin düzleme geçirilmesinde orijinale tam anlamıyla benzerlik söz konusu değildir. Dolayısıyla deformasyonlar ortaya çıkar. Bunlar uzunluk, açı ve alan deformasyonlarıdır. Bunların hepsinin giderildiği bir tasvir türü mevcut değildir. İsteğe göre açıların, uzunlukların veya alanların korunması prensibinden hareket edilebilir. Korunması istenen elemana göre; açı koruyan (konform), uzunluk koruyan ve alan koruyan tasvirler söz konusu olabilir. Jeodezik çalışmalarda konform tasvirler, orijinal ve tasvir yüzeyindeki şekil korunduğu için kullanılır. Uzunluk veya alan koruyan tasvir türleri kartografik amaçlı ve daha çok yerin şeklinin küre olarak kullanıldığı yöntemlerde tercih edilir. Ayrıca tasviri yapılacak bölgelerin büyüklüğü de deformasyonları etkileyecek bir faktördür. Bu nedenlerden dolayı her bir tasvir yönteminde kısıtlayıcı şartlar, diferansiyel ölçek ve indirgeme formülleri mevcuttur.

Bu çalışmada elipsoidin düzleme konform konik tasviri incelenmiştir. Bu tasvirde yardımcı yüzeyden yararlanılarak matematiksel ifadelerle orijinal (elipsoid) yüzeydeki bilgiler tasvir düzlemine taşınmıştır. Yardımcı yüzey olarak koni; matematiksel bağıntılarda yer almayıp sadece tasviri canlandırmada kullanılmıştır.

2. Materyal ve metot

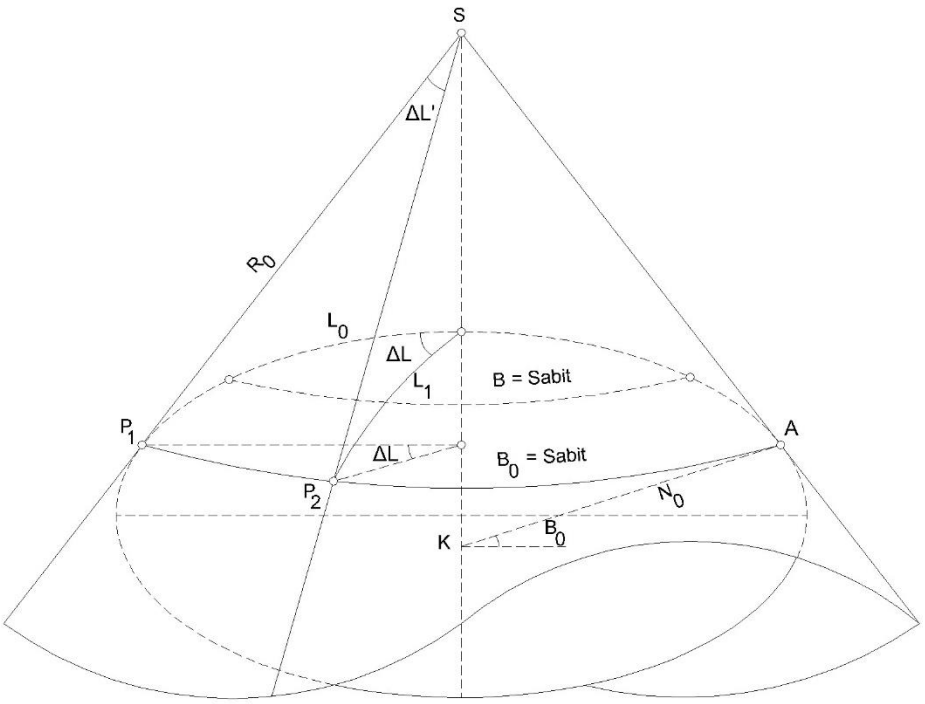
2.1. Lambert konform konik (LKK) tasvirin temel denklemleri
2.1. Basic equations of Lambert conformal conic(LCC) mapping

Konform konik tasvir J, H. Lambert tarafından diğer tasvirlerin yanında 1772 yılında yayımlanan "Yer ve Gök Haritaları Yapılması Hakkında" (Überdas Entwerfen von Erdund Himmelscharten) adlı çalışmasında ortaya atılmıştır (Fiala, 1976), Bu tasvirde elipsoidal coğrafi koordinatlar ağı düzlem bir kutupsal koordinat sistemine taşınır. Kutupsal koordinat sisteminde paralel daireler iç içe daireler ve meridyenler de bunların yarıçapları olarak gösterilirler. Temel denklemler; tasvirin açı koruması ve ana paralel dairenin düzleme uzunluk koruyan biçimde tasvir edilmesi prensiplerine göre geliştirilmiştir.

Bu tasvirde elipsoidal coğrafi koordinatlar ağı düzlem kutupsal koordinat sistemine taşınır. Daha sonra düzlem (x,y) dik koordinat sistemine geçilir. Koni, elipsoid yüzeyine seçilen bir paralel daire boyunca teğettir. Koninin dönme ekseni elipsodin dönme ekseni ile çakışık olduğundan teğet paralel dairesinin enlemi koninin tepe açısının yarısına eşittir. Kutupsal koordinat sisteminde paralel daireler koninin tepe noktasını merkez kabul eden iç içe daireler ve meridyenler de bunların yarıçapları olarak gösterilirler (Şekil 1). Temel denklemler; tasvirin açı koruması ve ana paralel dairenin düzleme uzunluk koruyan biçimde tasvir edilmesi prensiplerine

göre geliştirilmiştir. Elipsoid üzerinde (B, L) coğrafi koordinatlar sistemini (x,y) düzlem dik koordinat sistemine tasvir etmek için; konformluk yanında iki ilave şartın gerçekleşmesi istenir. Bu şartlar;

1-Tasviri yapılacak bölgenin ortasından geçen bir "L_0" ana meridyeni tasvirde düzlem sistemin apsis ekseni olan bir doğru ile gösterilmelidir.
2-Ana paralel dairenin tasviri uzunluk korumalıdır şeklinde ifade edilir.
Birinci şarta göre başlangıç meridyeni ve ana paralel dairenin kesişim noktası düzlem sistemin başlangıç noktası; yani düzlem dik koordinatların (0,0) olduğu noktadır. Başlangıç meridyeni koordinat sisteminin "x" eksenini, bu eksene dik ve ana paralel dairesi yönü de "y" eksenini göstermektedir. Böylece bu tasvirde uzunluk deformasyonu seçilen başlangıç enlemi boyunca yani doğu batı yönünde korunur. Bu özelliğinden dolayı özellikle enlem boyunca doğu batı yönünde uzanan ülkelerin büyük ölçekli harita yapımında tercih sebebidir.



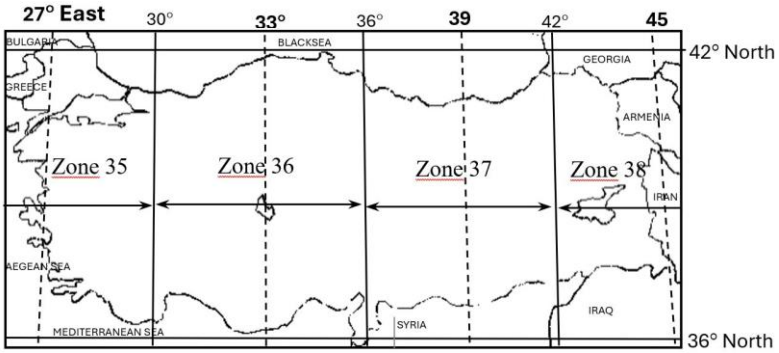
Şekil 1. Paralel daire boyunca elipsoide teğet olan koni (Çelik & Kaya, 1995)
Figure 1. *Cone tangent to ellipsoid along parallel circle*

2.1.1. LKK tasvirin avantajları
2.1.1. Advantages of LCC mapping

Mühendislik ve Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) projelerinde koordinatların ortak bir başlangıçta olması, dilim dönüşümleri ve farklı bir koordinat sistemine geçiş işlemlerini ortadan kaldırdığı için büyük kolaylıklar sağlar. Bu uygulamaların, bilgisayar ortamında yapıldığı düşünülürse ortak koordinat sisteminin önemi daha da artmaktadır. Bu kapsamda, ülkemizde INSPIRE direktiflerine uygun Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS), Kamu kurum ve kuruluşlarının sorumlusu oldukları coğrafi bilgileri ortak koordinatlarda sunmaları amacıyla oluşturulmuş bir e-devlet projesidir. Böylece, tüm Türkiye'de ortak koordinat sisteminde hızlı, ekonomik ve doğru çözümlemelere olanak sağlanmış olur (Bakırtaş vd., 2005; Cömert vd., 2005; TKGM, 2005). Ortak koordinat olarak, coğrafi ve jeosantrik dik koordinatlar düşünülebilir. Fakat bu koordinat sistemlerinde hesap ve çizimin getirdiği güçlük düzlem koordinatlarda yoktur. Bu nedenlerden dolayı, çizim ve hesap için projeksiyon veya tasvir koordinatlarına dönüşüm gerçekleştirilir.

Ülkemizde ölçekli haritalar Universal Transversal Merkator (Universal Transversal Mercator-UTM) sisteminde üretilmiştir. Bu haritaların; 3° lik dilim genişlikli Gauss-Krüger tasvirinin (Değiştirilmiş UTM veya kısaltılmış olarak DUTM) dilim orta meridyenleri 27°, 30°, 33°, 36°, 39°, 42° ve 45° iken, 6° lik dilim genişlikli Gauss-Krüger tasvirinin (UTM) dilim orta meridyenleri 27°, 33°, 39° ve 45° dir (Şekil 2). UTM sisteminde dilim numaraları (DN) 35, 36, 37 ve 38 dir. Bir UTM dilimini aşan uygulamalarda projenin komşu

dilimlerdeki fazla kısmı 0.5° veya 1° lik bindirme bölgesi içindeyse, dilim dönüşümü yapılabilir. Şayet uygulama alanı komşu dilimde bindirme bölgesinin dışına taşıyorsa, dilim dönüşümü yapılmaz. Böylece tek bir koordinat sisteminde çalışmak mümkün olmaz ve UTM sisteminden başka projeksiyon veya tasvir yöntemlerine geçiş yapılır. Bir UTM dilimini aşan projelerde mevcut UTM sistemi yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı bu sistemden başka tasvir yöntemlerine dönüşüm gerçekleştririlir (Yıldırım, 2004; Güllü vd, 2018). UTM haricinde Türkiye'nin tamamı için ortak bir koordinat sisteminin tanımlanması gerekiyorsa bu LKK tasviridir (Yıldırım & Bediroğlu, 2011).



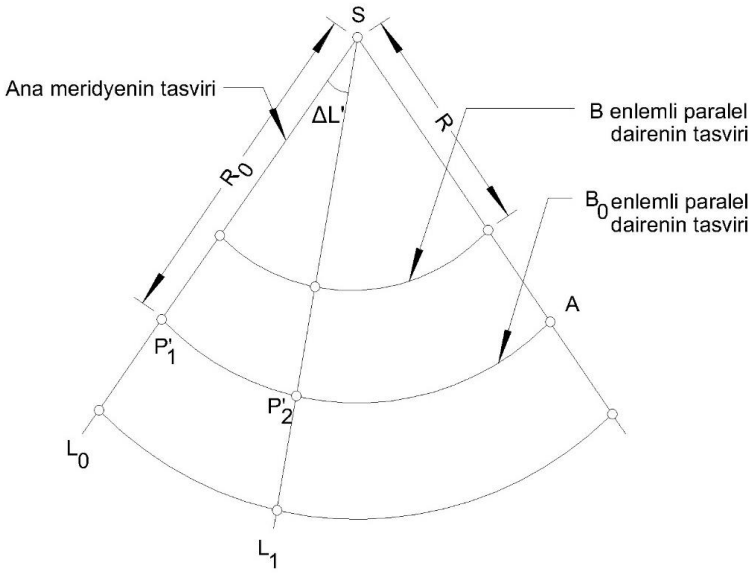
Şekil 2. UTM sisteminde Türkiyedeki dilimler
Figure 2*. Zones in Turkey in the UTM system*

2.2. LKK tasvirin sabitleri
2.2. Constants of the LCC mapping

Coğrafi koordinatlardan düzlem koordinatlara dönüşümde, koordinat dönüşümlerinde sistemin başlangıç noktası $P_0(B_0,L_0)$ seçildikten sonra teğet paralel dairesinin tasvirdeki R_0 yarıçapını belirlemek gerekir. Bu amaçla ekseni yer ekseni ile çakışan ve bir B_0 enlemli paralel daire boyunca elipsoide teğet olan koninin AS doğrusu yani R_0 değeri (Şekil 2) de (KAS) dik üçgeninden yararlanılarak;

$$R_0=N_0 Cot B_0 \quad (1)$$

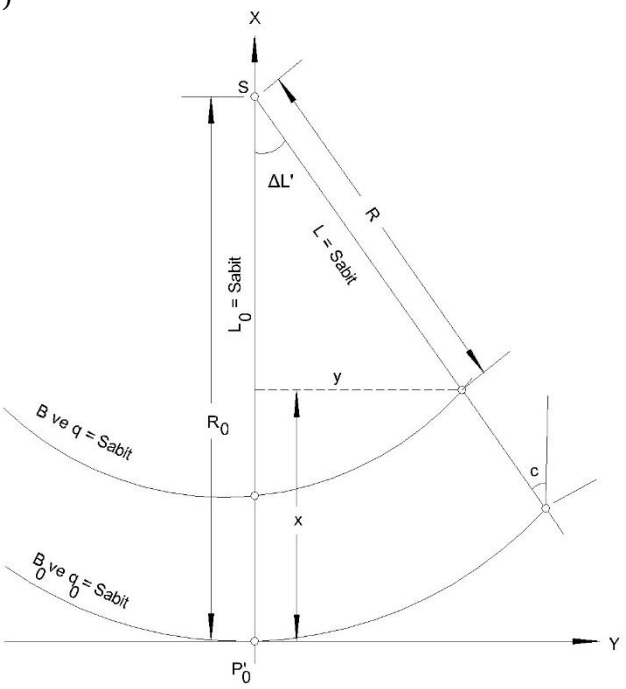
bağıntısı ile R_0 değeri hesaplanır. Burada N_0 değeri B_0 enlemindeki enine eğrilik yarıçapını göstermektedir. Koni yardımı ile yapılan böyle bir tasvirde meridyen düzlemi ile söz konusu koni yüzeyinin ara kesitleri olan doğrular meridyenlerin tasviri olarak değerlendirilirler. Böylece meridyenler tasvirde, koninin "S" tepe noktasından geçen doğruları teşkil ederler. Paralel dairelerde düzlemde "S" merkezli daireler olarak ortaya çıkarlar (Şekil 3).



Şekil 3. Elipsoid üzerindeki noktaların tasvir düzleminde gösterilmesi
Figure 3. Showing points on the ellipsoid in the mapping plane

Konform tasvir elde edebilmek için orijinal ve tasvir sisteminde izometrik ağlar (birbirini dik açı altında kesen koordinat eksenlerinin oluşturduğu ağ) teşkil edilir (Grossmann, 1976). Düzlemde bu şart dik koordinat sistemiyle (x, y) sağlanmış olmaktadır (Yıldırım, 2013). Bu amaçla elipsoid üzerinde (q, ΔL) izometrik parametreleri seçilir. Buna göre Δq tasvir edilecek bölgenin ortasından geçen bir B_0 coğrafi enlemine karşılık gelen q_0 = sabit "*ana paralel dairesinden"* itibaren sayılır (Şekil 4). Eğer $\Delta q=q-q_0$ ve $\Delta L=L-L_0$ sembolleri dikkate alınırsa; elipsoid üzerinde (B_0, L_0) noktası ile ($B_0+\Delta B$, $L_0+\Delta L$) noktası arasındaki dS diferansiyel yay uzunluğu, izometrik parametreler cinsinden 2 numaralı denklemde ifade edilmiştir (Özbenli, 1991).

$$dS^2= N^2\cos^2 B\ (d\Delta q^2+d\Delta L^2) \quad (2)$$



Şekil 4. Düzlem kutupsal koordinat sistemi
Figure 4*. Plane polar coordinate system*

Şekil 3'de de görüldüğü gibi düzlem kutupsal koordinatlar ΔL' ve R dir. Burada teşkil edilen ağ ortogonal fakat izometrik değildir. Bu sistemde yay elemanı,

$dS^2= dR^2+ R^2\ d\Delta L'^2$ olarak ifade edilir. R^2 parantezi ile bu ifade

$$dS^2=R^2\left(\frac{dR^2}{R^2}+ d\Delta L'^2\right) \quad (3)$$

şeklinde de ifade edilebilir. Burada R, R_0=sabit ana paralel dairenin tasvirinden itibaren sayılırsa (dR/R) ifadesi, integral alınarak

$$-\int_{R_0}^{R}\frac{1}{R}dR=-(\ln R-\ln R_0)=-\ln\frac{R}{R_0} \quad (4)$$

şekline dönüşür. Böylece (ΔL', (dR/R)) koordinat çifti ile düzlem kutupsal koordinatlarda izometrik parametreler elde edilir. Düzlem izometrik parametre (dR/R) de "- " işareti ilave edilmiştir. Bunun nedeni "q" izometrik enleminin kuzeye doğru, "R" mesafesinin ise güneye doğru artmasıdır. Konform konik tasvirde boylam farkının düzlem karşılığı ΔL' ve elipsoidal boylam farkı ΔL bir "α" çarpım faktörü ile birbirine bağlıdır. Böylece

$$\Delta L' = \alpha\ \Delta L \quad (5)$$

olarak ifade edilir (Thomas, 1952, Grossmann, 1976). B_0=sabit ana paralel dairesi uzunluk koruyan biçimde tasvir edileceği için, elipsoiddeki paralel daire yayı uzunluğu ile tasvirde buna karşılık gelen R_0=sabit yay uzunluğu eşit olmalıdır. Yapılan bu tanımlamanın formül olarak ifadesi;

$N_o \cos B_0 \Delta L = R_0 \Delta L' = R_0 \alpha \Delta L$ (6)

olur ve buradan R_0 değeri

$R_0 = (N_o \cos B_0) / \alpha$ (7)

elde edilir. Bu formülde R_0 yerine (1) 'de elde edilen temel bağıntı yazılarak:
$\alpha = \sin B_0$ (8)
şeklinde tasvir sabiti olan "α" değeri elde edilir. Bu şekilde her iki sistemde izometrik parametreler oluşturulmuştur. İzometrik parametre çiftlerinin kompleks değişkenler şeklinde birleştirilerek orijinal ve tasvirde birbirine eşitlenmesi sonucu elipsoidin düzleme konform konik tasviri için;

$$(-\ln \frac{R}{R_0} + i\, \Delta L') = \alpha\, (\Delta q + i\, \Delta L) \quad (9)$$

denklemine ulaşılır (Grossmann, 1976). Elde edilen bu ifade de reel ve imajiner kısımların ayrılması ve ayrı ayrı birbirine eşitlenmesi ile

$$-\ln \frac{R}{R_0} = a\, \Delta q \text{ veya } R = R_0 \underline{e}^{\alpha \Delta q} \text{ reel}, \quad \Delta L' = \alpha\, \Delta L \text{ imajiner} \quad (10)$$

kısım elde edilir. Burada "e" tabii logaritma tabanı ve

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad \sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}, \quad \text{arc tanh}(x) = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1+x}{1-x}\right) \quad (11)$$

olmaktadır.

2.3. Coğrafi koordinatlarından (B, L) düzlem dik koordinatlarının (x, y) hesabı
2.3. Calculation of plane perpendicular coordinates (x, y) from geographical coordinates (B, L)

Düzlemde noktaların konumlarını belirleyen kutupsal parametreler R ve ΔL' belirlenmiştir. Bu şekilde hesaplama yapmak mümkündür. Ancak bölgesel harita yapımında düzlem sistemin kutup noktası olan "S" noktası haritada yer almaz. Bunun yerine $P_0(B_0,L_0)$ başlangıç noktasına göre tanımlanan (x,y) dik koordinatları kullanılır. Tanımlanan koordinat sisteminde "x" ekseni kuzeye ve "y" ekseni de doğuya doğru artar. B_0 başlangıç enleminde önce (1) ve (8) formüllerinden "R_0" ve "α" tasvir sabitleri belirlenir. $\Delta L = L - L_0$ olduğundan (5) ve (10) Formüllerinden ΔL' ve R hesaplanır. Şekil 3'e göre;

$$x = R_0 - R \cos \Delta L' = R_0 [1 - \underline{e}^{-\alpha \Delta q} \cos(\alpha\, \Delta L)] \quad (12)$$
$$y = R \sin \Delta L' = R_0 [\underline{e}^{-\alpha \Delta q} \sin(\alpha\, \Delta L)]$$

şeklinde düzlem dik koordinatların hesabı için kapalı hesap formülleri bulunur. (10)'da sağ taraftaki ifadelerde Δq terimi q_0'a bağlıdır. Buna göre q'yu coğrafi enlemin fonksiyonu olarak ifade etmek gerekir. İzometrik enlem hesabı için; "e" elipsoidin 1. eksentrisitesi olmak üzere;

$q = \text{arc tanh}(\sin B) - e\, \text{arc tanh}(e \sin B)$ (13)
$\Delta q = q - q_0$

kapalı hesap formülleri kullanılır (Kaya, 1994a; Kaya, 1994b).

2.4. Düzlem dik koordinatlarından (x, y) coğrafi koordinatlarının hesabı (B, L)
2.4. Calculation of geographical coordinates (B, L) from plane perpendicular coordinates (x, y)

Coğrafi koordinatlar yardımıyla düzlem dik koordinatların hesabında kullanılan (12) numaralı formülde R_0, eşitliğin sol tarafına alınarak;
$R_0 - x = R \cos \Delta L'$ (14)
$y = R \sin \Delta L'$

şeklinde yazılır. Hesaplanmak istenen değerlerden biri olan L coğrafi boylamı için ΔL' değeri yani coğrafi boylam farkının tasvir düzlemindeki karşılığı ve buradan L coğrafi boylamı (14)'de eşitliğinin taraf tarafa bölünmesi ile;

$P=R_0-x,\ \Delta L'=\arctan(y/P),\ \Delta L=(\Delta L'/\alpha),\ L=L_0+\Delta L$ (15)

şeklinde elde edilir. B coğrafi enlemini bulabilmek için, önce izometrik enlem farkı Δq hesaplanır. (14) formülünden her iki tarafın karelerinin alınması ve taraf tarafa toplanması ile R yarıçapı

$$R=\sqrt{x^2+y^2-2R_o x-R^2}$$ (16)

formülü ile elde edilir.

B coğrafi enlemli paralel dairenin R tasvir yarıçapı hesaplandıktan sonra(10) formülünden Δq eşitliğin sol tarafına alınır ve

$$e^{\alpha\Delta q}=\frac{R}{R_o}$$ (17)

yazılabilir. Her iki tarafın logaritması alınırsa ve işaret değiştirilirse;

$$\ln\left(\frac{R}{R_o}\right)=-\alpha\,\Delta q \Rightarrow \ln\left(\frac{R_o}{R}\right)=\alpha\,\Delta q \Rightarrow \Delta q=\ln\left(\frac{R_o}{R}\right)/\alpha$$ (18)

olur.

Hesaplanması istenen B coğrafi enleminin karşılığı olan q izometrik enlemi; bulunan Δq izometrik enlem farkının q_0'a ilavesiyle

$$q=q_0+\Delta q$$ (19)

şeklinde elde edilir.

Noktanın B coğrafi enlemini elde etmek için kapalı formül sistemi mevcut değildir. Bu amaçla sabit katsayılı seri formüller kullanılabilir. Belli olan q izometrik enleminden B coğrafi enlemini elde etmek için;

$$\chi=\arcsin(\tanh q)$$ (20)

$$B=\chi+c_2\sin 2\chi+c_4\sin 4\chi+c_6\sin 6\chi+c_8\sin 8\chi$$ (21)

formülü kullanılır (Kaya, 1994a; Kaya, 1994b).

2.5. Tasvirde meridyen konvergensi ve diferansiyel ölçek
2.5. Meridian convergence and differential scale in mapping

Elipsoid yüzey üzerindeki uzunluk elemanı "dS", bunun tasvir yüzeyindeki karşılığı "ds" sembolü ile gösterilmek üzere; m=ds/dS oranına diferansiyel ölçek (büyüme oranı) denir. Bir tasvir için en önemli kriter hiç şüphesiz büyüme oranıdır. Büyüme oranı konform konik tasvirde seçilen ana paralel daireden kuzey ve güney yönündeki uzaklığa bağlı olup, doğrultuya bağlı değildir. Bu özellik tasvirin konform olmasının bir sonucudur. Bir "P" noktasındaki meridyen konvergensi ise söz konusu noktadan başlangıç meridyeninin tasvirine çizilen paralelin bu noktadaki meridyenin tasviri olan doğru ile yaptığı (c) açısına denir (Şekil 5). Tanıma göre konform konik tasvirde meridyen konvergensi düzlem ΔL' açısı ile idantiktir. O halde konvergens

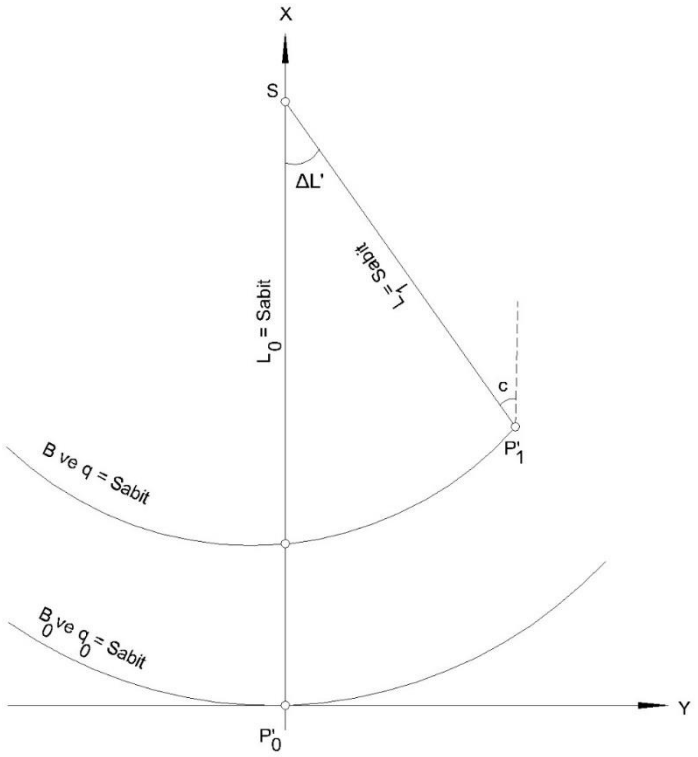
$$c=\alpha\,\Delta L \quad \text{veya} \quad c=\sin B_0\,\Delta L$$ (22)

olarak elde edilir.

Meridyen konvergensi coğrafi boylam farkı "ΔL" ve "a" sabitine bağlıdır. Coğrafi boylam farkı büyüdükçe konvergens te büyümektedir. Elipsoid coğrafi koordinat sisteminde yüzey parametre elemanı;

$$E=N^2\cos^2 B$$ (23)

olarak tanımlıdır.



Şekil 5. Meridyen konvergensinin tasvir düzleminde gösterilmesi
Figure 5*. Showing the meridian convergence on the mapping plane*

Düzlem dik koordinat sisteminde yüzey parametre elemanı Ë=1 olduğuna göre; herhangi bir konform tasvirde diferansiyel ölçek;

$$m^2 = \frac{\ddot{E}}{E}[(\frac{\partial x}{\partial q})^2+[(\frac{\partial y}{\partial q})^2 \qquad (24)$$

şeklinde elde edilir (Jordan vd., 1959; Richardus vd., 1974). Büyüme oranı için (11)' den diferansiyel alınmak suretiyle;

$$\frac{\partial x}{\partial q} = \alpha\, R_o\, [\underline{e}^{\alpha\Delta q} \cos(\alpha\, \Delta L)], \qquad \frac{\partial y}{\partial q} = -\,\alpha\, R_o\, [\underline{e}^{-\alpha\Delta q} \sin(\alpha\, \Delta L)] \qquad (25)$$

elde edilir.

Genel formülde diferansiyellerin yerine yazılması sonucu büyüme oranı için

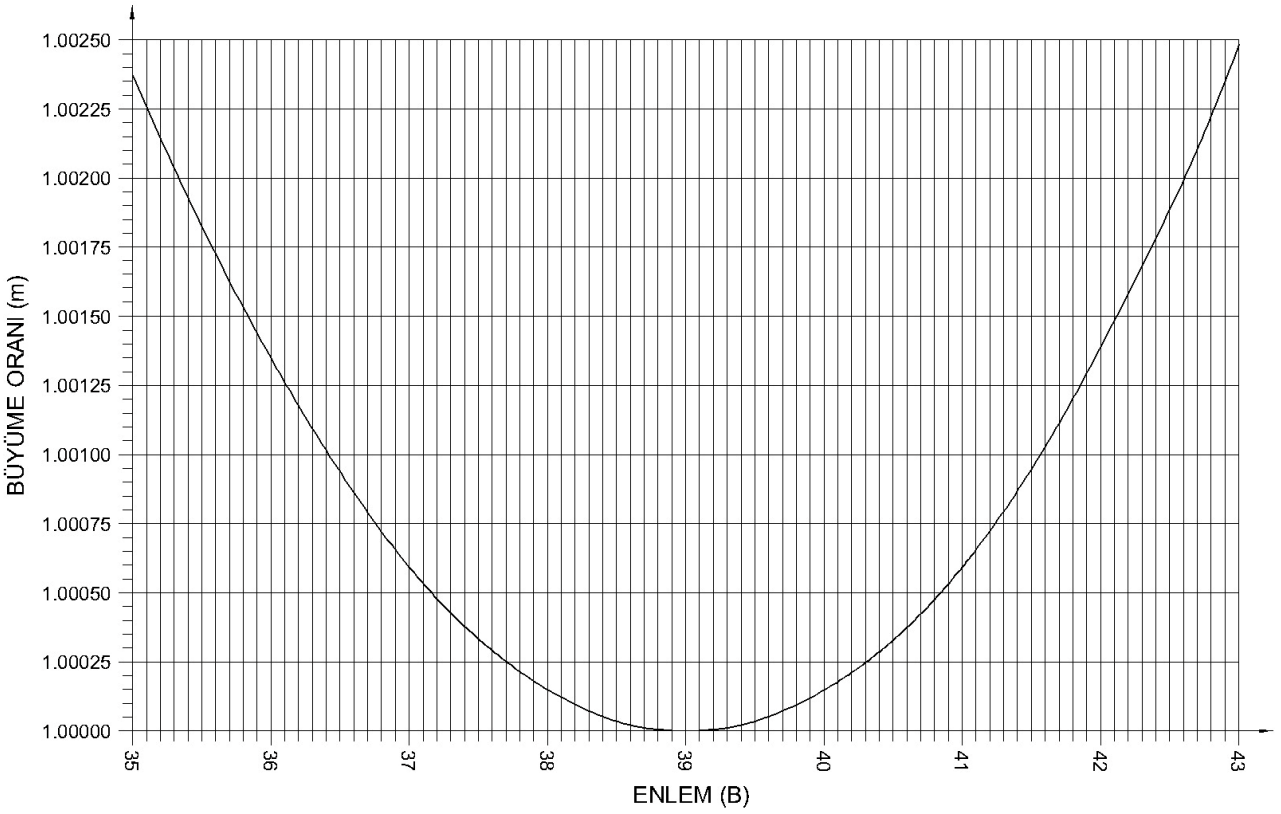
$$m = \alpha\, R_o\, \underline{e}^{\alpha\Delta q}/\, N \cos B = \alpha R/\, N \cos B \qquad (26)$$

formülü bulunur.
Ana paralel dairenin uzunluk koruması; bu paralel dairenin koni ve elipsoidde ortak oluşundandır. Ana paralel daireden uzaklaştıkça kuzey ve güney yönünde şekil bozukluğu ortaya çıkar. (26) denkleminde tasvir sabitlerin yerine yazılması sonucu herhangi bir enlemde büyüme oranı için daha açık olarak

$$m = (N_0 \cos B_0/\, N \cos B)\, \underline{e}^{-\mathrm{Sin}\,(B_0(q-q_0))} \qquad (27)$$

ifadesi elde edilir.

Konform konik tasvirde ana paralel dairenin dışında büyüme oranı daima 1'den büyük olup; ana paralel daireden kuzeye doğru güney yönünden daha çabuk büyür (Fiala, 1976; Yılmaz, 2009). Ana paralel dairenin kuzeyinde ve güneyinde büyüme oranı hesaplanarak sonuçlar grafik halinde verilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Büyüme oranının ana paralel daireden uzak bölgelerdeki durumu
Figure 6*. Growth rate in regions far from the main parallel circle*

2.6. LKK tasvir koordinatları ile elipsoide eşdeğer jeodezik temel problem çözümü
2.6. Solution of the geodetic problems equivalent to the ellipsoid with LKK mapping coordinates

Elipsoid üzerinde jeodezik eğrisinin uzunluğu, her iki ucundaki sisteme göre tarif edilen, doğrultu açılan ve her iki noktanın koordinatları veya koordinat farkı jeodezik temel problemin altı elemanını oluştururlar. Bir noktanın koordinatları, ikinci bir noktaya kenar uzunluğu ve bu noktadaki doğrultu açısı biliniyorken söz konusu kenarın diğer ucundaki noktanın koordinatlarının ve ikinci noktadaki doğrultu açısının hesaplanması işlemine "Birinci Jeodezik Temel Problem" denir. İki noktanın koordinatlar biliniyorken, bu noktalan birleştiren jeodezik eğri uzunluğunun ve her iki ucundaki doğrultu açılarının bulunması işlemine de "İkinci Jeodezik Temel Problem" denir. Bu bölümde, temel problem çözümlerinin yardımcı yüzey olan düzlemde çözülerek ilgili indirgeme bağıntıları ile elipsoiddeki orijinal değerlere nasıl ulaşılacağı ele alınmıştır. Yapılan işlemlerde yaklaşıklık söz konusu olmayıp, belirtilen doğruluk derecelerinde yapılan hesaplamalar tamamen elipsoidde yapılacak hesaplara denktir (Özbenli, 2001; Kaya, 2015).

2.6.1. Birinci jeodezik temel problem çözümü
2.6.1. Solutions of direct geodetic problems

Birinci jeodezik temel problem için; bir noktanın koordinatları, hesaplanması istenilen noktayı birleştiren jeodezik eğri ve bu doğrultunun birinci noktadaki azimutu bilinmektedir. İkinci noktanın koordinatları ile, bu noktadaki azimutun hesaplanması istenmektedir.

Birinci noktanın bilinen koordinatları elipsoidal coğrafi koordinatlar olabileceği gibi; konform konik tasvire göre hesaplanmış düzlem dik koordinatlar da olabilir. Bu işlemlerde kullanılacak formüller bundan önceki bölümlerde detaylıca ele alınmıştır. Bu bölümde sadece konunun algoritması ve hangi işlemlerin hangi sırada yapılacağı açıklanacaktır.

Verilenler: $P_1(B_1L_1)$, S, A_1
İstenenler: $P_2(B_2L_2)$, A_2

Birinci jeodezik temel problemin çözüm adımları aşağıdaki gibidir:

a. P_1 noktasının (B_1L_1), coğrafi koordinatlarından (x_1,y_1) düzlem dik koordinatlarının hesabı. Eğer başlangıçta düzlem dik koordinatlar biliniyorsa bu adım atlanılır.

b. P_1 noktasında c_1 meridyen konvergensinin ve $T_1 = A_1 - c_1$ semti'nin hesabı.

c. İndirgeme formüllerinde kullanılmak üzere P_2 noktasının yaklaşık düzlem koordinatlarının S ve T değerleri ile hesabı.

d. S-s uzunluk indirgemesi ile "s" düzlem kenarın hesabı.

e. ($T_1 - t_1$) doğrultu indirgemesi ile düzlem semtinin hesabı.

f. Düzlem (x_1,y_1) koordinatlar, "s" ve "t_1" kullanılarak P_2 noktasının (x_2,y_2) düzlem koordinatlarının hesabı

g. Düzlem (x_2,y_2) dik koordinatlardan P_2 noktasının (B_2L_2)coğrafî koordinatların hesabı. Eğer coğrafi koordinatlar istenmiyorsa bu adımdan vazgeçilebilir.

h. P_2 noktasında c_2 konvergens hesabı,

ı. (T_2-t_2) indirgemesiyle T_2 hesabı,

i. P_2 noktasında $A_2 = (T_2 + c_2)$ hesabı

2.6.2. İkinci jeodezik temel problem çözümü
2.6.2. Solutions of inverse geodetic problems

İkinci jeodezik temel problem için; iki noktanın koordinatları verilmiştir. Bu iki nokta arasındaki kenarın uzunluğu ve bu kenarın iki ucundaki azimutlar istenmektedir.

Verilenler: $P_1(B_1, L_1)$, $P_2(B_2, L_1)$

İstenenler: S, A_1, A_2

İkinci jeodezik temel problemin çözüm adımları şöyledir.

a. P_1 ve P_2 noktalarının (x_1 ,y_1) ve (x_2,y_2) düzlem dik koordinatlarının hesabı

b. Düzlem semtlerin t_1 ve t_2 hesabı,

c. Düzlem uzunluk "s" ve uzunluk indirgemesi (S-s) hesabı ile S elipsoid değerinin hesabı,

d. Doğrultu indirgemeleri (T_1-t_1) ve (T_2- t_2) meridyen konvergensleri (c_1, c_2) hesabı

e. A_1 ve A_2 azimutlarının hesabı

3. Sayısal uygulamalar
3. Numerical applications

Bu bölümde coğrafi koordinatlardan düzlem dik koordinatlarına geçiş hesabına yönelik örnek verilmiştir. Bu işlemin tersi olan dik koordinatları bilinen noktanın coğrafi koordinat hesaplaması ve ayrıca birinci ve ikinci jeodezik temel problem çözümleri yapılacaktır.

3.1. Coğrafi koordinatlardan düzlem dik koordinatlarına ve düzlem dik koordinatlardan coğrafi koordinatlarına geçişlerin hesabı
3.1. Calculation of plane perpendicular coordinates from geographic coordinates and geographic coordinates from plane perpendicular coordinates

Coğrafi koordinatlardan düzlem dik koordinatlarına geçiş hesabı ve bunun tersi olan düzlem dik koordinatlardan coğrafi koordinatlara geçiş hesabı Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Detaylı sayısal uygulamalar
Table 1*. Detailed numerical applications*

Coğrafi Koordinatlardan Düzlem Dik Koordinatlarına Geçiş Hesabı			**Düzlem Dik Koordinatlardan Coğrafi Koordinatlarına Geçiş Hesabı**		
Verilenler	B_0	39° 00' 00.0000"	Verilenler	B_0	39° 00' 00.0000"
	L_0	35° 00' 00.0000"		L_0	35° 00' 00.0000"
	B	40° 00' 00.0000"		y	852 391.0444 m
	L	45° 00' 00.0000"		x	157 893.0107 m
Ara İşlemler	V^2_0	1.0040876759	Ara İşlemler	V^2_0	1.0040876759
	N_0	6 386 896.1399 m		N_o	6 386 896.1399 m
	q_0	0.7360556095 Rad.		q_0	0.7360556095 Rad.
	R_0	7 887 159.8823 m		R_0	7 887 159.8823 m
	q	0.7585843950 Rad.		R	7 776 126.0834 m
	Δq	0.0225287855 Rad.		Δq	0.0225287855 Rad.
	R	7 776 126.0834 m		q	0.7585843950 Rad.
	ΔL	0.1745329252 Rad.		$\Delta L'$	0.1098371287 Rad.
	ΔL	10° 00' 00.0000"		α	0.6293203911 Radyan
	α	0.6293203911 Rad.		ΔL	0.1745329252 Rad.
	$\Delta L'$	6.293 203 9110°	Sonuç	L	45° 00' 00.0000"
Sonuç	y	852 391.0444 m		χ	39° 48'35.6251"
	x	157 893.0107 m		B	40° 00' 00.0000"

Değişik enlem ve boylam değerlerinde karşılık gelen coğrafi ve düzlem koordinatlar Tablo 2'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 2. Coğrafi koordinatlardan hesaplanan düzlem koordinatlar
Table 2*. Plane coordinates calculated from geographic coordinates*

Enlem(B)	**Boylam(L)**	**y(m)**	**x(m)**
36°	36°	90 287.3807	- 332 624.3469
36°	34°	- 90 287.3807	- 332 624.3469
36°	45°	901 077.6120	- 283 584.4977
36°	25°	- 901 077.6120	- 283 584.4977
37°	36°	89 067.3717	- 221 554.4454
37°	34°	- 89 067.3717	- 221 554.4454
38°	38°	263 501.2659	- 106 672.8696
38°	32°	- 263 501.2659	- 106 672.8696
39°	35°	0.0000	0.0000
39°	39°	346 409.7289	7 610.9543
39°	31°	- 346 409.7289	7 610.9543
40°	40°	426 839.0441	112 757.4394
40°	30°	- 426 839.0441	112 757.4394
41°	45°	840 214.0764	268 310.6835
41°	25°	- 840 214.0764	268 310.6835
42°	36°	82 967.8048	333 751.5530
42°	34°	- 82 967.8048	333 751.5530

3.2. Jeodezik temel problem çözümleri
3.2. Solutions of geodetic problems

Tablo 3. Jeodezik temel problem çözümü için sayısal uygulamalar
Table 3*. Numerical applications for solving geodetic problems*

Birinci jeodezik temel problem çözümü			**İkinci jeodezik temel problem çözümü**		
Verilenler	B_0	39° 00' 00.0000"	Verilenler	B_0	39° 00' 00.0000"
	L_0	35° 00' 00.0000"		L_0	35° 00' 00.0000"
	B_1	40° 00' 00.0000"		B_1	40° 00' 00.0000"
	L_1	36° 00' 00.0000"		L_1	36° 00' 00.0000"
	S	109 973.8176m.		B_2	40 28'49.3727"
	A_1	60° 37'13.8488"		L_2	37 07'48.4964"
Ara İşlemler	x_1	111 502.8577m	Ara İşlemler	x_1	111 502.8577 m
	y_1	85 409.0188m		y_1	85 409.0188 m
	c_1	0° 37'45.5534"		x_2	166 502.8577 m
	T_1	59°59'28.2954"		y_2	180 671.8132 m
	x_2	166 517.4997m		$t_ı$	60° 00' 00.0000"
	y_2	180 663.3581m		t_2	240° 00' 00.0000"
	(T_1-t_1) "	-31.7048"		s	110 000.0000m
	(T_2-t_2) "	36.2028"		S-s	-26.1823 m
	$t_ı$	60°00'00.0000"		(T_1-t_1) "	-31.7048"
	t_2	240°00'00.0000"		(T_2-t_2) "	36.2028"
	S-s	-26.1824 m.		c_1	0° 37'45.5534"
	s	110 000.0000 m		c_2	1° 20'25.9412"
	x_2	166 502.8577m		T_1	59° 59'28.2952"
	y_2	180 671.8132m		T_2	240° 00'36.2028"
	T_2	240°00'36.2028"	İstenenler	S	109 973.8177 m
	c_2	l°20'25.9412"		A_1	60° 37' 13.8486"
İstenenler	B_2	40° 28'49.3727"		A_2	241° 21' 02.1440"
	L_2	37° 07'48.4964"			
	A_2	241°2'02.1432"			

4. Sonuçlar
4. Conclusions

LKK tasvir yardımı ile oluşturulan koordinat sistemi, Türkiye için düşünüldüğünde tek başlangıçlı bir düzlem koordinat sistemi kullanılmasına imkân verebilir. Türkiye'de harita üretiminde, uluslararası bir sistem olan UTM yani Gauss- Krüger tasviri prensipleri benimsenmiştir. Gauss-Krüger konform tasvirinde farklı meridyenleri esas olan çok dilimli koordinat sistemleri mevcuttur. Bu koordinat sistemleri arasındaki transformasyon ve dilim sınırlarında aynı noktaların her iki sistemde hesaplama mecburiyeti küçümsenmeyecek külfet getirmektedir. Fakat LKK tasvirde böyle bir durum söz konusu değildir. LKK tasvir esas alınarak Türkiye ve bunun gibi bir paralel daire boyunca uzanan ülkeler için tek başlangıçlı düzlem koordinat sisteminin kullanılması mümkün olur.

LKK tasvir kullanılarak hesap edilen noktaların uluslararası bir sistem olan UTM koordinatlarına dönüşümü mümkündür. 1954 yılında ABD'de dengelenen Türkiye temel nirengi ağı, LKK tasvir düzleminde dengelenmiştir. Bu dengeleme için bütün nirengi noktalarının coğrafi koordinatlarından, LKK tasvir düzlem koordinatları hesaplanmıştır. Dengelemesi yapılan nirengi ağındaki noktaların LKK tasvirde kesin düzlem koordinatlarının bulunmasından sonra bütün noktalar için ters dönüşüm uygulanarak kesin coğrafi koordinatlar

hesaplanmış, daha sonra da coğrafi koordinatlardan UTM koordinatlarına geçilmiştir. LKK tasvirde hesaplamalarda kullanılan bütün sabitler başlangıç paraleli üzerinde hesaplanmaktadır. Bu sabitler bir sistem için bir defa hesaplanırlar. Geleceğe dönük çalışmalar için veri tabanı oluşturmada tek başlangıçlı bir düzlem koordinat sisteminden yararlanılması daha kullanışlı olacaktır.

Bu çalışmada; coğrafi koordinatlardan (B,L) düzlem dik koordinatlarına (x,y) geçiş sağlanarak elipsoid yüzeydeki bilgiler tasvir düzlemine taşınmıştır. Düzlem dik koordinatlar (x,y) kullanılarak coğrafi koordinatlarına (B,L) geçişlerin hesabı yapılarak orijinal (elipsoid) yüzey coğrafi koordinatları elde edilmiştir.

Semboller
Symbols

Çalışmada kullanılan sembol, kısaltma ve fonksiyonlarla Hayford elipsoidi sabitleri aşağıdaki gibidir.

a: Elipsoidin büyük yarı ekseni = 6 378 388 m
b: Elipsoidin küçük yan ekseni = 6 356 911.94613 m
c: Elipsoidin kutup eğrilik yarıçapı= 6 399 936. 60811 m
$e^2 = (a^2-b^2)/a^2$: Birinci eksentrisitenin karesi= 0.006 722 670 022 333
$e'^2 = (a^2-b^2)/b^2$: İkinci eksentrisitenin karesi = 0.006 768 170 197 224
İzometrik enlemden coğrafi enleme dönüşüm serisi katsayıları (c_2, c_4, c_6 ve c_8)
c_2 = 0.1931312317° = 0.003 370 775 881 332 radyan
c_4 = 0.0003797387° = 6.627 690 421 917 10^{-6} radyan
c_6 = 0.0000010239° = 1.787 091 988 092 10^{-8} radyan
c_8 = 0.0000000031° = 5.419 122 278 250 10^{-11} radyan
$V^2=1+e'^2 \cos^2 B$: Yardımcı fonksiyon,
N=c/V : Enine eğrilik yarıçapı,
B: Elipsoidde coğrafi enlem,
L: Elipsoidde coğrafi boylam,
q: Elipsoidde izometrik enlem,
R: B enlemli paralel dairenin düzlem tasvir yarıçapı
R_0: B_0 enlemli ana paralel dairenin düzlem tasvir yarıçapı,
ΔL: Elipsoidde coğrafi boylam farkı,
ΔL': ΔL boylam farkının düzlem karşılığı

Katkı belirtme
Acknowledgement

Bu çalışma birinci yazarın, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalında Prof. Dr. Ahmet KAYA danışmanlığında tamamlanan "*Elipsoidin Düzleme Konform Konik Tasviri*" isimli yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Makalenin değerlendirilmesinde emeği geçen editör ve hakemlere teşekkür ederiz.

Yazar katkısı
Author contribution

Kemal Çelik: Araştırma, Metodoloji, Yazım-orijinal taslak, Doğrulama, Kavramsallaştırma. Ahmet Kaya: Araştırma, Metodoloji, Doğrulama, Süpervizör.

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Bakırtaş, T,. Elefante, D., Mataracı, O. & Akküçük, U. (2005). Ulusal mekansal veri altyapısı (UMVA) oluşturulması ve yönetimi, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 28 Mart - 1 Nisan 2005, Ankara

Cömert, Ç. & Akıncı, H. (2005). Ulusal konumsal veri altyapısı ve e-Türkiye için önemi, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 28 Mart - 1 Nisan 2005, Ankara

Çelik, K. (1993). *Elipsoidin düzleme konform konik tasviri* [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Çelik, K., Kaya, A. (1995). Elipsoidin düzleme konform konik tasvirinde koordinat dönüşümleri, *Türkiye Ulusal Jeodezi-Jeofizik Birliği(TUJJB) ve Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği (TUFUAB) Bilimsel Kongreleri*, Sayfa 427-436, Ankara.

Fiala, F. (1976). *Matematiksel kartografya*, (Özgen, G., Aksoy, A., ve Demirağ, Ö.) İ.T.Ü. Yayınları, Sayı 1072, İstanbul.

Grossmann, W. (1976). *Geodaetische rechnungen und abbildungen in der landesvermessung*, Stuttgart.

Güllü, M., Tuşat, E., Baybura, T. & Turgut, B. (2018). *Üç boyutlu koordinat dönüşüm yöntemlerinin incelenmesi,* DOİ: 10.5578/fmbd.66875, AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 015503 (250- 255).

Jordan, E., K. (1959). *Handbuch der Vermessungskunde*, Band IV/2, Stuttgart.

Kaya, A. (1994 a). *İzometrik enlem kavramı ve coğrafi enlemle arasındaki dönüşümler*, HGK, Harita Dergisi, Sayı: 112, Sayfa.30-39, Ankara.

Kaya, A. (1994 b). *An alternative formula for finding the geodetic latitude from theisometric latitude*, Survey Review, Vol 32, No. 253, p.450-452.

Kaya, A. (2015). *Jeodezi-II, Küre ve Elipsoidin Düzleme Tasviri,* Karadeniz Teknik Üniversitesi, II. Baskı, Trabzon.

Özbenli, E. (2001). *Jeodezi-I (Elipsoid, elipsoid yerine kullanılacak küreler ve küre üzerinde jeodezik hesaplamalar)*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Yayın No. 152, II. Baskı, Trabzon

Rıchardus, P. & Adler, R.K. (1974) *Map projections for geodesists and cartographers, Second Edition*, North-Holland Puplishing Co., Amsterdam.

Slocum, T.A., McMaster R.B., Kessler, F.C. & Howard H.H. (2005). *Thematic cartography and geographic visualization*, Pretice Hall, USA.

TKGM. (2005). *Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi Oluşturulabilmesi İçin Ön Çalışma Raporu*. http://www.bilgitoplumu.gov.tr/wp-content/uploads/2014/04/Eylem_47_Turkiye_Ulusal_Cografya_Bilgi_Sistemi.pdf

Thomas, D. (1952). *Conformal projections in geodesy and cartography*, Washington.

Yıldırım, F. (2004) *Dilim esasına dayalı UTM sistemi için alternatif çözüm yöntemlerinin incelenmesi* [Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Yıldırım F., Bediroğlu, Ş. (2011). Ulusal coğrafi bilgi sistemi için projeksiyon önerisi, *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, 31 Ekim - 04 Kasım 2011, Antalya.

Yıldırım, F. &Yıldırım., D. (2013). Datum ve dilim dönüşümünün parsel alanlarına etkisi, *14. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı Ölçme Teknolojileri ve Yazılım Fuarı*, Ankara, Türkiye, 14 - 17 Mayıs 2013, ss.1-8

Yılmaz, İ. (2009). *Uygun harita projeksiyonu seçiminde bazı temel esaslar*, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 1, No: 2, (31-42).

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 184-196 doi: 10.17714/gumusfenbil.1601077 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Göz kozmetiği ürünlerinin spektroskopik yöntemlerle adli kanıt olarak incelenmesi

Examination of eye cosmetics products as forensic evidence by spectroscopic methods

Gülbeyaz Gülşen GÜNEYSU[1], Umut KENDÜZ[1,2], Soner KIZIL*[1,2], Sevil ATASOY[1,2,3]

[1]*Üsküdar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Adli Bilimler Bölümü, 34662, İstanbul*

[2]*Üsküdar Üniversitesi, Bağımlılık ve Adli Bilimler Enstitüsü,34662, İstanbul*

[3]*Birleşmiş Milletler Uluslararası Narkotik Kontrol Kurulu, Viyana, Avusturya*

• Geliş tarihi / *Received*: 13.12.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 06.02.2025

Öz

Suç soruşturmaları sırasında elde edilen kozmetik deliller, özellikle kadınlara yönelik fiziksel ve cinsel saldırı davalarında mahkemede birleştirici delil olarak kullanılabilir. Kadın suçluluğunda olay yeri inceleme ekiplerinin olay yerinde göz kalemi kalıntısı bulma oranı yüksektir. Bu delil, şüpheli, mağdur ve suç mahalli arasında bir bağlantı sağlayabilir ve ceza davalarının çözümüne yardımcı olabilir. Bu çalışma, farklı markalardan göz kalemi örneklerinin adli delil olarak incelenmesini kapsamaktadır. Bu amaçla, A4 kâğıdı, peçete, makyaj temizleme pedi ve farklı kumaşlar üzerine sürülen göz kalemi örneklerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, çevresel koşulların etkilerini incelemek amacıyla göz kalemi ile lekelenen substratlar içme suyu, deniz suyu ve toprakta bir hafta, iki hafta ve bir aylık sürelerde bekletilerek zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. İnceleme sonuçları doğrultusunda, VSC 8000 cihazı ile gerçekleştirilen analizlerde herhangi bir farklılık gözlemlenmemiştir. Stabilite testleri, çevresel faktörlerin numune üzerinde herhangi bir etkisi olmadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, farklı substratlar üzerinde yapılan incelemelerde, polyester kumaşta pik gözlenmemiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, göz kalemlerinin bileşimsel özellikleri ve çevresel koşullara karşı dayanıklılığının, adli soruşturmalarda güvenilir bir delil olarak kullanılmalarını sağladığını ancak belli kumaş tür veya türlerinde sonuç veremediğini ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Adli bilimler, Adli kimya, Göz kozmetiği, VSC 8000, FTIR

Abstract

Cosmetic evidence obtained during criminal investigations can serve as corroborative evidence in court, particularly in cases of physical and sexual assaults against women and female delinquency. The likelihood of finding eyeliner residues at crime scenes during investigations of female-related offenses is notably high. Such evidence can establish a connection between the suspect, the victim, and the crime scene, aiding in the resolution of criminal cases. This study focuses on the forensic examination of eyeliner samples from different brands as evidence. For this purpose, eyeliner samples applied to A4 paper, tissues, makeup removal pads, and various fabrics were analyzed. Additionally, to investigate the effects of environmental conditions, substrates stained with eyeliner were exposed to tap water, seawater, and soil for one week, two weeks, and one month, and their changes over time were examined. Based on the analysis results, no differences were observed in the tests conducted using the VSC 8000 device. Stability tests revealed that environmental factors did not affect the samples. Furthermore, in the examinations conducted on different substrates, no peaks were observed on polyester fabric. The findings of this study demonstrated that the compositional properties and resistance of eyeliners to environmental conditions make them reliable evidence in criminal investigations, although certain fabric types may yield no results.

***Keywords**: Forensic Science, Forensic Chemistry, Eye Cosmetics, VSC 8000, FTIR*

*Soner KIZIL; soner.kizil@uskudar.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Adli bilimler, adli ve idari soruşturmalar sırasında maddi gerçeği ortaya çıkarmak amacıyla çeşitli bilim dallarını bünyesinde barındıran geniş bir disiplinler arası bilimler kümesidir (Houck & Siegel, 2016). Adli bilimler, geniş kapsamı nedeniyle birçok bilim dalını içerir; bunlar arasında adli kimya, adli balistik, kriminoloji, adli tıp, adli biyoloji ve adli psikoloji gibi alanlar bulunur (Saferstein, 2004).

Adli kimya, kimya biliminin prensiplerini ve yöntemlerini kullanarak maddi delillerin analitik incelemesini gerçekleştiren bir disiplindir. Bu alanda, olay yerinde bulunan patlayıcı artıkları, zehirler, uyuşturucular, atış artıkları ve kozmetikler gibi maddeler detaylı bir şekilde analiz edilir. Adli kimya, bu tür maddi delillerin kimyasal bileşimlerini belirleyerek, soruşturmalara önemli katkılarda bulunur ve adli süreçlerde kritik bilgiler sağlar. Olay yerinde sıklıkla rastlanan parmak izi, kan, semen, tükürük, kozmetikler, tehdit mektubu, kıyafet, lif parçaları gibi kanıtsal değeri olan maddeler olay anı ile ilgili bilgi verir, bu deliller sayesinde failin olay yeriyle ilişkilendirilmesinde önemli rol oynar bu sebeple de adli bilimler açısından mühimdir (A. Sharma vd., 2021).

Kozmetik ürünler, görünümü iyileştirmek, hoş koku sağlamak, temizlemek, cilt sorunlarını tedavi etmek veya koruyucu amaçlarla vücudun dış kısımlarına uygulanan preparatlardır (Çomoglu, 2012, Turkay, S., & Kizil, S. (2024). Güzellik kavramı tarih boyunca kadınlarla ilişkilendirilmiş olduğundan, kozmetik ürünler geleneksel olarak çoğunlukla kadınlar tarafından kullanılmıştır. Ancak, günümüzde bu ürünler, artan bir şekilde erkekler tarafından da tercih edilmektedir (Chisvert & Salvador, 2007; Chophi vd., 2021). Sıklıkla kullanılmasından ötürü olay yerlerinde kozmetik kalıntısı bulma oranı yüksektir. Locard'ın 'Her temas iz bırakır' ilkesine göre olay ile doğrudan bağlantı sağlanabilir. Kozmetikler, giyime ve nesneye kolaylıkla aktarılabilmesinden ötürü suç davalarında çözüme yardımcı olur, olay yeri-mağdur-fail üçgeninde bağlantı kurulmasını sağlar. Çıplak göz ile bakıldığında çok net görülmediği gibi çoğu zaman görülse bile fail çok dikkat etmez. Bu sebeple olay yeri inceleme uygun bir şekilde yapılırsa, olay anı hakkında bilgi verebilir ve fail-mağdur arasında ilişki kurulmasına katı sağlayabilir (Chophi vd., 2019; Arora vd., 2021; Singh & Kaur, 2022). Kozmetik ürünlerin keşfi ve kullanımı tarih öncesi dönemlere kadar uzanmaktadır. Antik çağda, Kleopatra'nın güzellik rutininde bitkisel yağlar, gül esansları, bal ve süt gibi doğal bileşenleri kullandığı bilinmektedir (Azak Sungur vd., 2018). Bu uygulamalar, kozmetiklerin tarih boyunca kültürel ve sosyal önemini vurgulamakta ve doğal kaynakların kişisel bakımda nasıl kullanıldığını göstermektedir (Özçelik & Bebekli, 2015). Kozmetikler malzemeler genel olarak; makyaj malzemeleri, losyonlar, maskeler, kremler, sabun, nemlendiriciler, parfümler vb. gibi farklı formlarda olabilmektedir. Makyaj malzemeleri (dekoratif kozmetikler); ruj, göz kalemi, maskara, far, pudra vb. gibi farklı sınıflandırmalarda incelenebilir. Göz kalemi; gözleri vurgulamak için kirpik diplerine çizgi çekilerek uygulanmaktadır. Mısırlılar gözlerini boyamak ve göz hastalıklarını tedavi etmek için malakit yeşili kullanıldığı gösterilmiştir (Bassal vd., 2013). Göz kalemi, likit, kalem ve jel formunda bulunmakta olup, genellikle siyah renk tercih edilmektedir. Göz kalemi formülasyonları üreticiden üreticiye farklılık göstermesine rağmen, yapım aşamasında genellikle benzer bileşenler kullanılmaktadır. Bu bileşenler arasında arı mumu, karnauba mumu, Hint yağı ve lanolin yağı gibi maddeler yer almaktadır. Formülasyonlarında ayrıca lesitin, nemlendiriciler, propilen glikol, tri-etanolamin ve amonyum akrilat kopolimeri gibi bileşikler kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, göz kalemi bazen kurşun, arsenik, uranyum, toryum, alüminyum, kükürt ve fosfor gibi ağır metaller de içerebilmektedir (Bassal vd., 2013; Massadeh vd., 2017; Chophi vd., 2019). Adli bilimler açısından bakıldığında suç vakalarında (cinsel taciz, şiddet, cinayet, insan kaçırma, hırsızlık) göz kalemi kalıntısına rastlamak mümkündür. Ek olarak, olay yerinde deri, kumaş, cam ve ayna gibi yerlere intihar notu, tehdit notu vb. gibi yazıları yazmak için kullanıldığı örneklere rastlanmaktadır (A. Sharma vd., 2021). Adli bilimlerde iz delilleri, failin olay mahaline doğrudan bağlanmasında önemli rol oynar. Adli soruşturmalar genellikle suçları çevreleyen olayları yeniden yapılandırmak için fiziksel kanıtlara dayanır. Göz kalemlerinin karakterizasyonu için farklı analitik teknikler kullanılmaktadır. Lazer Etkileşimli Plazma Spektroskopisi, Konfokal Raman Mikroskobu, İndüktif olarak eşleşmiş plazma optik emisyon spektroskopisi, Taramalı Elektron Mikroskobu, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi, UV-Vis Spektroskopisi, Gaz Kromatografisi, X-ışını floresans gibi teknikler, kozmetik ürünlerin adli delil olarak incelenmesinde kullanılan analitik yöntemlerden bazılarıdır (Stuart, 2005; V. Sharma vd., 2019).

ATR-FTIR spektroskopisi hızlı, tahribatsız, hazırlık gerektirmeyen, seçici az miktarda numune ile analiz yapılabilen bir teknik olması sayesinde olay yerinde bulunan fiziksel ve kimyasal delillerin karşılaştırılması, tanımlanması amacıyla en sık kullanılan tekniklerden birisidir (Dinç, 2007; Chophi vd., 2021).

Olay yerlerinin farklılık göstermesi nedeniyle, kozmetik deliller genellikle eser miktarda bulunabilmektedir ve bu durum, adli analizlerde daha hassas ve spesifik yöntemlerin kullanımını gerektirmektedir. Literatürde, göz kalemlerinin çeşitli analitik teknikler ve istatistiksel yöntemlerle incelendiğine dair çalışmalara rastlanmakla birlikte, farklı çevre koşullarındaki değişimlerinin incelenmesi veya VSC 8000 cihazı ile yapılan görüntüleme çalışmalarının mevcut olmadığı, *bildiğimiz kadarıyla*, görülmektedir. ATR-FTIR spektroskopisi; ucuz, hızlı, taşınabilir ve kullanım kolaylığı sayesinde adli bilimlerde etkili bir analiz yöntemi olarak tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, yerel marketlerden temin edilmiş 10 adet göz kalemi numunesinin yapısal karakterizasyonu ATR-FTIR spektroskopisi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, göz kalemlerinin farklı substratlardaki incelemeleri yapılarak, çevresel koşullardaki değişimleri incelenmiştir. Aynı zamanda; numunelerin görüntüleme işlemleri VSC 8000 cihazı ile gerçekleştirilerek farklı ışık kaynakları altındaki görüntüleri kıyaslanarak, adli delil olarak incelenebilirliğini araştırmaktadır.

2. Materyal ve metot
2. Material and method

Çalışma kapsamında, yerel marketlerde satılan farklı markalardaki siyah renkte 10 adet likit göz kalemi ve altı çeşit substrat (A4 kâğıdı, peçete, makyaj temizleme pedi, %100 polyester kumaş, %100 pamuk kumaş ve hibrit kumaş) kullanılmıştır. Anlaşılabilirlik ve gösterimi kolaylaştırmak amacıyla, göz kalemleri ve substratlar Tablo 1'de belirtilen kodlarla tanımlanmıştır. Her bir göz kalemi numunesi, ilgili substrat üzerine uygulanarak oda sıcaklığında, herhangi bir müdahale gerçekleştirilmeden kurutulmuştur. Göz kalemi örneklerinin spektrumlarını elde etmek ve farklı göz kalemi örnekleri arasındaki yapısal farklılıkları göstermek amacıyla ATR-FTIR spektroskopisi kullanılmıştır. Numunelerin ATR-FTIR cihazında karakterizasyonu için, spektrumlar alınmadan önce yöntem denemeleri gerçekleştirilmiş ve uygun bir metot oluşturulmuştur. Spektrumlar, 4000-650 cm^{-1} tarama aralığında, 16 tarama/sn tarama hızında ve 16 cm^{-1} çözünürlükte kaydedilmiştir. Kişisel hata ve cihazdan kaynaklanan hataların engellenmesi amacıyla, FTIR analizleri her numune için en az üç kez ölçümün ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Göz kalemlerinin analizi için substrat üzerinde numune içermeyen bir bölgeden arka plan ölçümü gerçekleştirilmiştir. Yapılan her analiz sonrası ATR kristalinin temizlenmesi yüksek saflıkta aseton ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Göz kalemleri ve substratların kodlanması
Table 1. *Sampling of eyeliners and substrates*

Göz Kalemi Markası	Kod	Substrat	Kod
Beaulis Zoom IT	E1	A4 Kâğıdı	A4
ABZ eyeliner	E2	Peçete	P
Rose Cosmetics Roena	E3	Makyaj Temizleme Pedi	MTP
Estel'la Cosmetics Fine Line	E4	Polyester Kumaş (%100)	PK1
RIVAL Beauty Eye	E5	Pamuk Kumaş (%100)	PK2
Beaulis GLIDE IT	E6	Hibrit Kumaş	PPK
Beaulis DRAG IT	E7		
Maybelline Newyork Hyper Precise All Day	E8		
Revolution Renaissance Flick	E9		
Deborah Milano Ultraliner	E10		

Olay yerinde bulunan deliller çeşitli çevresel koşullara maruz kalabilirler. Bazı durumlarda bu çevresel koşullardan etkilenmesi sonucu yapısal değişikliğe uğraması mümkün olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, çeşitli çevresel koşullara farklı sürelerde maruz bırakılan göz kalemi örneklerinin yapısal değişimi incelenmektedir. Bu amaçla, E9 göz kalemi örneği referans olarak seçilerek çevresel koşullardaki değişimleri incelenmiştir. Tablo 2'de E9 örneğinin maruz bırakıldığı çevresel koşullar, süresi ve kodu yer

almaktadır. Testler kapsamında numune, A4 kâğıdı, makyaj temizleme pedi, peçete, polyester kumaş (%100), pamuk kumaş (%100) ve hibrit kumaş (polyester ve pamuk karışımı) kullanılarak altı farklı substrat üzerine uygulanmıştır. Numuneler, içme suyu, İstanbul ilinin Üsküdar ilçesinden alınan deniz suyu (Marmara denizi) ve toprak gibi çeşitli çevresel ortamlarda bir hafta, iki hafta ve bir aylık sürelerle maruz bırakılarak çevresel etkilerinin değişimi incelenmiştir. Süreler sonunda, numunelerin stabilitesi ve çevresel faktörlerin etkisi değerlendirilmiştir. Bu süreçte, numunelerin kimyasal bileşimi ve fiziksel özelliklerindeki değişiklikler detaylı olarak analiz edilmiştir. Numuneler, bu bekleme sürelerinin öncesinde ve sonrasında fiziksel değerlendirme testleri ile fotoğraflanmıştır. Bekleme süresi tamamlandıktan sonra, su içerisinde bekletilen örnekler çıkarılarak, etüvde 24 saat 50 °C'de kurutulmuştur (Turkay, S., & Kizil, S. (2024); V. Sharma vd. 2019). Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, her numune ATR-FTIR ile analiz edilmiştir.

Tablo 2. Stabilite testlerinde kullanılan kodlar
Table 2. *Codes used in stability tests*

Ortam	**Kod**	**Süre**	**Kod**
Deniz Suyu	BS	1 Hafta	1H
İçme Suyu	IS	2 Hafta	2H
Toprak	TO	1 Ay	1A

Tablo 3. Stabilite testleri ortam ve süreleri
Table 3. *Stability test conditions and durations*

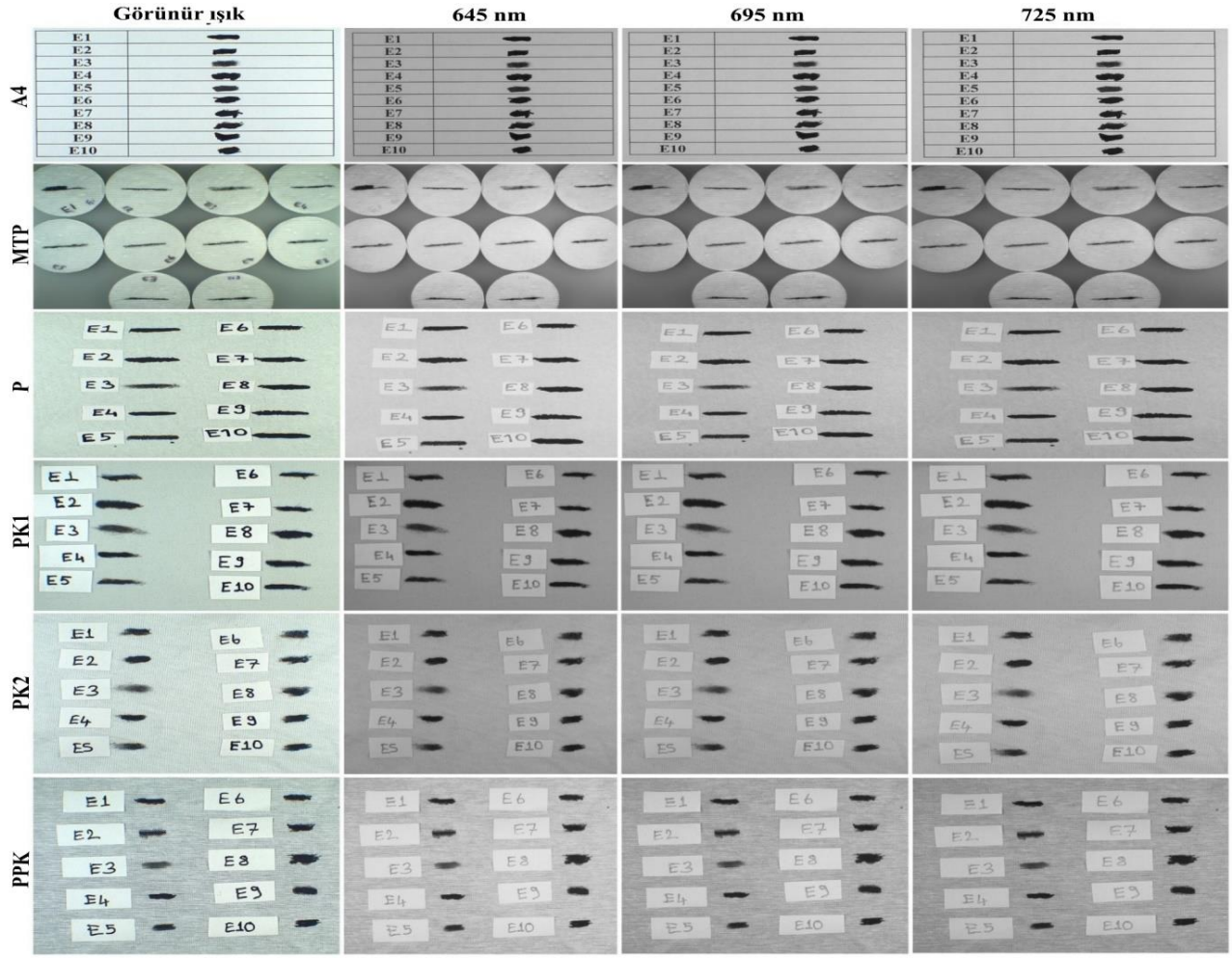
	Bekletme Ortamı		
Bekleme Süresi	**İçme Suyu**	**Deniz Suyu**	**Toprak**
	1 Hafta	1 Hafta	1 Hafta
	2 Hafta	2 Hafta	2 Hafta
	1 Ay	1 Ay	1 Ay

Ayrıca, göz kalemi altı farklı substrat üzerine uygulanmış ve VSC 8000 cihazı kullanılarak farklı dalga boylarında (Görünür ışık, 645 nm, 695 nm ve 725 nm) görüntüleri elde edilmiştir. Bu işlem, göz kaleminin farklı substratlar üzerindeki yüzey etkileşimlerini ve optik özelliklerini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen görüntüler, her bir dalga boyunun belirli bir ışık spektrumunu temsil ettiği şekilde, Şekil 1'de yer almaktadır. Bu görüntülerin analizi, göz kaleminin yapısal özelliklerinin ve substratlarla etkileşiminin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak sağlamıştır.

3. Bulgular
3. Results

3.1 VSC 8000 sonuçları
3.1 VSC 8000 results

VSC 8000 cihazı, farklı dalga boylarındaki ışıklar altında görüntüleme yapabilen bir sistemdir. Bu çalışmada, göz kalemi numunelerinin farklı dalga boylarında sergilediği optik tepkiler incelenmiş ve bu tepkilerin görsel olarak sınıflandırılabilirliği değerlendirilmiştir. Göz kalemi içerisinde bulunan boyar maddelerin Şekil 1'de gösterilen dalga boylarında silinebilme özelliklerine bakılmıştır. VSC 8000 cihazı ile elde edilen görüntülerin analizi sonucunda, göz kalemlerinin farklı dalga boyu ışıklar altında silinme özelliği göstermediği ve görsel olarak sınıflandırılamayacağı tespit edilmiştir. Numunelerin yüzey özelliklerinin homojen olduğunu ve ışık yansıtma kapasitesinin düşük seviyede kaldığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, göz kalemlerinin optik analizlerde yansıma kaynaklı sapmalara yol açma potansiyelinin minimal olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu durum, materyallerin yüzey pürüzsüzlüğü ve ışık absorpsiyon özellikleri ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 1. Göz kalemi örneklerinin VSC 8000 görüntüleri
Figure 1. *Images of eyeliner samples by VSC 8000*

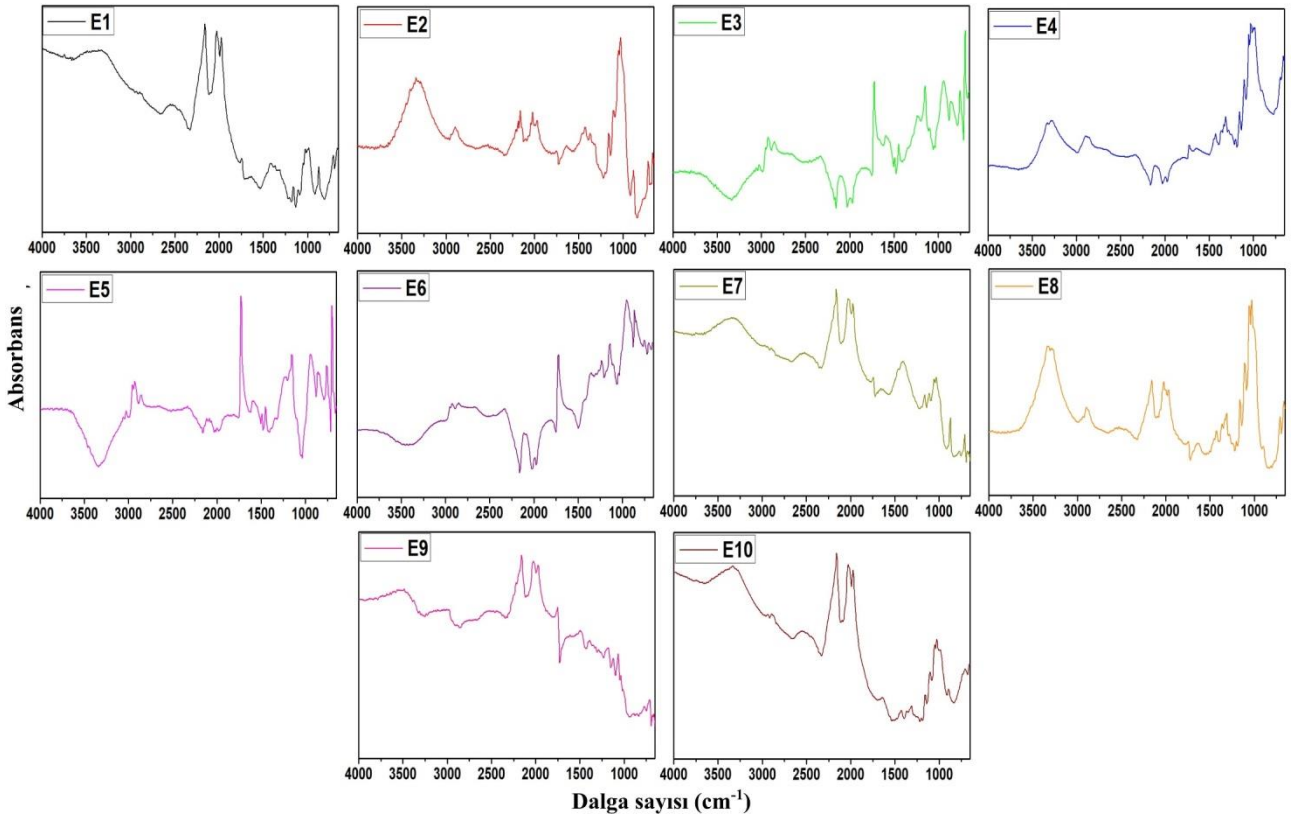
3.2 IR spektrumları sonuçları
3.2 IR spectra results

Bu çalışmada, çeşitli substratlar üzerinde yer alan göz kalemlerinin IR spektrum grafiği incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, %100 polyester kumaşta göz kalemlerine ait belirgin bir pik gözlemlenmemiştir. IR spektrumunda polyester kumaş sadece kendi karakteristik piklerini vermiştir.

Bu çalışmada Şekil 2'de tüm göz kalemi numunelerinin IR spektrumları verilmiştir.

Göz kalemi numuneleri içerisindeki farklı materyaller nedeniyle bazı pikler belirli numunelerde gözlemlenirken diğerlerinde gözlemlenmemiştir. Hidroksil gruplarına ait pikler (3700-3000 cm^{-1}) sadece E1 ve E9 göz kalemi numunelerinde tespit edilmiştir, diğer numunelerde ise bu pikler gözlenmemiştir. Ester bantları (1725-1745 cm^{-1}) E7 ve E10 göz kalemi numunelerinde mevcutken, diğer numunelerde bu pikler bulunmamaktadır. Mika ve -CH bağı ise yalnızca E1, E2 ve E4 numunelerinde gözlemlenmiş olup, diğer numunelerde bu bantlar gözlenmemiştir.

Çalışmamızdaki göz kalemi örneklerine ait pikler ve ait olduğu gruplara ait bilgiler Tablo 4'te yer almaktadır.



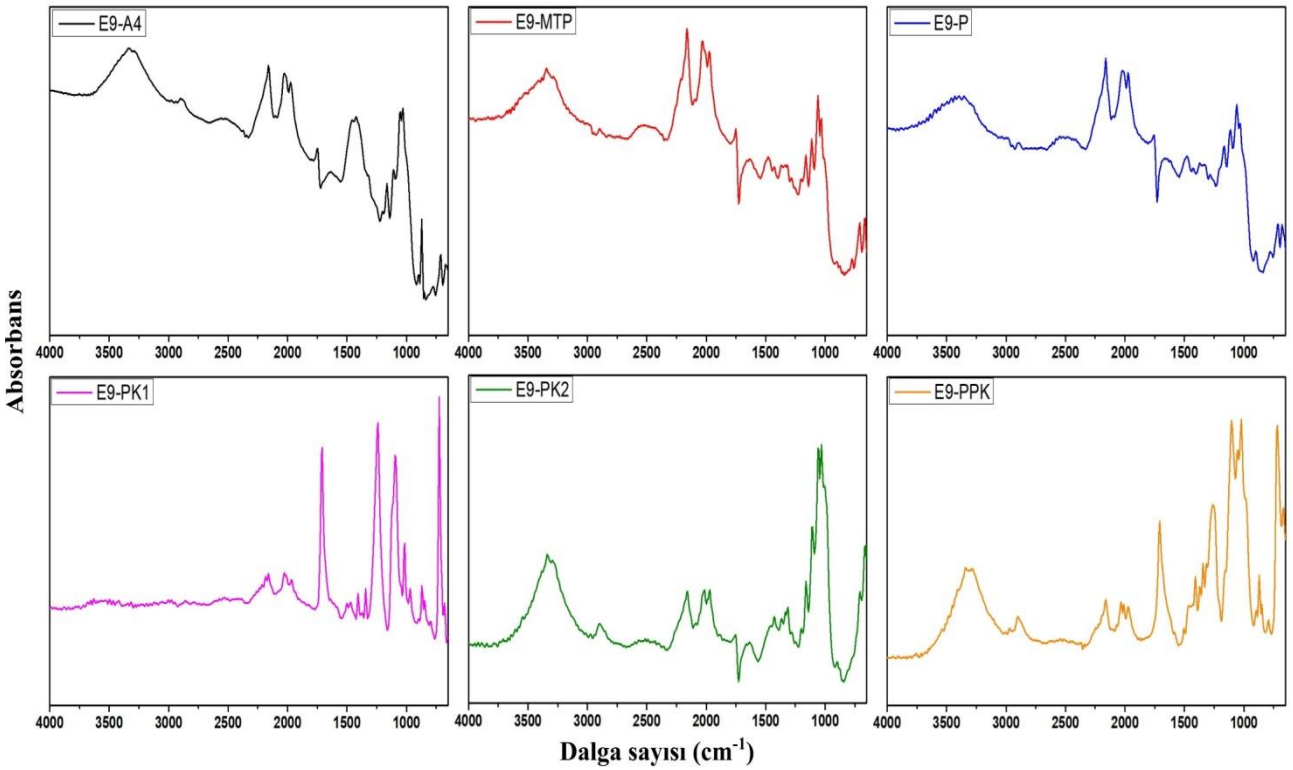
Şekil 2. Tüm göz kalemi numunelerinin IR spektrumları
Figure 2. *ATR-FTIR spectra of all eyeliner samples*

Tablo 4. Göz kalemlerinde bulunan pikler ve bileşenler
Table 4. *Peaks and ıngredients found in eyeliners*

Gözlemlenen pikler	**Aralık (cm^{-1})**	**Bant ataması**	**Referans**
3288,3257,3027	3700-3000	Hidroksil grubu	(Arora vd., 2021)
2990, 2960, 2920, 2860, 2848	3000-2800	Parafin bileşikleri, Talk veya mika, alifatik bileşikler ve CH grupları	(Arora vd., 2021)
2117, 2114, 2112, 2110, 2102	2140-2100	C≡C terminal alkin	(Socrates, 2004)
2091, 2002, 1995, 1990	1990-2150	İzotiyosiyanat (-NCS)	(S. Sharma vd., 2019)
1731,1726, 1725	1725-1745	Ester bandı, Karbonil C=O germe	(S. Sharma vd., 2019)
1724, 1715, 1707	1705-1725	Ketonda C=O esnemesi	(S. Sharma vd., 2019)
1647, 1593		Polietilen glikol, aromatik bileşikler, -CH grubu veya parafin bileşikleri	(Arora vd., 2021)
1588, 1546		Ester bandı ve aromatik bileşikler	(V. Sharma vd., 2019)
1454, 1439, 1424, 1410, 1342		Parafin bileşikleri	(V. Sharma vd., 2019)
1376		Mika, -CH bağı	(Chophi vd., 2021)
1237		C-O-C esneme titreşimleri ve hint yağı	(Asri vd., 2021)
1222, 1150, 1090, 1050, 1014		Polietilen glikol, parafin bileşikler ve silika	(V. Sharma vd., 2019)
1190, 1103		Çeşitli yağlar ve mumlar	(Asri vd., 2021)
974-654		Aromatik bileşikler	(V. Sharma vd., 2019; Asri vd., 2021)

3.3 Stabilite testi
3.3 Stability test

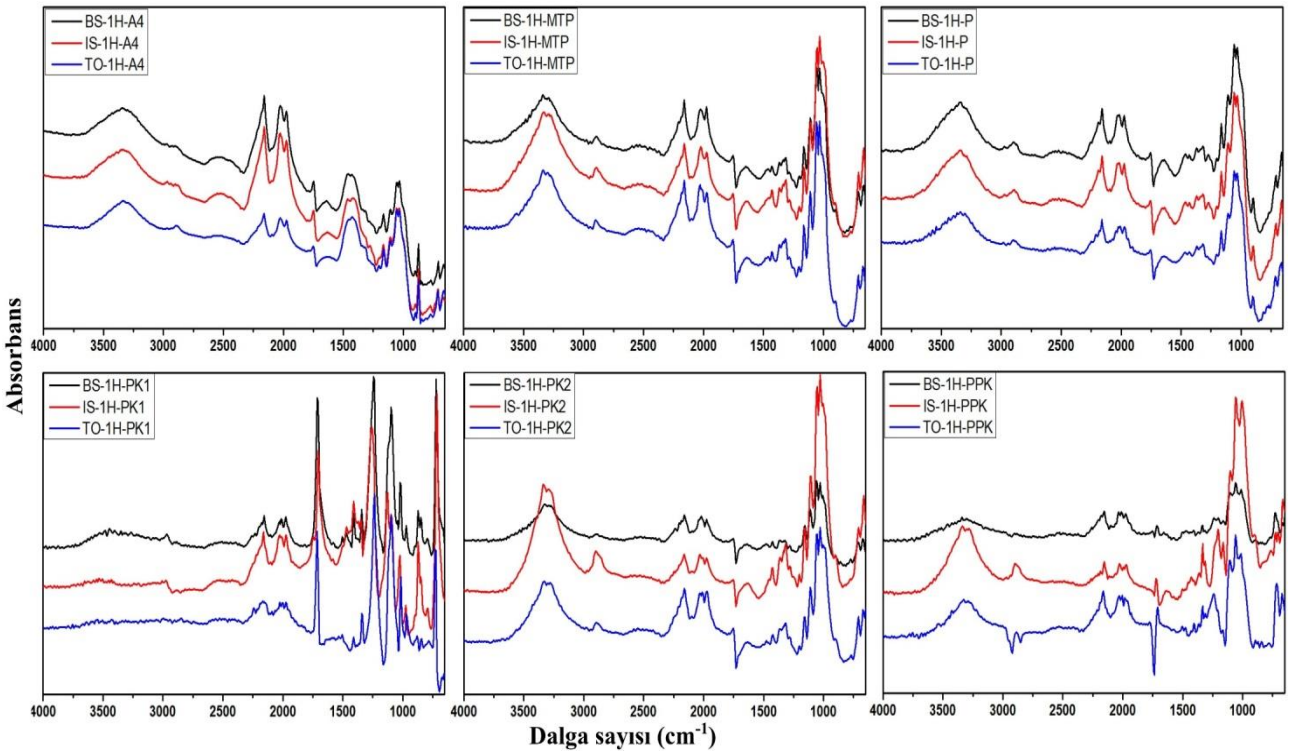
Stabilite testi için, 10 adet göz kalemi numunesi arasından rastgele seçilen E9 numunesi, analizler ve değerlendirmeler için referans numune olarak kullanılmıştır. Test sonuçları, numunelerin farklı çevresel koşullara karşı dayanıklılığını ve uzun süreli stabilitesini belirlemeye yönelik önemli bir bilgi sağlamıştır. Test için kullanılan E9 göz kalemi numunesinin normal koşullarda alınmış IR spektrumları, Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu spektrumlar, numunenin A4 kâğıdı, makyaj temizleme pedi, peçete, %100 polyester kumaş, %100 pamuk kumaş ve hibrit kumaş üzerindeki IR spektrumlarıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 3. E9 göz kalemi örneğinin 6 çeşit substrat üzerindeki ATR-FTIR spektrumları
Figure 3. *ATR-FTIR spectra of E9 eyeliner sample on 6 types of substrates*

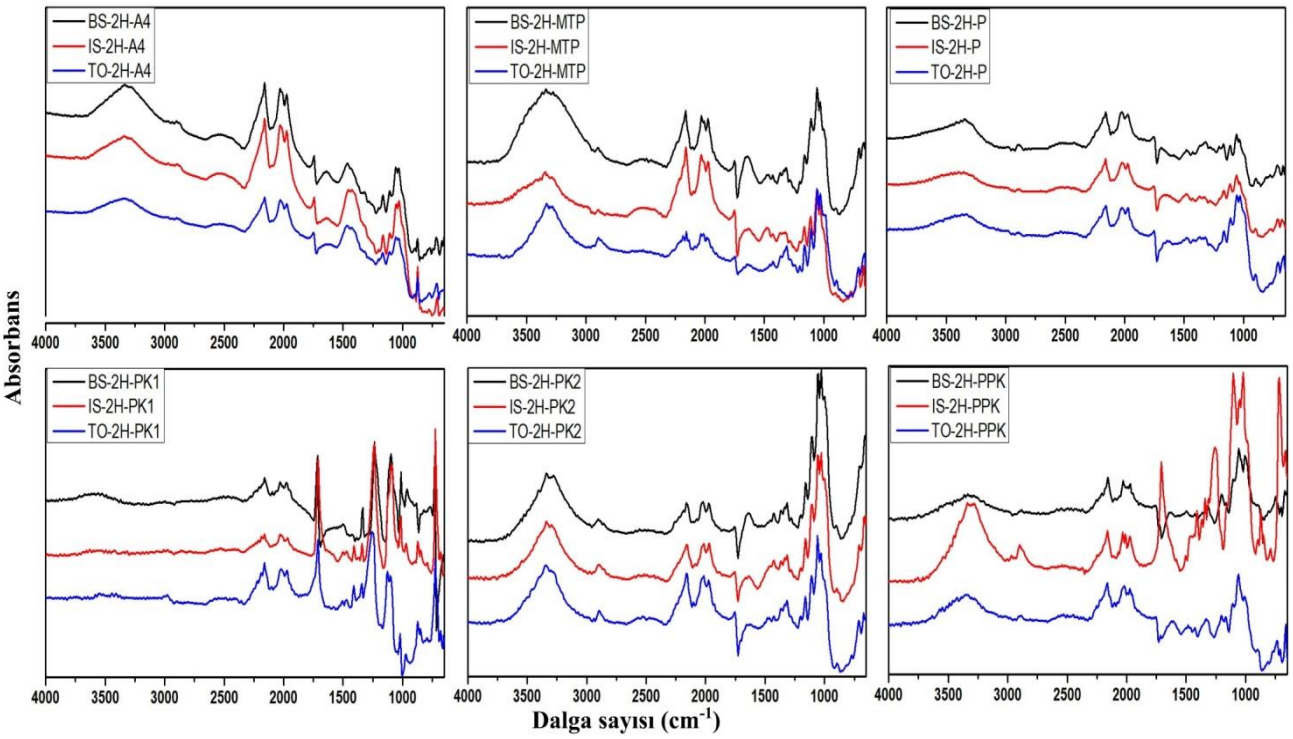
Şekil 4'te, E9 göz kalemi numunesinin bir haftalık deniz suyu, içme suyu ve toprak içerisinde bekleme sürecinden sonraki ATR-FTIR spektrumları yer almaktadır. Şekil 5'te, aynı numunenin iki haftalık bekleme süreci sonunda elde edilen IR spektrumları yer almaktadır. Şekil 6 ise, bir aylık bekleme sürecinin ardından alınan IR spektrumlarını sunmaktadır. Elde edilen IR spektrum analizleri sonucunda, numunelerin ATR-FTIR spektrumlarında değişiklik olmadığı görülmektedir. Ek olarak, %100 polyester kumaş üzerinde yapılan analizlerde, polyester kumaşın kendi karakteristik IR piklerini koruduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, E9 göz kalemi numunesinin, uygulandığı substratın kimyasal özelliklerini değiştirmediğini ve orijinal yapısını muhafaza ettiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, farklı substratlar üzerine lekelenmiş göz kalemi örnekleri; içme suyu, deniz suyu gibi farklı çevresel ortamlara 1 hafta-1 ay arası sürelerde maruz bırakılmıştır. ATR-FTIR spektrumları incelendiğinde; göz kalemi örneklerinin belirtilen süreler içinde kimyasal değişimlerinin gözlemlenemediği belirlenmiştir.



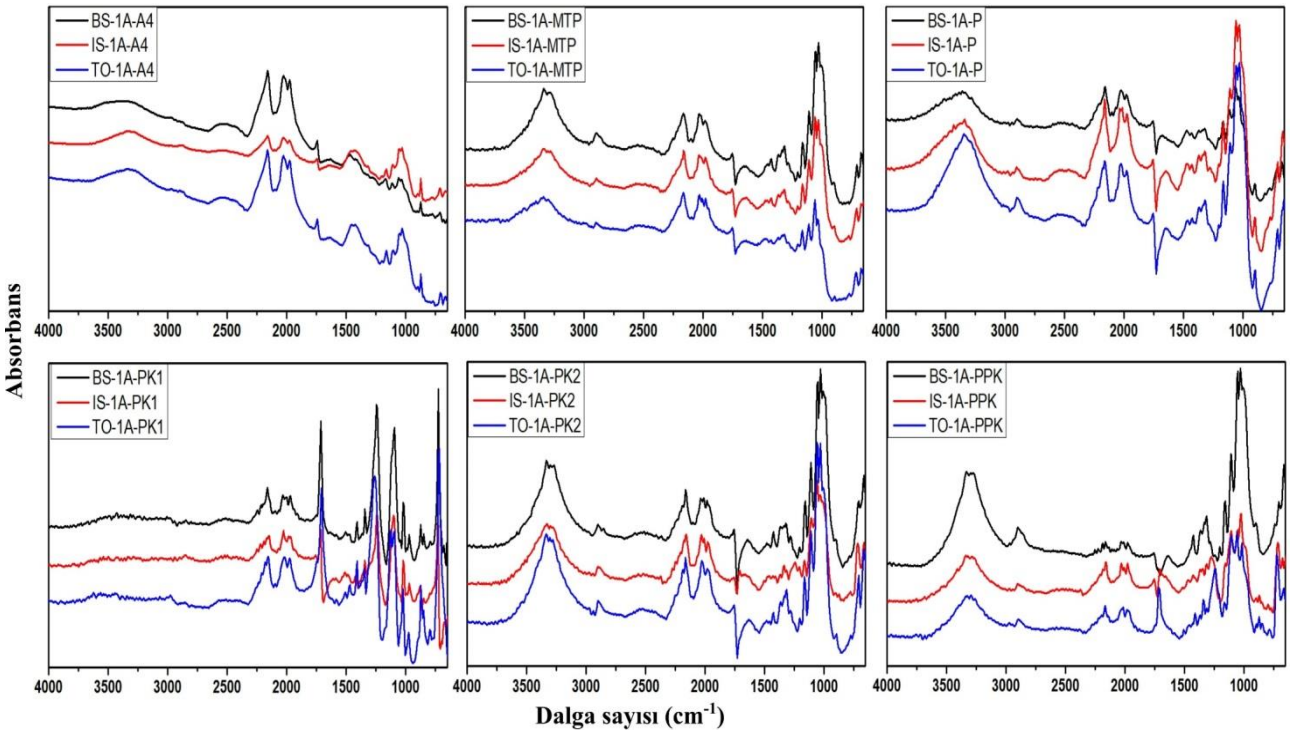
Şekil 4. Bir haftalık süreçte deniz suyu, içme suyu ve toprak içerisinde bekleyen E9 göz kalemi örneğinin ATR-FTIR spektrumları

Figure 4. *ATR-FTIR spectra of E9 eyeliner sample stored in sea water, tap water and soil for a week*



Şekil 5. İki haftalık süreçte deniz suyu, içme suyu ve toprak içerisinde bekleyen E9 göz kalemi örneğinin ATR-FTIR spektrumları

Figure 5. *ATR-FTIR spectra of E9 eyeliner sample stored in sea water, tap water and soil for two weeks*



Şekil 6. Bir aylık süreçte deniz suyu, içme suyu ve toprak içerisinde bekleyen E9 göz kalemi örneğinin IR spektrumları
Figure 6. *IR spectra of E9 eyeliner sample stored in sea water, tap water and soil for a month*

4. Tartışma
4. Discussion

Göz kalemi ile ilgili ATR-FTIR ile ilgili yapılan çalışmalarda içeriğinde aromatik ve amino bileşikleri, esterler, silika, parafin, polietilen glikol ve mika gibi maddelerin olduğu söylenmiştir. ATR-FTIR spektroskopisinde ise önemli dalga sayıları sırasıyla; 2952 cm^{-1}, 2923 cm^{-1} ve 2886 cm^{-1}'de üç tepe noktasıdır. Bu zirveler C-H alifatik gruplara ve parafin, talk veya mikadan geldiğine atfedilmiştir. 1725 cm^{-1}' deki zirveler ester bağlarına ve aromatik bileşiklere atfedilmiştir. 1451 cm^{-1}'deki zirve C-H veya -CH_3 bükülmesine bağlanabilir. 1381 cm^{-1}'lik zirve -CH_3 simetrik bükülmesinin karakteristiğidir. 1075 cm^{-1}'deki zirve, C-O gerilmesine veya aromatik C-H bükülmesine bağlı olabilir. 1029 cm^{-1} ve 987 cm^{-1}'lik zirveler C-H salınım titreşimlerine atfedilirken, 839 cm^{-1}, 756 cm^{-1} ve 697 cm^{-1}'lik zirveler C-H' ye ait olduğu görülmektedir (Chophi vd., 2021).

ATR-FTIR spektroskopisinde ise önemli dalga sayıları sırası ile; 3310 cm^{-1} civarında bir pikin varlığı polietilen glikole atfedilmiş ve 3000 cm^{-1} civarında olması da alifatik ve aromatik bileşiklerde C-H bağlanmasından kaynaklanır. 2954 cm^{-1}, 2916 cm^{-1} ve 2850 cm^{-1}'deki pikler, alifatik bileşiklerdeki C-H bağının varlığını onaylamakta ve bu da göz kaleminde bulunan bu bileşiklerin varlığını doğrulamıştır. Bu aynı zamanda parafinin varlığını doğrular ve bu, talk veya mika gibi diğer maddelerin varlığı nedeniyle de mevcut olabileceğini göstermektedir (Socrates, 2004; Arora vd., 2021).

Aldehitler, ketonlar ve anhidritlerdeki C=O bağının varlığı, 1786 cm^{-1}, 1765 cm^{-1}, 1705 cm^{-1} civarındaki piklerle doğrulanmıştır. 1575 cm^{-1}, 1450 cm^{-1}, 1415 cm^{-1}'deki pikler, bileşiklerde bulunan özel bağları göstermektedir (S. Sharma vd., 2019; V. Sharma vd., 2019). 1225 cm^{-1}, 1188 cm^{-1}, 1130 cm^{-1}, 1088 cm^{-1}, 888 cm^{-1}, 720 cm^{-1}, 670 cm^{-1}, aromatik bileşiklerin varlığını göstermektedir. 1730 cm^{-1}, 1648 cm^{-1} ve 1550 cm^{-1} civarındaki güçlü bantlar, esterlerin ve amit gruplarının varlığından kaynaklanmaktadır. 1005 cm^{-1}'deki pik, C-OH gerilmesine atfedilmiştir. 799 cm^{-1}'deki pik, üçlü substitüe alkenlerde C-H deformasyonuna bağlı olduğunu; 715 cm^{-1}, 755 cm^{-1}, amitlerde N-H bükülmesinden veya Alkinlerde C-H deformasyonundan kaynaklanabileceği gösterilmiştir. 695 cm^{-1} civarındaki pik, benzene türevlerine ve C-S gerilme titreşimlerine atfedilmiştir (Arora vd., 2021).

Bu çalışmada yukarıdaki çalışmalara benzer şekilde 3 farklı göz kalemi örneğinde sırasıyla 3288 cm^{-1}, 3257 cm^{-1}, 3027 cm^{-1}'de hidroksil gruplarına işaret eden piklerin varlığı görülmüştür. Ayrıca farklı göz kalemlerinde 2990 cm^{-1}, 2960 cm^{-1}, 2920 cm^{-1}, 2860 cm^{-1}, 2848 cm^{-1}'de alifatik bileşikler ve C-H gruplarına atıfta bulunabilecek benzer zirveler görülmektedir. 1731 cm^{-1}, 1726 cm^{-1} 1725 cm^{-1}'de ester bağlarının varlığını gösteren pikler, 1724 cm^{-1}, 1715 cm^{-1},1717 cm^{-1} ketonlardaki C=O bağına işaret eden pikler görülmüştür. 1454 cm^{-1}, 1439 cm^{-1}, 1424 cm^{-1}, 1410 cm^{-1} piklerinde parafin bileşiklerde bulunabilen C-H ya da $C\text{-}H_3$ bileşenlerine atıfta bulunabilecek piklere rastlanılmıştır. 1346 cm^{-1} ve 1376 cm^{-1} mika maddesinin varlığına işaret eden pikler görülmüştür. 1090 cm^{-1}, 1050 cm^{-1}, 1014 cm^{-1} polietilen glikol, silika madderine atfedilecek piklere rastlanılmıştır. 1100-1200 cm^{-1} arasında çeşitli yağlar ve mumlara ait bileşiklere işaret eden pikler ve 650-970 cm^{-1} aralığında da çeşitli aromatik bileşiklere ait pikler görülmektedir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, Chophi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, 28 farklı eyeliner markasına ait toplamda 60 adet numune, 11 farklı far markasına ait 50 göz farı ile ATR-FTIR kullanılarak incelenmiş PCA (Temel Bileşenler Analizi) ve PCA-LDA (Temel Bileşenler ve Doğrusal Ayırma Analizi) yapılmıştır. Çalışmada pamuklu kumaş, kâğıt mendil, cam ve plastik gibi seçilen substratlar kullanılmıştır. Eyeliner pamuklu kumaş ve kâğıt mendil içerisinde görünüm sağlanamamıştır fakat cam ve plastik üzerinde PCA-LDA aracılığıyla eşleşme yapılmıştır. Göz farları ise pamuklu kumaş ve kâğıt mendil üzerinde eşleşmesi yapılmıştır (Chophi vd., 2021).

Arora ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 62 farklı eyeliner örneği ve 40 maskara örneği ATR-FTIR ile incelenmiş ve analiz edilmiştir. PCA ve PCA-LDA yapılmıştır. Mevcut veri setindeki çapraz doğrulama %91.7'nin üzerinde doğru sonuç vermiştir (Arora vd., 2021).

Kaur ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada yerel pazarlardan alınan 47 kahverengi ruj örneği, 57 pembe ruj örneği, 55 kırmızı ruj örneği ATR-FTIR spektroskopisi kullanılarak analiz edilmiştir. Numunelerin sınıflandırılmasında PCA ve LDA (Doğrusal Ayırma Analizi) olmak üzere iki kemometrik yöntem kullanılmıştır. PCA kullanılarak kahverengi rujların %93,61'i, pembe rujların %80,7'si ve kırmızı rujların %87,27'si doğru olarak sınıflandırıldı. LDA ise numuneleri %100 doğru bir şekilde sınıflandırıp analiz etmiştir. ATR-FTIR spektroskopisinin farklı renkteki ve farklı markalardaki ruj örneklerinin sınıflandırılması için en iyi teknik olduğu söylenmiştir (Kaur vd., 2020).

Sharma ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışma; 33 tane Kohl örneğinin adli delil olarak kullanılması amacıyla kıyaslanmasını içermektedir. Örneklerin yapısal analizi için ATR-FTIR spektroskopisi kullanılmıştır. Ek olarak, Kohl numuneleri üzerinde ısının etkisi de araştırılırmıştır. Kohl örneklerinin ayrımı, elde edilen ATR-FTIR verilerinin pik dalga sayısından ve daha sonra HCA (Hiyerarşik Kümeleme Analizi) ve PCA bazlı kemometrik yöntemlerle sağlanmıştır. Bununla birlikte, t-istatistikleri ile birleştirilen çok değişkenli yöntem en yüksek ayırt etme gücünü sağlamıştır. Rastgele seçilen numune ilk olarak 50 °C civarında ısıtılmış fakat herhangi bir etki olmadığı tespit edilmiştir. 400 °C üstündeki sıcaklıklarda organik bileşiklerde kayıplar olduğu gözlenmiştir (V. Sharma vd. 2019).

Sharma ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 57 tane güzellik kremi örneği temin edilmiş ve ATR-FTIR spektroskopisi kullanılarak yapısal karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Kremler arasında daha iyi ayrım yapmak ve verileri sınıflandırmak için PCA ve PLS-DA gibi kemometrik yöntemler kullanılmıştır. Kemometrik yöntemleri uygulamadan önce, değişen eğim ve katkının yanı sıra çarpımsal etkilerden kaynaklanan değişiklikleri ortadan kaldırmak için verilerin normalizasyonu yapılmıştır. Sınıflandırma modelinde yaklaşık %73 doğruluk tespit edilmiştir. Ayrıca 10 bilinmeyen örnek tanıtılarak modelin geçerliliği test edilmiş ve yine sınıf tahminine ilişkin tahmin oranındaki doğruluk %90' kadar çıkmıştır (A. Sharma vd., 2021).

Singh ve Kaur tarafından yapılan bir çalışmada 20 adet sindoor (vermilyon) temin edilmiştir. Analiz için ATR-FTIR spektroskopisi kullanılmıştır. Sindoor numunelerinde birleşiklerin varlığının belirlenmesi veya doğrudan doğrulanması kesindir ancak fonksiyonel grubun varlığı kozmetik ürünün tipini bireyselleştirmektedir. Ağır metallerin ayrımı için ATR-FTIR spektroskopisi başarıyla kullanılmıştır (Singh & Kaur, 2022).

Bu çalışmada elde edilen veriler ve yukarıda tartışılan çalışmalarla, bazı önemli benzerlikler ve farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Çalışmanın en dikkat çekici bulgularından biri, ATR-FTIR spektroskopisi ile göz kalemi

örneklerinin yapısal analizinin ucuz, hızlı ve etkin bir şekilde incelenebildiğini göstermektedir. Literatürdeki çalışmalarda, göz kaleminin bileşenleri genellikle alifatik bileşikler, esterler, parafin ve polietilen glikol gibi maddeler olarak belirlenmiştir (Chophi vd., 2021; Arora vd., 2021). Bu bileşiklerin göz kalemi örneklerinde bulunduğu görülmüş olup, çalışmada elde edilen piklerin literatürle tutarlı olması, ATR-FTIR spektroskopisinin göz kalemi içeriğini belirlemede etkili bir teknik olduğunu desteklemektedir. Ancak, çalışmanın önemli bir sınırlaması, %100 polyester kumaş üzerindeki göz kalemi örneklerinin net bir şekilde ayırt edilememiş olmasıdır. Bu durum, özellikle adli bilimlerde, farklı yüzeylerdeki göz kalemi örneklerinin analizi için daha dikkatli bir yaklaşım gerektiğini göstermektedir.

ATR-FTIR spektroskopisinin yanında Video Spektral Karşılaştırıcı (VSC 8000) kullanılmış ve diğer çalışmalardan farklı olarak göz kalemlerinin farklı dalga boylarındaki görünümleri incelenmiş ve dalga boylarına bağlı herhangi bir görsel değişiklik tespit edilmemiştir. Farklı dalga boylarına sahip ışıklarla yapılan görüntülemelerde siyah göz kalemleri için ayırt edici sonuçlar verilemediği görülmüştür.

Çevresel etmenlerin göz kalemi örneklerinin yapısal özellikleri üzerindeki etkisi literatürde vurgulanmış bir konudur. Özellikle yüksek sıcaklık gibi çevresel faktörlerin, göz kalemi içeriğindeki organik bileşiklerin yapısal değişiklikler meydana getirebileceği ifade edilmiştir (V. Sharma vd., 2019). Ancak, bu çalışmada uygulanan deneysel koşullarda, göz kalemi örneklerinde sıcaklığın organik bileşiklerin yapısal bütünlüğü üzerinde kayıp yaratmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kullanılan sıcaklık seviyelerinin organik bileşenlerin stabilitesini etkilemeyecek kadar düşük olduğuna veya göz kalemi örneklerinin bu tür koşullara karşı yeterli direnç gösterdiğine işaret edebilir.

5. Sonuçlar ve öneriler
5. Conclusions and Recommendations

Kozmetikler günümüzde hemen hemen her kadın ve bazı erkekler tarından günlük olarak kullanılmaktadır. Bu kullanımdan ötürü olay yerinde kozmetik delillerle karşılaşmak mümkündür. Kozmetik ile ilgili olay yerinde rastlanılmasından dolayı bazı çalışmalar yapılmıştır ve bu çalışmalar sonucunda farklı kozmetik ürünler farklı substratlar üzerinde incelendiğinde bize olay yeri üçgeni ile ilgili bilgi verdiği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada göz kalemi numuneleri VSC 8000 ve stereo makroskop ile seçilen herhangi bir değişiklik tespit edilmemiştir. ATR-FTIR spektroskopisi kullanılarak yapılan incelemelerde, %100 polyester kumaş üzerinde göz kalemi ile ilgili pikler gözlenmemiştir. Ancak diğer substratlar üzerinde yapılan analizlerde göz kalemi numuneleri belirgin pikler gösterdiği görülmektedir. Bu durum olay yerinde bulunabilecek farklı substratlar üzerindeki göz kalemi kalıntılarının, delil olarak değerlendirilebileceğini ve suçlunun tespiti için önemli bir gösterge olabileceğini ortaya koymaktadır.

Ayrıca yapılan stabilite testlerinde farklı substratlarda, farklı ortamlarda ve farklı zamanlarda bırakılan örneklerde pamuklu kumaş üzerinden stabilite için bırakılan göz kalemi örneklerinde substrat olarak kullanılan pamuklu kumaşın toprak içerisinde bozulmasıyla beraber diğer ortamlara göre göz kaleminde yapısal değişiklikler gözlemlenmiştir. Makyaj temizleme pamuğu üzerinde ise taze örneklerde diğer ortam ve zamanlara göre ayrım görülmüştür. Diğer substrat örneklerinde ise karşılaştırma yapılabilecek anlamlı bir sonuç elde edilemezken polyester kumaş üzerinde alınan sonuçlarda göz kalemi ile ilgili pikler gözlemlenmediği için stabilite testlerinde yorumlanmamıştır.

Kozmetik bozulma içerikleri, kullanım koşulları ve insan sağlığı üzerindeki etkiler gibi faktörlerden dolayı değişiklik göstermektedir. Bu mantıksal, farklı analiz yöntemlerinin ve çeşitli içeriklerin incelenmesinin önemi artmaktadır. Bu nedenle, projenin kullanıldığı dönemde elde edilemeyen sonuçlar, alternatif analiz yöntemleri ve farklı içeriklerin incelenmesi ile başarı elde edilebilir.

Teşekkür
Acknowledgement

Bu çalışmayı destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkür ederiz. (2209-A Üniversite Öğrencileri Yurt İçi Araştırma Projeleri Destekleme Programı, Proje numarası: 1919B012222566).

Kaynaklar
References

Arora, T., Verma, R., Kumar, R., Chauhan, R., Kumar, B., & Sharma, V. (2021). Chemometrics based ATR-FTIR spectroscopy method for rapid and non-destructive discrimination between eyeliner and mascara traces. *Microchemical Journal*, *164*, 106080.

Asri, M. N. M., Verma, R., Ibrahim, M. H., Sharma, V., & Nor, N. A. M. (2021). Rapid non-destructive techniques to identify the traces of Kajal using chemometrics; A comparison of ATR-FTIR and Raman spectroscopy. *Microchemical Journal*, *169*, 106556.

Azak Sungur, S., Sözen Şahne, B., & Yeğenoğlu, S. (2018). Kozmetik Ürünlerin Tarihçesi, Ürün Tanıtımlarının Yasal Durumu ve Tüketici Davranışı Açısından Değerlendirilmesi. *Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi*, *8*(3), 191-197. https://doi.org/10.31020/mutftd.432259

Bassal, N., Mahmoud, H., & Hassan, M. (2013). *Elemental Composition Study of Kohl Samples*.

Chisvert, A., & Salvador, A. (2007). Analysis of Cosmetic Products. İçinde *Analysis of Cosmetic Products*. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52260-3.X5020-7

Chophi, R., Sharma, S., Jossan, J. K., & Singh, R. (2021). Rapid and non-destructive analysis of eye-cosmetics using ATR-FTIR spectroscopy and chemometrics. *Forensic Science International*, *329*, 111062. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.111062

Chophi, R., Sharma, S., Sharma, S., & Singh, R. (2019). Trends in the forensic analysis of cosmetic evidence. *Forensic Chemistry*, *14*, 100165. https://doi.org/10.1016/j.forc.2019.100165

Çomoglu, T. (2012). Kozmetikler. *Marmara Pharmaceutcal Journal*, *1*(16), 1-8. https://doi.org/10.12991/201216414

Dinç, E. (2007). Kemometri Çok Değişkenli Kalibrasyon Yöntemleri. *Hacettepe Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi Dergisi*, *27*(1), 61-92.

Houck, M. M., & Siegel, J. A. (2016). *Adli bilimlerin temeli*. Nobel Akademik Yayıncılık.

Kaur, K., Yadav, P. K., Bumbrah, G. S., & Sharma, R. M. (2020). Forensic classification of lipsticks using attenuated total reflectance–Fourier transform infrared (ATR-FTIR) spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, *110*, 103146.

Massadeh, A. M., El-khateeb, M. Y., & Ibrahim, S. M. (2017). Evaluation of Cd, Cr, Cu, Ni, and Pb in selected cosmetic products from Jordanian, Sudanese, and Syrian markets. *Public Health*, *149*, 130-137. https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.03.015

Özçelik, H., & Bebekli, Ö. (2015). Kozmetik Sektörüne Genel Bakiş. *AnamasDergisi*, 3.

Saferstein, R. (2004). *Criminalistics: An introduction to forensic science*. https://www.ojp.gov/ncjrs/virtual-library/abstracts/criminalistics-introduction-forensic-science

Sharma, A., Chauhan, R., Kumar, R., Mankotia, P., Verma, R., & Sharma, V. (2021). A rapid and non-destructive ATR-FTIR spectroscopy method supported by chemometrics for discriminating between facial creams and the classification into herbal and non-herbal brands. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *258*, 119803.

Sharma, S., Chophi, R., Kumar, R., Sharma, V., & Singh, R. (2019). Differentiation of locally manufactured Kajal by attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy supported by chemometric analysis. *Forensic science international*, *303*, 109930. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.109930

Sharma, V., Bhardwaj, S., & Kumar, R. (2019). On the spectroscopic investigation of Kohl stains via ATR-FTIR and multivariate analysis: Application in forensic trace evidence. *Vibrational Spectroscopy*, *101*, 81-91. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2019.02.006

Singh, G. K., & Kaur, R. (2022). Forensic examination of vermilion (Sindoor) sample using ATR-FTIR spectroscopy. *Materials Today: Proceedings*, *68*, 664-668.

Socrates, G. (2004). *Infrared and Raman characteristic group frequencies: Tables and charts*. John Wiley & Sons.

Stuart, B. (2005). Infrared Spectroscopy. Içinde *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/0471238961.0914061810151405.

Turkay, S., & Kizil, S. (2024). Forensic examination of lipsticks as trace evidence under different environmental conditions. Turkish Journal of Engineering, 8(2), 353-369.

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 197-209 doi: 10.17714/gumusfenbil.1600286 Research Article

Next-generation software development competencies: Identification of technical and non-technical skills needed by modern industry

Yeni nesil yazılım geliştirme yetkinlikleri: Modern endüstrinin ihtiyaç duyduğu teknik ve teknik olmayan becerilerin belirlenmesi

Fatih GÜRCAN*[1], Cemal KÖSE[2]

[1]*Karadeniz Technical University, Department of Management Information Systems, 6080, Trabzon, Turkey*

[2]*Karadeniz Technical University, Department of Computer Engineering, 61080, Trabzon, Turkey*

• Received: 12.12.2024 • Accepted: 14.02.2025

Abstract

The software development industry is undergoing unprecedented growth and transformation, prompting a reevaluation of the skills and competencies necessary for success in this dynamic landscape. This study investigates the rapidly evolving skill requirements within the industry, driven by technological advancements. To achieve this, a Latent Dirichlet Allocation (LDA) framework is employed, enabling the identification of key topics from a dataset derived from online job postings. The analysis revealed 52 core topics pertinent to software development competencies. The findings reveal a significant emphasis on both technical domain knowledge and programming skills, with particular attention to modern programming languages such as Java, Python, and JavaScript. Moreover, non-technical skills, including communication, teamwork, and critical thinking, are underscored as vital competencies in today's collaborative software development environments. These insights emphasize the necessity for software developers to cultivate a diverse skill set to adapt to current and future industry demands. This work serves as a crucial reference for understanding the present and future skill requirements in the software development field, providing valuable guidance for developers, employers, and educational institutions.

Keywords: Competency analysis, Skill requirements, Software development skills, Topic modeling

Öz

Yazılım geliştirme sektörü önemli bir büyüme ve dönüşümden geçiyor ve bu dinamik ortamda başarı için gerekli becerilerin ve yeterliliklerin yeniden değerlendirilmesi gerekiyor. Bu çalışma, teknolojik gelişmelerin yönlendirdiği sektördeki hızla değişen beceri gereksinimlerini araştırıyor. Bunu başarmak için, çevrimiçi iş ilanlarından türetilen bir veri setinden temel konuların belirlenmesini sağlayan bir Gizli Dirichlet Tahsisi (Latent Dirichlet Allocation) çerçevesi kullanılıyor. Gerçekleştirilen analiz, yazılım geliştirme yetkinliklerine özgü 52 temel beceriyi ortaya çıkarmıştır. Bulgular, Java, Python ve JavaScript gibi modern programlama dillerine özel dikkat gösterilerek hem teknik alan bilgisine hem de programlama becerilerinin önemine vurgu yapmıştır. Dahası, iletişim, ekip çalışması ve eleştirel düşünme gibi teknik olmayan beceriler, günümüzün işbirlikçi yazılım geliştirme ortamlarında çok önemli yetkinlikler ortaya çıkmıştır. Bu içgörüler, yazılım geliştiricilerinin mevcut ve gelecekteki endüstri taleplerine uyum sağlamak için çeşitli bir beceri seti geliştirmeleri gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu çalışma yazılım geliştirme alanındaki mevcut ve gelecekteki beceri gereksinimlerini anlamak için önemli bir referans görevi görerek geliştiriciler, işverenler ve eğitim kurumları için değerli rehberlik sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: *Beceri gereksinimleri, Konu modelleme, Yazılım geliştirme becerileri, Yetkinlik analizi*

*Fatih GÜRCAN; fgurcan@ktu.edu.tr

1. Introduction

The software industry has undergone significant transformation in recent years due to rapidly evolving technologies and increasing competition. Modern software development processes now require a multidisciplinary skill set that extends beyond technical knowledge and expertise. In this dynamic environment, software developers must not only enhance their technical proficiency but also develop competencies in areas such as analytical thinking, problem-solving, teamwork, and communication. As technology advances, the demand for software development professionals is rapidly changing, with evolving needs for programming languages and software development tools (Aken et al., 2010; Debortoli et al., 2014; Gurcan, 2023a). In this context, understanding the latest trends in the software industry and identifying the skills and knowledge required to meet these demands is crucial for both employers shaping the sector and developers advancing their careers (Gurcan & Cagiltay, 2019).

Existing studies indicate that skill requirements in the software development field are evolving rapidly, and the competencies needed by software professionals continue to expand (Aken et al., 2010; Thomas et al., 2014; Terblanche & Wongthongtham, 2015; Chen et al., 2016; Vayansky & Kumar, 2020). A series of studies have highlighted that with the increasing pace of technological innovations, developers need more than just technical knowledge; they also require soft skills such as analytical thinking, problem-solving, and teamwork (Aken et al., 2010; Moreno et al., 2012; Debortoli et al., 2014; Gurcan & Cagiltay, 2019). Furthermore, as software projects become more complex, multiple studies have addressed the need for developers to be proficient in various programming languages and to quickly adapt to new tools (Moreno et al., 2012; Terblanche & Wongthongtham, 2015; Gurcan & Cagiltay, 2019). Probabilistic topic modeling techniques are frequently employed to analyze these dynamic industrial skill requirements and to identify the expertise demanded of software developers by examining large datasets from online job postings (Gurcan & Kose, 2017; De Mauro et al., 2018; Gurcan & Cagiltay, 2019). In these studies, methods such as Latent Dirichlet Allocation (LDA) help uncover hidden topics in text, revealing which skills are in greater demand and which techniques are gaining importance in the industry (Blei et al., 2003; Blei, 2012). Particularly, changes in next-generation programming languages, software development tools, and methodologies can be better understood through these analyses, aiding developers in planning their careers (Barua et al., 2014; De Mauro et al., 2018; Gurcan, 2023a).

This paper presents an analysis aimed at understanding the impact of technological transformation and innovation in the software development industry on the workforce, specifically focusing on the current demands for software development expertise. The primary goal of the study is to identify the expert domains, technical skills, competencies, and the necessary tools that form the foundation of the software development process in continually evolving environments. Accordingly, a comprehensive analysis was conducted on a large dataset of online job postings for software developers using the probabilistic topic modeling method based on LDA (Latent Dirichlet Allocation). Probabilistic topic modeling is a powerful tool for discovering hidden semantic structures in large datasets. In this study, the text data gathered from online job postings was analyzed using the LDA algorithm to uncover the most relevant knowledge and skills related to software development expertise. The 52 core topics identified were categorized into domains of expertise and technical knowledge requirements to highlight current trends in the software industry. Thus, the crucial knowledge and skills for software development processes were classified into four main competency areas: technical knowledge and skills (23%), software development and programming skills (52%), analytical and logical skills (12%), and non-technical skills (13%).

The findings demonstrate that the knowledge and skills required for software developers span a broad spectrum, with these trends becoming increasingly interdisciplinary. In particular, the importance of non-technical skills such as problem-solving abilities, teamwork, communication skills, and leadership, alongside technical proficiency, has been emphasized. In this context, software developers must not only possess coding skills but also be capable of collaborating effectively, working within teams, and making strategic decisions. The results presented in this paper indicate that the competencies required in software development processes have become multifaceted, and the development of these skills is critical for success in the industry. The findings provide a valuable guide for software professionals, helping them adapt to changes in the sector and shape their career development accordingly. This study contributes to identifying new trends in the software industry, enabling professionals to acquire the knowledge and skills needed for future demands. Additionally,

by offering a taxonomy of both technical and non-technical skills in demand, it serves as a useful resource for educational institutions and employers.

2. Material and methods

The architecture of the study involves the stages of semantic analysis using an LDA-based topic modeling approach on a text-based qualitative dataset. In the first stage, an experimental dataset was created using data obtained from online job platforms. Subsequently, preprocessing steps were applied to the dataset to reduce dimensionality and enhance the accuracy of the analysis. In the next stage, the qualitative dataset was converted into a Document-Term Matrix (DTM) to enable numerical analyses. Following this step, a semantic analysis based on an LDA-based probabilistic topic modeling approach was performed on the DTM to uncover latent semantic structures. The topics derived from the experimental analysis were then discussed in terms of their semantic relevance, and the experimental analysis was reconfigured with different parameters until the desired level of semantic coherence was achieved. In the final stage, the results and interpretations derived from the analysis were presented and discussed in light of similar studies.

2.1. Data collection

In today's technological environment, online job platforms are widely used by both employers and employees (Debortoli et al., 2014; Gurcan & Cagiltay, 2019). These platforms serve as essential communication tools facilitating interactions between employers and job seekers (Gurcan & Cagiltay, 2019). As part of this study, several online job platforms were examined to determine a suitable data source. Two important criteria were considered in selecting the data source for the experimental analysis: first, the selected platform needed to be focused heavily on software development roles, and second, it needed to be a global platform featuring job postings for software development roles across different countries.

Considering these criteria, Stack Overflow's job platform (Stack Overflow Developer Jobs) was chosen as the data source (Stack Overflow, 2024). The job postings on Stack Overflow are specifically focused on software development roles (developer jobs) (Barua et al., 2014; Stack Overflow, 2024). Besides being a significant platform in the software development industry, Stack Overflow is also an important knowledge-sharing platform where developers interact through a question-and-answer format (Gurcan, 2023a). In this respect, Stack Overflow holds strategic importance for software developers (Barua et al., 2014; Stack Overflow, 2024). The dataset created for this study consists of 4,128 job postings focused on software development. Each record in the dataset typically includes information such as job title, date, location, job description, required knowledge, skills, qualifications, and competencies.

2.2. Data preprocessing

Text preprocessing is a critical step that directly impacts the performance of text-based data analyses (Gurcan, 2023b). The preprocessing procedures applied in this study included tokenization, text cleaning, removal of incomplete or irrelevant text entries, elimination of stop words, and frequency reduction, among other sequential processes (Gurcan, 2023b; Wu et al., 2024). Depending on the type of data being processed and the nature of the experimental analysis, preprocessing steps may vary. Given the high technical jargon content of the texts in this study's dataset, stemming was not applied to these texts (Chen et al., 2016).

Following these steps, terms with a frequency of fewer than five occurrences (i.e., words with negligible semantic contribution) were removed from the word space, further reducing the dimensionality of the dataset (Chen et al., 2016). This completed the preprocessing phase. The resulting word vectors for each text in the dataset were then compiled into a DTM (Burkhardt & Kramer, 2019). Once the preprocessing phase was completed, each text in the dataset was represented as a word vector. In the vector space model used to model the distribution of terms across documents, all numerical analyses were performed on these word vectors (Feng et al., 2022). To model the entire dataset, the term vectors for each document were combined into a single DTM.

2.3. Topic modeling analysis using LDA

Probabilistic topic modeling is a generative and probabilistic approach used to model the semantic structure of text documents within large collections and uncover latent semantic patterns. Text documents contain latent semantic structures known as topics (Blei et al., 2003; Blei, 2012). Each topic is characterized by a probability distribution over a fixed vocabulary of words. According to the probabilistic topic modeling approach, a text document can contain multiple topics with varying proportions (Barua et al., 2014; Gurcan & Cagiltay, 2019). The determination of these topic proportions forms the core of the probabilistic topic modeling approach.

In this study, we chose the Latent Dirichlet Allocation (LDA) method for topic modeling due to its proven effectiveness in discovering latent topics within large text datasets. LDA is widely used in text mining and provides a balance between interpretability and computational efficiency, making it suitable for our dataset (Blei et al., 2003; Blei, 2012). Although deep learning-based methods such as BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) and GPT (Generative Pretrained Transformers) have shown significant advancements in natural language processing, offering more contextual understanding, we focused on LDA for its established suitability in topic modeling. These alternative methods could be explored in future research for a more detailed contextual analysis and to provide a comparison of their effectiveness in this domain (Barua et al., 2014; Gurcan & Cagiltay, 2019).

LDA (Latent Dirichlet Allocation) is an unsupervised learning method that can be effectively applied to large text collections without requiring a training set. Since this method does not require prior learning, large textual datasets can be analyzed in a short time (Xu et al., 2022; Gurcan, 2023b). The LDA probabilistic topic modeling algorithm involves a series of matrix operations performed on the DTM to reveal semantic relationships between words (Egger & Yu, 2022). In this process, words with high co-occurrence rates are grouped, with each word group representing a “topic”. The process of extracting semantic topics from documents using the LDA approach is illustrated in Figure 1.

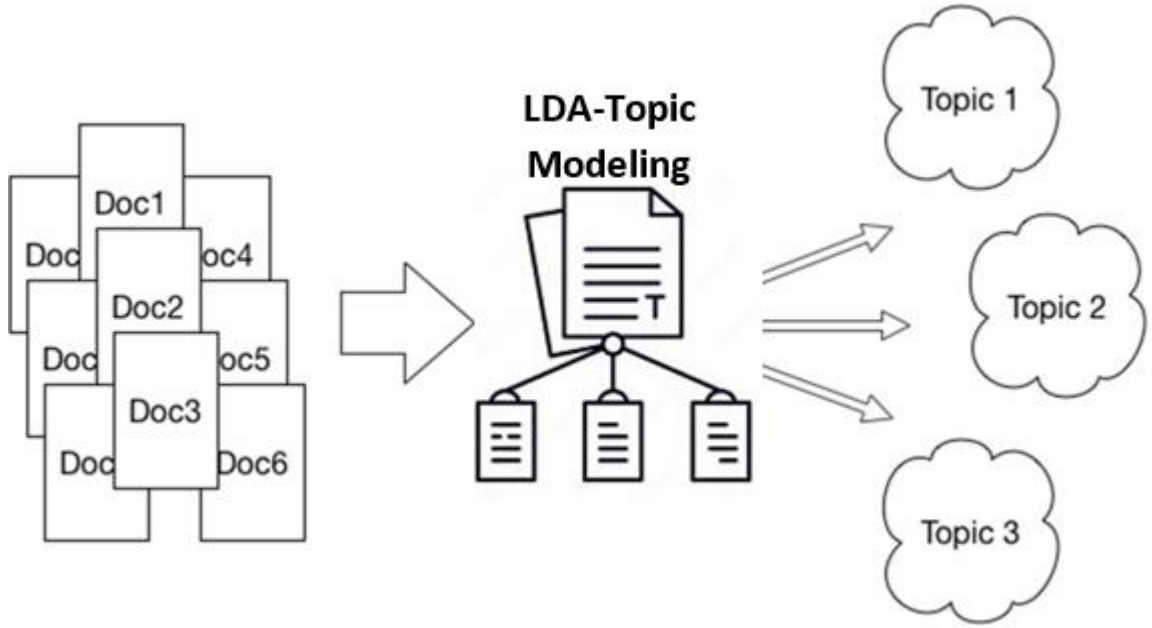


Figure 1. Extracting topics from documents using LDA

In LDA algorithms, Gibbs sampling is commonly used for parameter estimation. For the experimental analyses in this study, the MALLET tool (McCallum, 2002), which implements a scalable version of the LDA model based on Gibbs sampling, was used. MALLET, widely utilized in topic modeling applications, is a fast and scalable Java-based tool that employs Gibbs sampling for topic modeling (Blei et al., 2003). In the analysis performed using MALLET, the LDA algorithm was applied to the dataset with 1,000 iterations of Gibbs sampling, resulting in the identification of 52 meaningful topics. The number of topics for the LDA model was determined using coherence scores, which measure the semantic similarity of words within topics. Through an iterative evaluation process, we identified 52 topics as the optimal number, balancing coherence and interpretability.

3. Results and discussion

In this article, an experimental study was conducted using an LDA-based probabilistic topic modeling approach to identify expert knowledge and skills related to emerging trends in software development. The analysis was performed on a dataset derived from job postings for software developers. As a result of the topic modeling analysis on the experimental dataset, 52 topics were identified, revealing the most significant knowledge and skills associated with software development trends. These 52 topics, which represent trends in software development expertise, were organized into a taxonomy related to core disciplines and areas of software development expertise. Through this process, four main competency areas for expert knowledge and skills in software development trends were identified. Subsequently, the identified 52 topics were assigned to these areas based on their content, considering the keywords and percentage distributions within each topic. The percentage distribution of topics across the four main competency areas is as follows: technical knowledge and skills (23%), software development and programming skills (52%), analytical and logical skills (12%), and non-technical skills (13%). Additionally, the distribution of topics across these competency areas in terms of topic count is as follows: 13 topics for technical knowledge and skills, 22 topics for software development and programming skills, 10 topics for analytical and logical skills, and 7 topics for non-technical skills.

At first glance, the findings indicate that the knowledge and skills required in the software development industry encompass a broad range of disciplines. According to the results, software development expertise demands not only comprehensive software development skills but also technical domain knowledge, analytical and logical abilities, and individual (non-technical) skills such as communication. To provide a more detailed understanding of the knowledge and skills associated with emerging software development trends, and to further elaborate on the identified topics and competency areas, the findings are presented under four subheadings.

3.1. Technical knowledge and skills

Among the 52 identified topics, 13 were observed to fall under the “technical knowledge and skills” category, with a total frequency percentage of 23%. These 13 topics, assigned to the technical knowledge and skills area, are presented in Figure 2 along with their assigned topic names and percentage values. The findings related to technical knowledge and skills emphasize the theoretical knowledge areas that are essential for software expertise.

The most prominent topic is “Educational requirements” (4.90%), which indicates the strong emphasis on formal qualifications and foundational knowledge as key components in the competency framework. Following this, “Database knowledge” (2.70%) and “Deep domain knowledge” (2.60%) are highly emphasized, reflecting the importance of expertise in managing structured data and specialized knowledge in specific domains. “Software architectures” (2.10%) underscores the significance of designing robust and scalable systems, while “Software engineering knowledge” (1.80%) and “Software development processes” (1.70%) highlight the need for understanding software lifecycle management and best practices.

Topics such as “Big data processing” (1.60%), “Scaling systems” (1.20%), and “Cloud-based systems” (1.20%) represent emerging technical areas, focusing on the ability to handle large-scale data and scalable infrastructures. These reflect the growing reliance on cloud technologies and distributed systems in modern applications. Lesser-emphasized topics, including “Business intelligence” (0.90%), “Artificial intelligence” (0.80%), “Data security and privacy” (0.80%), and “System administration” (0.70%), indicate specialized areas of interest that, while not as dominant, are still essential for specific roles and applications in the field.

Overall, Figure 2 demonstrates a balanced distribution of foundational and advanced competencies, with a clear focus on formal education, domain-specific expertise, and modern technical proficiencies. This distribution reflects the diverse skill set required for professionals to succeed in the evolving landscape of software engineering and technology. The results highlight that technical domain knowledge, such as database expertise, software engineering principles, and software architectures, remains a fundamental requirement for software professionals, emphasizing the theoretical foundation necessary for specialized roles in the industry.

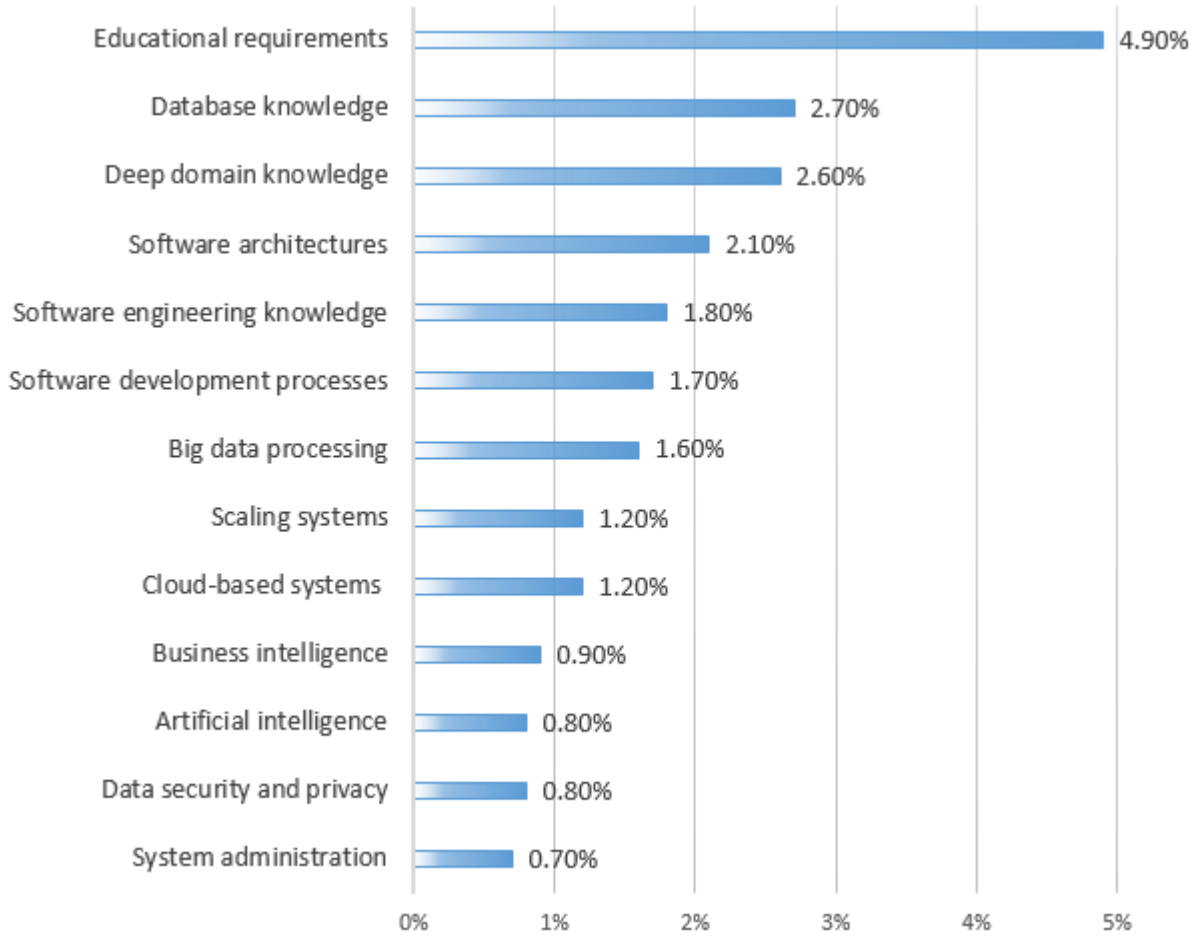


Figure 2. Topics and rates for technical knowledge and skills

The focus on higher education, particularly in areas like computer science and engineering, suggests that formal academic training continues to be highly valued, playing a crucial role in developing essential technical knowledge for software development. The identified trends indicate that technical domain knowledge forms the backbone of software expertise, with critical concepts such as software architectures and engineering methodologies being consistently demanded by employers in the field.

3.2. Software development and programming skills

Of the 52 topics identified in the analysis, 22 were categorized under the broad competency area of "software development and programming skills", which carried a significant 52% weight across the overall distribution. These 22 topics, detailed in Figure 3, are accompanied by their assigned topic names and corresponding percentage values. This breakdown provides a clear understanding of the thematic focus within this competency area, emphasizing its prominence in the software industry. The findings underline a critical emphasis on application development, programming, and coding expertise, as well as the specific knowledge areas required for success in the field of software development. Notably, new-generation scripting languages and leading programming languages such as Java, Python, and JavaScript stand out as the most emphasized qualifications. These findings highlight the importance of proficiency in versatile and widely used technologies, reinforcing their relevance in modern software development environments.

The most prominent topics include "Scripting programming languages" (4.70%), "Javascript frameworks" (4.40%), "Mobile development" (4.20%), "Application development" (4.10%), and "Web services development" (3.80%). These topics represent the core technical competencies demanded by the industry. "Scripting programming languages" and "Javascript frameworks" emphasize modern tools for front-end and back-end development, while "Mobile development" and "Web services development" highlight the growing need for scalable, cross-platform, and user-centric applications. Topics such as "Multi-platform development"

(3.40%), “Object-oriented programming” (3.20%), and “Java programming” (3.10%) reflect the importance of foundational programming principles and creating solutions compatible with diverse platforms.

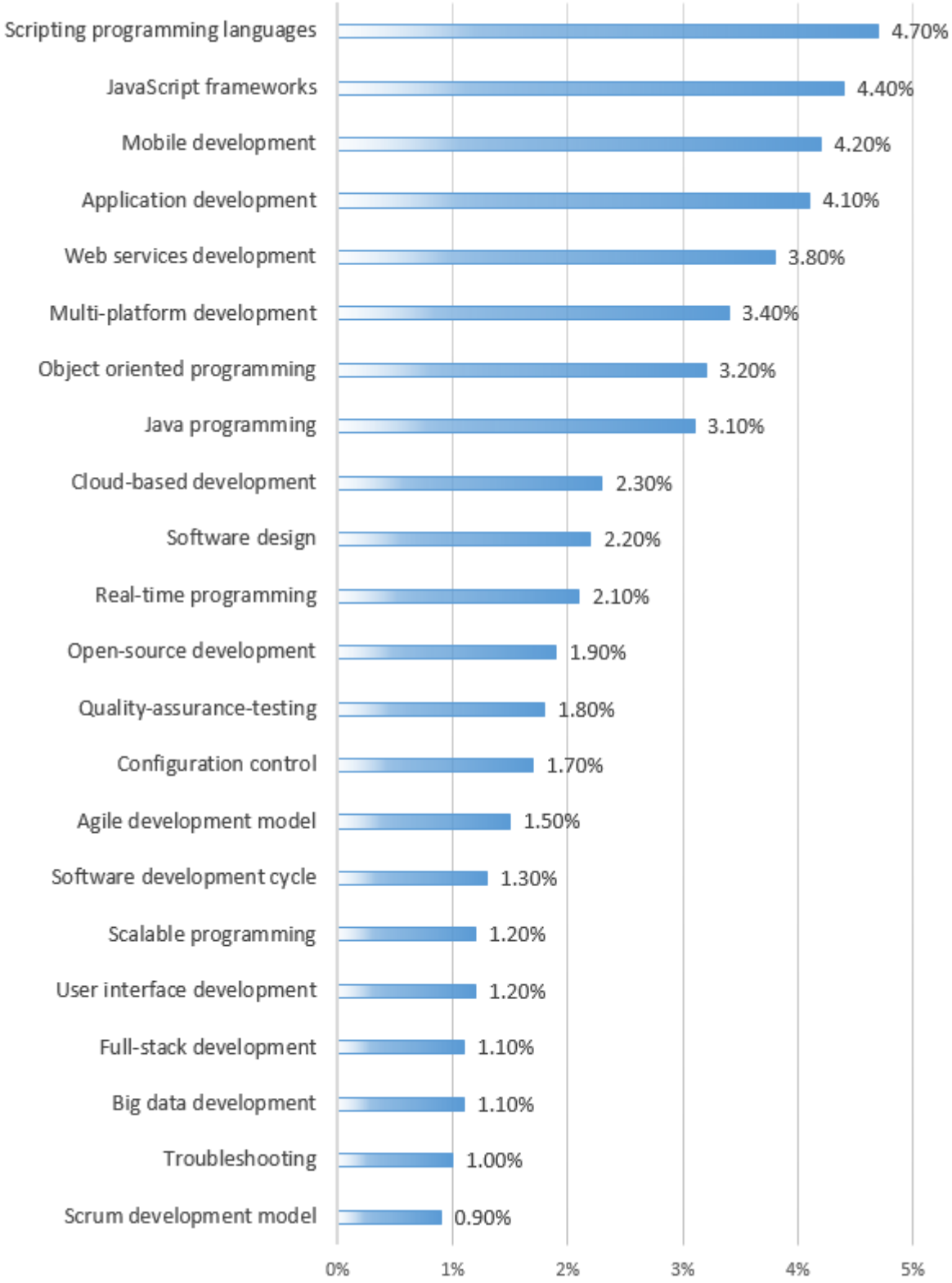


Figure 3. Topics and rates for software development and programming skills

Additionally, “Cloud-based development” (2.30%) and “Software design” (2.20%) emphasize the industry's reliance on cloud architectures and structured software systems. Certain topics, such as “Real-time programming” (2.10%) and “Open-source development” (1.90%), reflect specialized areas of expertise valuable in specific domains. The inclusion of “Quality assurance testing” (1.80%), “Configuration control”

(1.70%), and "Agile development model" (1.50%) highlights the importance of testing, effective project management, and iterative development processes. Emerging areas like "Big data development" (1.10%), "Full-stack development" (1.10%), and "Troubleshooting" (1.00%) indicate growing but less dominant demands for data-driven applications and end-to-end development. Similarly, "Scrum development model" (0.90%), while less frequently mentioned, reflects its ongoing relevance as a widely adopted project management methodology.

This distribution emphasizes a balanced focus on both core programming skills and modern development approaches. The higher weight assigned to topics such as "Scripting programming languages", "Javascript frameworks", and "Mobile development" aligns with current trends emphasizing application scalability, user experience, and adaptability to emerging technologies. Additionally, the combination of foundational programming principles (e.g., "Object-oriented programming") with specialized areas (e.g., "Real-time programming") reflects the diverse skill set required in software development today. Overall, the topics provides valuable insights into the technical competencies needed for professionals to remain competitive in the dynamic software industry. The findings emphasize that proficiency in programming, paired with an in-depth understanding of contemporary development methodologies, forms the backbone of technical expertise in software development. The ability to utilize scripting languages effectively, develop mobile and web applications, and implement modern programming frameworks is not only a testament to technical competence but also a crucial determinant of professional success in today's technology-driven landscape.

3.3. Analytical and logical skills

Among the 52 identified topics, ten were observed to fall under the category of "analytical and logical skills." The total percentage of these topics is 12%. These ten topics, assigned to the analytical and logical skills competency area, are presented in Figure 4, along with their assigned topic names and percentage values. The bar chart in Figure 4 presents the results of a topic analysis conducted on job postings, focusing on analytical and logical skills. The Figure highlights "Requirements analysis" as the most commonly mentioned topic, representing 2.20% of the analyzed postings. This suggests that employers place significant emphasis on understanding and defining project or business requirements, which forms the foundation for effective problem-solving and solution development.

"Data modeling and analysis" follows closely at 1.90%, underscoring the demand for professionals who can structure and interpret complex data sets to inform business decisions. Similarly, "Analytical background" (1.40%) ranks third, reflecting the high value placed on general analytical aptitude across industries. "Machine learning methods" (1.30%), "Problem-solving skills" (1.20%), and "Software metrics" (1.10%) demonstrate the growing importance of technical and quantitative competencies. These skills are particularly relevant in roles that involve leveraging technology and data to optimize processes and outcomes.

On the other hand, "Predictive analytics" (1.00%), while less frequent, still highlights the need for forward-looking insights in decision-making. Lower-ranked topics such as "Decision-making skills" (0.80%), "Business analytics" (0.70%), and "Real-time analytics" (0.40%) suggest a more specialized focus, likely relevant to specific roles or industries. This analysis reveals that job postings for analytical and logical skills prioritize foundational technical abilities, such as requirements gathering and data handling, while also emphasizing the importance of advanced techniques like machine learning and predictive analytics. However, competencies related to real-time decision-making and business-oriented analytics appear less commonly, potentially indicating niche demand or evolving trends in the job market.

These findings underscore the critical role of analytical and logical skills in shaping the modern workforce, particularly in software development processes. Employers prioritize candidates who not only exhibit strong logical reasoning and problem-solving capabilities but also possess expertise in leveraging data-driven tools and methodologies to tackle complex challenges effectively. Key competencies such as requirements analysis and data modeling emerge as foundational elements, reflecting their importance in addressing the multifaceted demands of modern projects. Furthermore, the ability to adapt to evolving technologies and collaborate within multidisciplinary teams has become increasingly essential. As industries continue to embrace digital transformation, the demand for professionals who can combine technical expertise with strategic thinking is likely to grow, further emphasizing the importance of these skills in shaping future career paths.

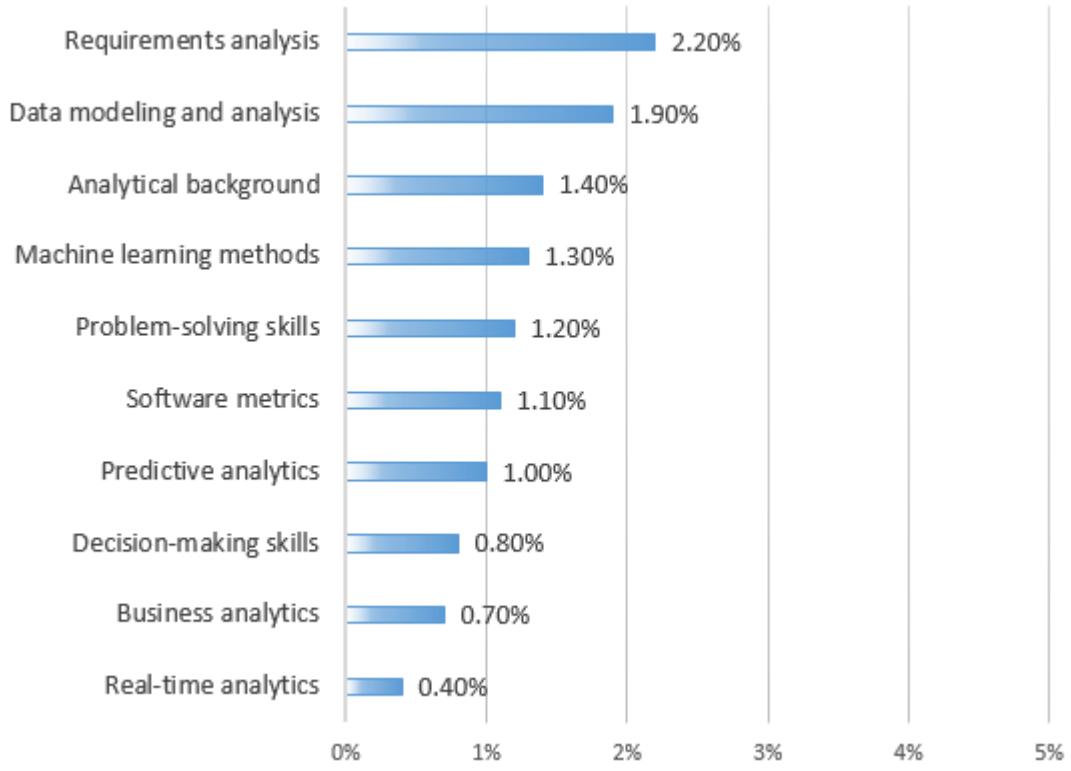


Figure 4. Topics and rates for analytical and logical skills

Additionally, skills like data visualization and various analytical methods are integral to enhancing software development workflows, ensuring precision and efficiency in decision-making. The emphasis on advanced techniques, including machine learning methods and predictive analytics, highlights the evolving nature of expertise required in contemporary software development. This shift demonstrates the growing need for professionals who can seamlessly integrate emerging technologies with traditional analytical competencies to meet the dynamic demands of today's industries.

3.4. Non-technical skills

It was discovered that seven of the 52 topics could possibly be classified as "non-technical skills". These topics make up 13% of the total. Figure 5 lists the seven topics in the non-technical skills competency category, along with the topic names and percentage values. The findings related to non-technical individual skills emphasize various personal competencies that are essential in software development roles, such as communication skills, work experience, teamwork, critical thinking, and creativity.

Figure 5 illustrates the distribution of key interpersonal and non-technical skills identified in job postings. The analysis reveals that "Communication skills" are the most emphasized, accounting for 5.10%, indicating their paramount importance across industries. Effective communication is often critical for collaboration, client interactions, and team coordination, making it a cornerstone of professional success. Following this, "Working experience" ranks second at 2.90%, highlighting employers' preference for candidates with practical, hands-on experience. This suggests that prior experience is highly valued, likely reflecting the importance of applied knowledge and familiarity with workplace dynamics. "Teamwork skills" (1.80%) emerge as the third most mentioned topic, reinforcing the significance of collaborative abilities in achieving organizational goals. This is complemented by "Critical thinking and creativity" (1.10%), which points to a growing demand for innovative problem-solving and strategic thinking in the workplace.

Other notable mentions include "Project management" (0.80%), "Motivation and engagement" (0.70%), and "Organizational skills" (0.60%), indicating that while these skills are less frequently highlighted, they remain essential for certain roles, particularly in leadership and operational contexts. This analysis highlights a holistic approach to skill requirements in job postings, specifically in the software development domain, where interpersonal, creative, and professional competencies intersect to address the rapidly evolving demands of the

field. Among these, communication skills are identified as the backbone of effective collaboration in software development. In this highly interdisciplinary domain, developers must articulate complex technical concepts to both technical and non-technical stakeholders, ensuring that requirements are clearly understood and solutions are aligned with organizational goals. Strong communication fosters teamwork, reduces misunderstandings during critical development stages, and enhances project outcomes. Furthermore, in agile and cross-functional development environments, the ability to adapt communication styles to diverse team members and contexts is essential for success.

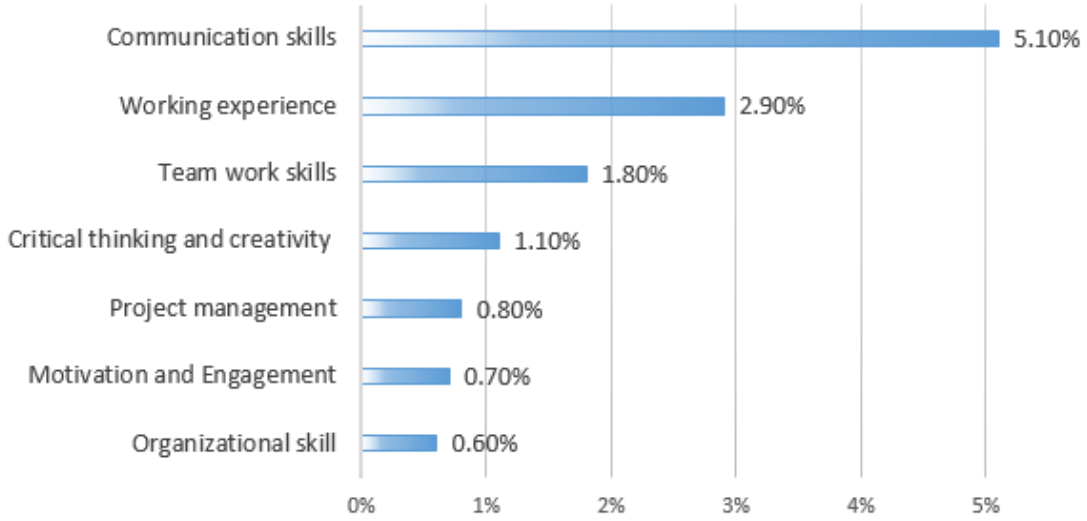


Figure 5. Topics and rates for non-technical skills

Equally critical in software development are critical thinking and creativity, which drive innovation and adaptability. Critical thinking enables software professionals to evaluate problems systematically, analyze vast amounts of data, and identify optimal solutions for highly complex and technical challenges. Whether debugging code, optimizing algorithms, or designing system architectures, critical thinking ensures precision and efficiency, helping teams deliver reliable and scalable software solutions. On the other hand, creativity plays an essential role in fostering innovation within the development lifecycle. It allows developers to think outside conventional frameworks, leading to the creation of groundbreaking software, novel user experiences, and enhanced functionality. Creativity is not limited to front-end or user-facing design; it also drives innovation in areas such as system optimization, automation, and backend efficiency. In an industry characterized by continuous technological advancements, creativity empowers teams to remain competitive by devising unique and forward-thinking solutions.

Together, communication, critical thinking, and creativity form the cornerstone of success in software development. Their interconnected nature ensures that professionals can navigate the multifaceted challenges of the field, effectively collaborate with multidisciplinary teams, and deliver innovative, user-centered solutions. As software development becomes increasingly integral to the success of industries worldwide, these skills are not just desirable—they are indispensable for driving progress, meeting complex project demands, and advancing organizational objectives in this dynamic and competitive landscape.

4. Conclusions

In this study, the rapidly changing dynamics of the software industry and the evolving skill requirements associated with it have been comprehensively addressed. Particularly in recent years, the rapid advancement of technology has transformed the competencies required in software development processes, giving rise to a multidisciplinary framework. Using the LDA-based probabilistic topic modeling method, analysis conducted on a large dataset obtained from online job postings revealed that software developers increasingly require not only technical skills but also soft skills such as analytical thinking, problem-solving, teamwork, communication, and leadership. The findings emphasize the critical role of communication skills, which are foundational in enabling effective collaboration across diverse teams, ensuring clarity in requirements analysis, and facilitating productive exchanges between technical and non-technical stakeholders. Similarly, critical

thinking and creativity have emerged as indispensable for tackling the complex challenges of software development, driving innovation, and optimizing solutions. These skills complement technical expertise by empowering developers to analyze problems strategically and approach them with novel perspectives, leading to better software solutions and advancements in system design. This comprehensive skill set, blending technical, programming, analytical, and interpersonal competencies, is crucial for addressing the diverse and complex challenges of the software development field. Both academic institutions and industry leaders should recognize the importance of nurturing this diverse skill set to ensure that developers are well-prepared for the future demands of the profession.

Although the findings of this study provide significant contributions, certain limitations exist. Firstly, the dataset was obtained solely from online job postings, which may not fully reflect the general skill demands of the entire software industry. Additionally, the LDA-based probabilistic topic modeling method may not entirely capture the contextual depth of the topics while revealing latent structures in the texts, potentially overlooking some essential skills. Finally, the dataset used in the analysis pertains to a specific time period, making it challenging to fully capture the continuously evolving trends in software development. Therefore, further studies conducted with more comprehensive and up-to-date data would enhance the validity of the findings. Future research incorporating broader and more updated datasets will enhance the understanding of skill requirements and support educational institutions, employers, and software developers in adapting to the evolving demands of the industry. With further refinements, including expanding the dataset to incorporate additional sources such as LinkedIn, Glassdoor, and Indeed, and enhancing the discussion of specific trends, this work has the potential to become a leading contribution in its field. Additionally, the analysis could be expanded by integrating deep learning-based NLP methods, such as BERT or GPT, to deepen the analysis and enhance its granularity.

This study serves as a critical reference for understanding the current and future skill requirements in the software industry. It offers valuable guidance to software developers in planning their careers by identifying in-demand skills and knowledge areas. Employers can use these findings to better define workforce needs, optimize employee selection processes, and design targeted training programs for skill development. For educational institutions, the study provides actionable insights for updating curricula and developing training programs that align with industry demands, ensuring that graduates are equipped with relevant competencies. Additionally, the findings highlight emerging trends in software development, enabling individuals and organizations to adapt to the evolving landscape of the industry. By addressing the unique needs of these key stakeholders, the study acts as a strategic guide to foster growth, innovation, and alignment with next-generation trends in software development.

Acknowledgement

This study is derived from the doctoral thesis by Fatih Gurcan titled “Determination of Expert Knowledge and Skills for New Generation Software Development Trends Using a Probabilistic Topic Modeling Approach”, conducted in the Department of Computer Engineering at the Institute of Science, Karadeniz Technical University.

Author contribution

Fatih GURCAN – Responsible for conceptualization, methodology design, data collection, formal analysis, writing, reviewing, and editing. Also, he contributed to data interpretation, statistical analysis, task coordination, and validation of the findings. Cemal KOSE – Provided conceptual guidance and acted as an advisor, contributed to software development, data visualization, curation, formal analysis, and assisted with writing, reviewing, and editing.

Declaration of ethical code

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethics committee approval and/or legal-special permission.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

Aken, A., Litecky, C., Ahmad, A., & Nelson, J. (2010). Mining for computing jobs. *IEEE Software*, *27*(1), 78–85.

Barua, A., Thomas, S. W., & Hassan, A. E. (2014). What are developers talking about? An analysis of topics and trends in Stack Overflow. *Empirical Software Engineering*. https://doi.org/10.1007/s10664-012-9231-y

Blei, D. M. (2012). Probabilistic topic models. *Communications of the ACM*, *55*(4), 77–84.

Blei, D. M., Ng, A. Y., & Jordan, M. I. (2003). Latent Dirichlet allocation. *Journal of Machine Learning Research*, *3*(4–5), 993–1022. https://doi.org/10.1017/9781009218245.012

Burkhardt, S., & Kramer, S. (2019). Decoupling sparsity and smoothness in the dirichlet variational autoencoder topic model. *Journal of Machine Learning Research*, *20*.

Chen, T. H., Thomas, S. W., & Hassan, A. E. (2016). A survey on the use of topic models when mining software repositories. *Empirical Software Engineering*, *21*(5), 1843–1919. https://doi.org/10.1007/s10664-015-9402-8

De Mauro, A., Greco, M., Grimaldi, M., & Ritala, P. (2018). Human resources for Big Data professions: A systematic classification of job roles and required skill sets. *Information Processing and Management*, *54*(5), 807–817. https://doi.org/10.1016/j.ipm.2017.05.004

Debortoli, S., Müller, O., & Vom Brocke, J. (2014). Comparing business intelligence and big data skills: A text mining study using job advertisements. *Business and Information Systems Engineering*, *6*(5), 289–300. https://doi.org/10.1007/s12599-014-0344-2

Egger, R., & Yu, J. (2022). A Topic Modeling Comparison Between LDA, NMF, Top2Vec, and BERTopic to Demystify Twitter Posts. *Frontiers in Sociology*, *7*. https://doi.org/10.3389/fsoc.2022.886498

Feng, J., Zhang, Z., Ding, C., Rao, Y., Xie, H., & Wang, F. L. (2022). Context reinforced neural topic modeling over short texts. *Information Sciences*, *607*, 79–91. https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.05.098

Gurcan, F. (2023a). Identification of mobile development issues using semantic topic modeling of Stack Overflow posts. *PeerJ Computer Science*, *9*, 1–28. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1658

Gurcan, F. (2023b). What issues are data scientists talking about? Identification of current data science issues using semantic content analysis of Q&A communities. *PeerJ Computer Science*, *9*, e1361. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1361

Gurcan, F., & Cagiltay, N. E. (2019). Big Data Software Engineering: Analysis of Knowledge Domains and Skill Sets Using LDA-Based Topic Modeling. *IEEE Access*, *7*, 82541–82552. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924075

Gurcan, F., & Kose, C. (2017). Analysis of software engineering industry needs and trends: Implications for education. *International Journal of Engineering Education*, *33*(4), 1361–1368.

McCallum, A. K. (2002). MALLET: A Machine Learning for Language Toolkit. In *Http://Mallet.Cs.Umass.Edu*. http://mallet.cs.umass.edu

Moreno, A. M., Sanchez-Segura, M. I., Medina-Dominguez, F., & Carvajal, L. (2012). Balancing software engineering education and industrial needs. *Journal of Systems and Software*, *85*(7), 1607–1620. https://doi.org/10.1016/j.jss.2012.01.060

Stack Overflow. (2024). *Stack Overflow Developer Jobs*. https://stackoverflow.com/jobs

Terblanche, C., & Wongthongtham, P. (2015). Ontology-based employer demand management. *Software: Practice and Experience*. https://doi.org/10.1002/spe.2319

Thomas, S. W., Adams, B., Hassan, A. E., & Blostein, D. (2014). Studying software evolution using topic models. *Science of Computer Programming*, *80*(PART B), 457–479. https://doi.org/10.1016/j.scico.2012.08.003

Vayansky, I., & Kumar, S. A. P. (2020). A review of topic modeling methods. *Information Systems*, *94*. https://doi.org/10.1016/j.is.2020.101582

Wu, X., Nguyen, T., & Luu, A. T. (2024). A survey on neural topic models: methods, applications, and challenges. *Artificial Intelligence Review*, *57*(2). https://doi.org/10.1007/s10462-023-10661-7

Xu, K., Lu, X., Li, Y. fang, Wu, T., Qi, G., Ye, N., Wang, D., & Zhou, Z. (2022). Neural Topic Modeling with Deep Mutual Information Estimation. *Big Data Research*, *30*. https://doi.org/10.1016/j.bdr.2022.100344

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 210-220 doi: 10.17714/gumusfenbil.1601843 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Gümüşhane ili içme suyunun spektrofotometrik analizi

Spectrophotometric analysis of Gümüşhane province drinking water

Ali KAYA*

Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane

• Geliş tarihi / *Received*: 15.12.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 14.02.2025

Öz

Su dünya üzerinde canlıların temel yaşam kaynaklarından biridir. Yıllar geçtikçe suya olan ihtiyaç artmakta ve temiz su kaynaklarına ulaşmak zorlaşmaktadır. Bu araştırmanın amacı Gümüşhane il merkezine su sağlayacak kaynaklardan biri olan Bahçecik barajı ve il merkezinde kullanılmakta olan içme suyunun nadir elementler açısından inceleyebilmektir. Araştırmada Spektrofotometrik analiz tekniği kullanılmıştır. Alandan araştırma şartlarına uygun olarak numuneler toplanmıştır. Bu numunelerin analizi yapılarak içme suyunun pH değeri, İletkenliği, içerdiği Alüminyum, Demir, Nitrit, Amonyum, Bakır, Sülfat, Nitrat, Potasyum ve Brom elementlerinin miktarları belirlenmiştir. Bu değerler Türk Standartları Enstitüsünün ve Dünya Sağlık Örgütünün belirlediği standart değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar üzerinde gerekli değerlendirilmeler yapılarak önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gümüşhane, İçme suyu, Spektrofotometrik analiz

Abstract

Water is one of the basic sources of life for living things on earth. As the years go by, the need for water increases and it becomes more difficult to reach clean water sources. This research aims to examine Bahçecik Dam, one of the sources that will provide water to Gümüşhane city center, and the drinking water used in the city center in terms of rare elements. The spectrophotometric analysis technique was used in the research. Samples were collected from the area following the research conditions. The pH value, conductivity, and amounts of aluminum, iron, nitrite, ammonium, copper, sulfate, nitrate, potassium, and bromine elements in the drinking water were determined by analyzing these samples. These values were compared with the standard values determined by the Turkish Standards Institute and the World Health Organization. Necessary evaluations were made on the results and suggestions were made.

Keywords*: Drinking water, Gümüşhane, Spectrophotometric analysis*

*Ali KAYA; alikaya@gumushane.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Su canlıların temel yaşam kaynaklarından biridir. Temiz ve sağlıklı suya ulaşmak canlıların hayatta kalabilmeleri için gereklidir. İnsan yaşamı için gerekli olan yeryüzünde tatlı suyun sınırlı olması, insan nüfusunun artması ve temiz su kaynaklarının kirletilmesi ve iklim değişikliğinden dolayı ekosistemdeki değişim sonucu bazı bölgelerin aşırı yağış alırken bazılarının yeterli yağış alamamasından dolayı su kaynakları azalmakta, yeterli suya ulaşamayan toplumların oranı giderek artmaktadır (Kart, 2021).

Şu an dünyadaki nüfusun yaklaşık 700 milyonu temiz içme suyuna ulaşamamaktadır (Oğuz, 2015). Dünyamızda mevcut su kaynaklarının %97'lık kısmı tuzlu su, %3 lük kısmı ise tatlı sudur. Tatlı suların %68'inden fazlası buzullardadır. Tatlı suyların yaklaşık %30'u ise yeraltı sularından oluşmaktadır. İnsanlar tarafından kullanılan su kaynaklarının çoğu nehirler ve göllerden elde edilen sulardır. Bunlar toplam suyun %0.0142'sini oluşturmaktadır (Arslan & Demir, 2011; Anonymous, 2006). Bir kişinin günlük su ihtiyacı en az ortalama 1.5 L olduğu belirtilmektedir (Boysan & Şengörür, 2001). Dünya nüfusu 8 milyar olduğunu düşünülürse günlük su tüketimi yaklaşık 12 milyar litredir. İnsanların doğal hakkı olan bu miktarda suyun sağlanmasında zorluklar yaşanmaktadır.

Tatlı su kaynaklarının yetersiz olduğu yerlerde buzullar ve tuzlu deniz suyundan tatlı su elde etme çalışmaları uzun yıllar öncesinden yürütülmektedir. Bu yöntemlerin çok pahalı olmasından dolayı tercih edilmemektedirler. Bundan dolayı yeraltı sularına olan talep gittikçe artmaktadır. Bu durum yeraltı su tablasının seviyesi düşürmektedir. Böylece, kaliteli ve temiz su bulabilmekte oldukça güçleşmektedir.

19. yüzyıl ve 20. yüzyılın başlarına kadar içme suyu kalitesi kolera, tifo ve paratifo gibi bulaşıcı hastalıklara yol açan patojenler açısından ele alınıyordu. Ancak, 1950 ve 1960'larda, bazı metallerin toksik etkilerinin ortaya çıkarılması, endüstri ve tarımda organik kimyasalların üretilmesi ve kullanımının artması nedeniyle, içme suyu olarak kullanılan suların kimyasal kirleticiler açısından kontrol edilmesine başlanmıştır (Oğuz, 2015). Organik kimyasalların suya karışmasıyla insanlar üzerinde oluşturabileceği toksik etkiler ya da bunların kanserojen özellikleri de dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. Kimyasal kirleticilerin etkileri 1 ile 10 yıllık sürede ortaya çıktığı belirtilmektedir (Gray, 2008). Bu nedenle daha önce kullanılan mikrobiyolojik inceleme yerine, içme suyu kalitesinin fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerini de içine alan bir yaklaşım kullanılmaya başlanmıştır.

Kimyasal olarak iki hidrojen ve bir oksijen atomumun birleşiminden oluşan su yeryüzünde elde edildiği kaynaklarda bu saflıkta değildir. Kullandığımız sular farklı kaynaklardan elde edildiği için içerdikleri elementler ve mineraller de birbirinden farklılıdır. Genellikle içme ve kullanma suları klorür, alüminyum, nitrat, potasyum, demir, magnezyum, sodyum, klor ve florür elementlerin içerebilmektedirler. Bunların su içerisinde belli oranlarda bulunması suyun tadını değiştirebilmektedir. Benzer şekilde suyun pH dereceleri de suyun kaynağına bağlı olarak değişmektedir. Su içinde bulunan zengin mineraller insan sağlığına önemli katkılarda bulunmaktadır. Su içerisinde bulunan 5 mineral lezzet anlamında bireylerin damağında tada göre ayrışmaktadır (URL 1). Kalsiyum; bireylerin kemik sağlığına oldukça fayda sağlamaktadır. Su içinde bulunan magnezyum minerali bireyler için tam bir enerji kaynağıdır. Potasyum, vücudun elektrolit dengesini sağlamanın yanı sıra tansiyonu da dengeleyici özelliğe sahiptir. Flor diş ve kemik sağlığı için önemlidir. Suda yer alan sodyum elementi vücut ısısının dengelenmesi ve elektrolit dengesinin sağlanmasında rol alır. İçme suyunun kalitesi içerisinde bulunan bu minerallerin oranı ile belirlenmektedir. Bu oranlar insan vücuduna hangi miktarlarda gerekli olduğu, fazla olduğunda ne tür zararları olabileceği açılarından incelenmiş ve kaliteli su için belli standartlar belirlenmiştir. Çünkü su içerisinde yer alan herhangi bir elementin veya mineralin belli miktardan fazlası veya azlığı insan sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir. Örneğin, su içerisinde yer alan florür düşük konsantrasyonlar da diş ve kemik sağlığı için yararlı iken, yüksek konsantrasyonlarda (0.9 – 1.2 mg/L) diş yapısının ve daha yüksek konsantrasyonlarda ise (3 - 6 mg/L) iskelet yapısının bozulmasına neden olabilmektedir (Küçükeşmen & Sönmez, 2008).

İçme suyu kalite standardının belirlenmesinde genellikle pH, sertlik, ağır metaller, mikrobiyolojik kontaminantlar ve çözünmüş oksijen gibi parametreler öncelik taşımaktadır. İnsanların kullandıkları sular birçok zararlı bileşen içerebileceği bilinmesine rağmen içme ve kullanma suları için dünya genelinde tanınan ve kabul edilen uluslararası bir standartlar oluşturulamamıştır (Shmueli, 1999). Bundan dolayı birçok ülke kendi ülkelerinde uygulanacak standartları belirleme yoluna gitmiştir. Ancak, belirlene bu standartlar arasında

münferit bileşenlerin izin verilen konsantrasyon değerleri farklılıklar gösterebilmektedir. Ülkemizde içme suyu için kalite parametre değerleri Türk Standartları Enstitüsü TSE 266 maddesinde belirlenmiştir.

İçme suyu için üç farklı kurum tarafından belirlenen standart değerler aşağıda verilmiştir.

Tablo 1. İçme suyu kalite parametre değerleri
Table 1. *Drinking water quality parameter values*

STANDARTLAR	TSE 266 Türk Standartları Enstitüsü	EC Avrupa Birliği	WHO Dünya Sağlık Teşkilatı
Mikrobiyolojik EMS/100 mL			
Koliform	0	0	0
Esherichia Coli (E.Coli)	0	0	0
Toplam Kloloni Sayısı (22C')	20		
Toplam Kloloni Sayısı (37C')	5		
C.perfringers	0	0	0
Pseudomonas Aeruginosa	0	0	0
Kimyasal mg/L			
pH	6.5-9.5	6.5-9.5	6.5-9.5
İletkenlik 20' (uS/cm)	2500	2500	2500
Nitrat (NO3)	50	50	50
Nitrit (NO2)	0.50	0.50	0,50
Bor (B)	1.0	2.0	2.0
Nikel (Ni)	0.02	0.02	0.02
Arsenik (As)	0.01	0.01	0.01
Kadminyum (Cd)	0.005	0.005	0.003
Civa	0.001	0.001	0.001
Krom Toplam (Cr)	0.05	0.05	0.05
Baryum			
Florür (F)	1.50	1.50	1.50
Kurşun (Pb)	0.01	0.01	0.01
Siyanür (CN)	0.05	0.05	0.07
Bromat (Br)	0.010	0.010	0.025
Benzen (C6H6)	0.001	0.001	0.010
Selenyum (Se)	0.010	0.010	0.010
Antimon (Sb)	0.005	0.005	0.005
Bakır (Cu)	2.0	2.0	2.0
Fosfor	0.4-5.0	0.4-5.0	
Demir (Fe)	0.2	0.2	0.3
Çinko	5.0		
Mangan (Mn)	0.05	0.05	0.10
Magnezyum (Mg)	50	50	
Alüminyum (Al)	0.20	0.20	0.20
Amonyum (NH4)	0.50	0.50	1.50
Sodyum (Na)	175	200	200
Potasyum (K)	12		

Tablo 1. Devamı

STANDARTLAR	TSE 266 Türk Standartları Enstitüsü	EC Avrupa Birliği	WHO Dünya Sağlık Teşkilatı
Serbest Klor (CI2)	0.5	0.5	5
Klorür (Cl)	250	250	250
Kalsiyum (Ca)	200		100
Sülfat (SO4)	250	250	250
Sertlik (CaCO3)			500
Fiziksel ve Duyusal (Organoleptik)			
Renk (Co-Pt birimi)	20	20	15
Bulanıklık (NTU birimi)	5.0	4.0	5.0
Koku	Duyusal	Duyusal	Duyusal
Tat	Duyusal	Duyusal	Duyusal

Not: Bu değerler "https://dobisu.marmara.edu.tr/orta-menu/yararli-bilgiler/icme-suyu-kabul-edilebilir-degerler" den 19.11.2024 14.35 de alınmıştır.

Spektrofotometrik analiz su ve değişik bileşik ve karışımların farklı mineraller açısından değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntem ile yürütülen araştırmalardan bir kısmını şöyle sıralayabiliriz. Altinöz (2002) meyve suyunun analizi, Karasakal (2007) Kuşburnu Bitkisinde askorpik asit tayini; Demirbaş & Orhun (2008) Küçük Menderes havzalarında su kalitesini bor içeriği açısından belirlemiştir; Kaçmaza vd., (2010) yeraltı suyu örneklerinin Mangan (II) ve Çinko (II) açısından analizi; Çakır & Minareci (2015) ışıklı gölü ve ışıklı çayı'nda deterjan, fosfat ve bor kirliliğini inceleme; Tırıs (2021), amlodipin içeren farmasötik preparatların etken maddelerini analiz etme; Tümer ve Özdoğan (2023) soya ve tam yağlı soyayı besin madde değerlerini belirlemede spektrometrik analiz yönteminin kullanmışlardır.

Türkiye su kaynakları bakımından zengin gibi görülsede, 2020 yılı itibari ile kişi başına yıllık düşen su miktarı bakımından 1346 m^3/yıl olduğu belirtilmektedir ki bu durum ülkenin su azlığı yaşadığını göstermektedir (Özgür, 2020). Dünya nüfusunun artması, su tüketimindeki artış, şehirlere göç, sanayi alanındaki hızlı gelişme, gelir ve tüketim seviyesinin artması, çevre kirliliği, fiziksel değişimler ve iklim değişikliği suyun kalitesini ve kullanılabilirliğini olumsuz etkilediği belirtilmektedir (Özdoğan vd., 2021). Bu nedenle, su kaynaklarının korunması ve verimli kullanılabilmesi için gerekli önlemlerin planlanarak acilen uygulamaya konulması insanlığın geleceği açısından çok önemlidir.

Su kaynaklarının düşük toplam organik karbon (TOK) ve düşük bromür içermesi onun yüksek kaliteli olduğu anlamına geldiği belirtilmektedir (Ateş vd., 2007). Kullanılabilir su için TOK parametre değerinin 2 mg/L'nin altında olması önerilmektedir (Wallace vd., 2002). İçme sularında bromürün 0,1 mg/L ve Bromatın 0.01 mg/L'nin altında olmaması gerektiği belirtilmektedir (U.S. EPA, 1999). Avrupa ve Japonya'da içme suyu için bromat bu maksimum değer kullanılması kararı alınmıştır (Takayanagi vd., 2006). Türkiye'de de "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik" içme sularında Bromat değerinin 0.003 mg/L olması gerektiği belirtilmektedir. Bundan dolayı, içme sularında brom ve bromat analizi önemlidir. Bu analizler sonucu belirlenen değerlerden yüksek miktarda bu elementler çıktığında suyu kullanmadan önce bunlardan arıtılması gerekir. Bu işleme dezerformasyon denir.

Ülkemizde içme suyunun arıtılmasında mevzuatlar gereği son dezenfektan olarak bakiye bırakma özelliği olan klor kullanımı zorunludur (TSE 266).

İçme ve kullanma sularının arıtılması amacıyla çeşitli dezenfektanlar kullanılmaktadır. Bu dezenfektanların yan ürünlerinin zararlı olduğu belirtilmektedir (Zhu vd., 2006). İçme suyu dezenfeksiyonunda genellikle kullanılan klorlama sonucu; kanserojen olan trihalometanların oluşabilme riskine karşı son zamanlarda bu amaçla ozon kullanılmaktadır. Ancak su brom içeriyorsa; ozonlama sırasında bromat iyonu oluşmaktadır. Bromat kanserojen olduğu için dezenfeksiyonun kontrollü olması gerektiği belirtilmektedir (Takayanagi vd.,

2006). Ozon hızlı şekilde ortamdan uzaklaştığı için bu parametrenin ölçümü sahada su tüketime sunulmadan önce yapılması gerektiği belirtilmektedir.

Ülkmizde Bromdan oluşan Bromürün sudan arıtılması için "İçme Suyu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliğinde" üç yöntem önerilmektedir. Bunlar; nanofiltrasyon veya ters ozmoz (NF veya TO), toz aktif karbon>granüler aktif karbon (TAK&GAK) ve iyon değiştirici yöntemlerdir. Ayrıca klor dioksit, klor veya UV kullanılabileceği ifade edilmektedir (Neale & Leusch, 2019). Demek ki brom fazlalığı olan sularda yukarıdaki işlemlerin uygulanması suyun kullanılabilirliği açısından önemlidir.

İçme suyu ile ilgili yapılan araştırmalar, su kaynaklarının içeriğinin, kirliliğinin ve kullanılabilirliği gibi konularda yoğunlaştığı görülmektedir (Koçak & Güner, 2009; Kaya, 2016; Stookey, 2016; Karabıdak, 2019; Çetin vd., 2016; Kaya, 2020; Koçak, 2020; Özdoğan ve diğ., 2021). Gümüşhane ili içme ve kullanma sularının radyasyon miktarının ölçülmesine yönelik çalışmalar yürütülmüş ve sularda belirlene radyasyon miktarının sağlık açısından bir sorun oluşturmadığı belirlenmiştir (Kaya, 2016; Kaya, 2020). Aydın İlinde 4410 içme ve kullanma suyu analizleri incelenmiş bunların yaklaşık üçte ikisinin az az kirli, üçtte birinin orta ve yüzdebirlik kısmının çok kirli olduğu belirlemiştir (Atasoylu vd., 2006). Koçak (2020) yaptığı araştırmada İzmir, Ankara ve İstanbul'un musluk sularının genellikle standartlara uygun olduğunu ve daha sağlıklı hale getirilmesi için önlemler alınması gerektiğini belitmişlerdir. Yapılan araştırmalardan görüldüğü gibi ülkemizde kullanılan içme sularının incelenmesi bu alanda yaşanabilecek olumsuzlukları önlememede katkılar salayabilir. Bu çalışma ile Gümüşhane il merkezinde kullanılan ve kullanılacak olan içme suyunun spektrofotometrik analizinin yapılması amaçlanmıştır.

2. Analitik yöntemler
2. Analytical methods

Çalışmamızda spektrofotometrik analiz yöntemi kullanılarak içme suyu içerisinde bulunan nadir elementler tayin edilmiştir. Spektrofotometre, bir numune içerisine gönderilen ışığı ne kadar absorbe ettiği veya geçirdiğini ölçmek suretiyle o numune içerisindebulunan elemetlerin konsantrasyonu ve diğer özellikleri hakkında bilgiler sağlama işlemidir. Bu cihazlar, fizik, kimya, biyoloji, çevre bilimleri ve malzeme bilimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

2.1. Numune alımı:
2.1. Sampling:

Bu araştırmada numuneler Gümüşhane ili için su sağlayacak Bahçecik barajını besleyecek olan akarsular ve il merkezinde musluklardan alınmıştır. Bahçecik barajına su sağlayan üç akarsu ve birde baraj alanından olmak üzere dört numune alınmıştır. Numuneler 2 litrelik plastik kaplarla aynı noktalardan iki saat aralıklarla iki kez alınarak 5 litrelik plastik kaplarda karıştırılarak elde edilmiştir. Şehir merkezinde şebeke suyu kullanan iki konuta girilerek musluktan 2 litrelik plastik kaplarla numuneler alınmıştır. Numuneler uygun şartlarda muhafaza edilerek aynı gün içerisinde analiz için laboratuvara teslim edilmiştir.

2.2. Analiz yöntemi:
2.2. Analysis method:

Su içerisindeki nadir elementler çeşitli spektrofotometrik yöntemler ile tayin edilmektedir. Laboratuvara getirilen su numuneleri analiz için hazırlanmıştır. Lovibond XD 7500 Spektro model spektrofotometrik analiz cihazı ile Lovibond Water Testing analiz kitleri kullanılarak K-Q TSE-ISO-EN 9000 numaralı standarda uygun olarak analizler gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı spektrofotometri cihazının şekli aşağıda verilmiştir.



Şekil 1. Spektrofotometri cihazı
Figure 1. *Spectrophotometry device*

3. Bulgular
3. Findings

Araştırma sürecinde incelenen her bir numunenin içerdikleri elementlerin miktarları TSE 266 Türk Standartları Enstitüsü ve Dünya sağlık örgütünün (WHO) belirlemiş olduğu değerlerle birlikte aşağıda tablolar halinde verilmiştir.

Tablo 2. Baraj kaynak 1 kodlu numuneye ait değerler.
Table 2. *Values belonging to the sample coded Dam Source 1.*

Parametreler	Birim	Ölçülen Değer	TSE 266	WHO
Alüminyum	µg/L	…	0.20	0.20
İletkenlik(20 C'de iS)	µS/cm	650	2500	2500
pH	PH	8.20	6.5-9.5	6.5-9.5
Demir	mg/L	<0.01	0.2	0.3
Nitrit	mg/L	<0.01	0.50	0.50
Amonyum	mg/L	0.08	0.50	1.50
Bakır	mg/L	0.72	2.0	2.0
Sülfat	mg/L	10.08	250	250
Nitrat	mg/L	<0.5	50	50
Potasyum	mg/L	1.6	12	-
Brom	mg/L	0.31	0.010	0.025

Tablo 2 de görüldüğü gibi Brom elementi için ölçülen değer standart değerlerden büyüktür. Diğer ölçüm sonuçları standartlara uygundur.

Tablo 3. Baraj kaynak 2 kodlu numuneye ait değerler.
Table 3. *Values for the sample coded Dam Source 2.*

Parametreler	Birim	Ölçülen Değer	TSE 266	WHO
Alüminyum	µg/L	…	0.20	0.20
İletkenlik(20 C'de iS)	µS/cm	800	2500	2500
pH	PH	8.13	6.5-9.5	6.5-9.5
Demir	mg/L	<0.01	0.2	0.3
Nitrit	mg/L	<0.01	0.50	0.50
Amonyum	mg/L	0.08	0.50	1.50
Bakır	mg/L	1.32	2.0	2.0
Sülfat	mg/L	71	250	250
Nitrat	mg/L	<0.5	50	50
Potasyum	mg/L	2.6	12	-
Brom	mg/L	0.41	0.010	0.025

Tablo 3 de görüldüğü gibi Brom elementi için ölçülen değer standart değerlerden büyüktür. Diğer ölçüm sonuçları standartlara uygundur.

Tablo 4. Baraj kaynak 3 kodlu numuneye ait değerler.
Table 4. *Values belonging to the sample coded Dam Source 3.*

Parametreler	Birim	Ölçülen Değer	TSE 266	WHO
Alüminyum	µg/L	…	0.20	0.20
İletkenlik(20 C'de iS)	µS/cm	540	2500	2500
pH	PH	8.20	6.5-9.5	6.5-9.5
Demir	mg/L	0.04	0.2	0.3
Nitrit	mg/L	<0.01	0.50	0.50
Amonyum	mg/L	0.06	0.50	1.50
Bakır	mg/L	0.66	2.0	2.0
Sülfat	mg/L	9.68	250	250
Nitrat	mg/L	<0.5	50	50
Potasyum	mg/L	1.5	12	-
Brom	mg/L	0.27	0.010	0.025

Tablo 4 de görüldüğü gibi Brom elementi için ölçülen değer standart değerlerden büyüktür. Diğer ölçüm sonuçları standartlara uygundur.

Tablo 5. Baraj kodlu numuneye ait değerler.
Table 5. *Values belonging to the dam coded sample.*

Parametreler	Birim	Ölçülen Değer	TSE 266	WHO
Alüminyum	µg/L	…	0.20	0.20
İletkenlik(20 C'de iS)	µS/cm	750	2500	2500
pH	PH	8.13	6.5-9.5	6.5-9.5
Demir	mg/L	<0.01	0.2	0.3
Nitrit	mg/L	<0.01	0.50	0.50
Amonyum	mg/L	0.04	0.50	1.50
Bakır	mg/L	0.64	2.0	2.0
Sülfat	mg/L	8.36	250	250
Nitrat	mg/L	<0.5	50	50
Potasyum	mg/L	1.4	12	-
Brom	mg/L	0.11	0.010	0.025

Tablo 5 de görüldüğü gibi Brom elementi için ölçülen değer standart değerlerden büyüktür. Diğer ölçüm sonuçları standartlara uygundur.

Tablo 6. Merkez 1 kodlu numuneye ait değerler.
Table 6. *Values for the sample coded as Center 1.*

Parametreler	Birim	Ölçülen Değer	TSE 266	WHO
Alüminyum	µg/L	…	0.20	0.20
İletkenlik(20 C'de iS)	µS/cm	620	2500	2500
pH	PH	8.03	6.5-9.5	6.5-9.5
Demir	mg/L	<0.01	0.2	0.3
Nitrit	mg/L	0.04	0.50	0.50
Amonyum	mg/L	0.04	0.50	1.50
Bakır	mg/L	0.78	2.0	2.0
Sülfat	mg/L	12.66	250	250
Nitrat	mg/L	<0.5	50	50
Potasyum	mg/L	1.8	12	-
Brom	mg/L	0.42	0.010	0.025

Tablo 6 de görüldüğü gibi Brom elementi için ölçülen değer standart değerlerden büyüktür. Diğer ölçüm sonuçları standartlara uygundur.

Tablo 7. Merkez 2 kodlu numuneye ait değerler.
Table 7. *Values for the sample coded as Center 2.*

Parametreler	Birim	Ölçülen Değer	TSE 266	WHO
Alüminyum	µg/L	…	0.20	0.20
İletkenlik(20 C'de iS)	µS/cm	840	2500	2500
pH	PH	7.61	6.5-9.5	6.5-9.5
Demir	mg/L	<0.01	0.2	0.3
Nitrit	mg/L	<0.01	0.50	0.50
Amonyum	mg/L	0.04	0.50	1.50
Bakır	mg/L	1.47	2.0	2.0
Sülfat	mg/L	8.21	250	250
Nitrat	mg/L	<0.5	50	50
Potasyum	mg/L	4.2	12	-
Brom	mg/L	0.17	0.010	0.025

Tablo 7 de görüldüğü gibi Brom elementi için ölçülen değer standart değerlerden büyüktür. Diğer ölçüm sonuçları standartlara uygundur

4. Tartışma ve sonuçlar
4. Discussion and conclusions

Gümüşhane il merkezine içme suyu sağlamak amacıyla inşa edilen Bahçecik Barajını besleyen üç su kaynağından ve baraj gölünden alınan numunelerin analizinden Brom elementi dışındaki tüm değerlerin TSE ve Dünya Sağlık örgütünün belirlediği standart değerlere uygun olduğu belirlenmiştir (Tablo 1, 2, 3, 4). Benzer sonuçlar il merkezinde konutlardan alınan sonuçlarda da elde edilmiştir (Tablo 5, 6). Numunelerden elde edilen Brom değerleri 0,11 mg/L ile 0.42 mg/L değerleri arasında yer almakta olduğu görülmektedir. Bu değerler TSE ve WHO'nün belirlediği standart değerlerden yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 2, 3, 4, 5, 6, 7). Doğal su kaynakları genellikle bromür içerir, ancak ozonlama veya klorlama sırasında yan ürün bromat oluşur (Derrick vd., 2020; Haag & Hoigne, 1983). Bromatın, konsantrasyonları 0,05 µg/L'i aştığında potansiyel bir kanserojen olduğu belirtilmektedir ve maksimum kirletici seviyesi (MCL) 10 µg/L (ABD) ve 25 µg/L (Dünya Sağlık Örgütü) olarak belirlenmiştir (WHO, 2020).

İncelenen su numunelerinde Alüminyum elementinin bulunmadığı görülmektedir. Bu durum suların kullanılabilirliği açısından olumludur.

Su numunelerinde ölçülen iletkenlik değerlerinin 540-840 µS/cm arasında olup standart değer 2500 µS/cm dir. Ölçülen pH değerleri 7.61-8.20 PH arasında olup standart değer 6,5-9,5 PH arasındadır. Ölçülen Demir değerleri <0,01-0,04 mg/L arasında olup standart değer 0,2-0,3 mg/L arasındadır. Ölçülen Nitrit değerleri <0,01-0,04 mg/L arasında olup standart değer 0,5 mg/L dir. Ölçülen Amonyum değerleri 0,04-0,08 mg/L arasında olup standart değer 0,5-1.5 mg/L arasındadır. Ölçülen Bakır değerleri 0,64-1,47 mg/L arasında olup standart değer 2,0 mg/L dir. Ölçülen Sülfat değerleri 8,36-71,0 mg/L arasında olup standart değer 250 mg/L dir. Ölçülen Nitrat değerleri <0,5 mg/L olup standart değer 50 mg/L dir. Ölçülen Potasyum değerleri 1,4-4,2 mg/L arasında olup standart değer 12 mg/L dir. Yukarıda görüldüğü gibi ölçülen değerler TSE ve WHO tarafından belirlenen standart değerler ile uyumludur. Yukarıda görüldüğü gibi çalışmamızda ölçümü yapılan pH değeri, İletkenliği, Demir, Nitrit, Amonyum, Bakır, Sülfat, Nitrat ve Potasyum Brom değerleri TSE ve WHO standart değerleri ile uyumludur.

Gümüşhane ili içme ve kullanma suyu olarak kullanılacak ve kullanılmakta olan suların Brom açısından belirlenen standart değerlerden yüksek olması nedeniyle kullanılmadan önce bu açıdan gerekli arıtma işlemine (dezenfeksiyona) tabi tutulması gerekmektedir.

Yazar katkısı
Author contribution

Tüm işlemler yazar tarafından yürütülmüştür.

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Bu çalışmada insan ve hayvan denekler kullanılmadığı için etik açısından bir sorun teşkil etmemektedir.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Altinöz, D. (2002). Meyve Suyunda Spektrofotometrik ve Sıvı Kramotagrafik Hidroksimetilfurfural (HMF) Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Master's thesis, Ankara Universitesi (Turkey)).

Anonymous, (2006). Earth's water distrubition. Water Science for Schools.http://ga.water.usgs. gov/edu/waterdistribution. Html

Arslan, H. & Demir Y., (2011). Bafra Ovasında Deniz Suyu Girişiminin Yeraltı Suyu Kalitesi Üzerindeki Etkisi, *Anadolu Tarım Bilim. Derg.*, 26(2):136-144

Atasoylu, G., Okyay P., Güney N., Deniz y., Çobanoğlu M., Beşer E., (2006). Aydın İli Halk Sağlığı Laboratuvarı 2004 Yılı İçme ve Kullanma Suyu Analizleri, *TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni*, 5 (3)

Ateş, N., Kaplan, S. S., Sahinkaya, E., Kitis, M., Dilek, F. B. ve Yetis, U. (2007) Occurrence of disinfection by-products in low DOC surface waters in Turkey, *Journal of Hazardous Materials*, 142, 526–534. doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.08.076.

Boysan, F. & Şengörür B., (2001). Şişelenmiş İçme Sularındaki Bazı İnorganik Parametrelerin İnsan Saglıgına Etkilerinin Araştırılması, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5.Ci1t, 2.Sayı (Eylül 2001)

Çakır, M., & Minareci, O. (2015). Işıklı Gölü ve Işıklı Çayı'nda (Çivril-Denizli) Deterjan, Fosfat ve Bor Kirliliğinin Araştırılması, *Aquatic Sciences and Engineering*, 30(1), 23-34. https://doi.org/10.18864/iujfas.01514

Çetin, İ., Nalbantçılar, M. T., İnci, R., Nazik, A., & Tosun, K. (2016). İçme Suyu Sodyum, Potasyum ve Klor Düzeylerinin, 55-70 Yaş Aralığındaki Kadınların Vücut Kompozisyonlarıyla Korelasyonu. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 6(2/2), 251-263.

Demirbaş, P. & Orhun, Ö., Kuzey Ege, Gediz ve Küçük Menderes Havzalarında 2003-2007 Yılları Arasında Su Kalitesi Açısından Bor İçeriğinin Spektrofotometrik Analiz Metodu İle Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi, Havza Kirliliği Konferansı, 26-27 Haziran 2008, İzmir.

Derrick Quarles, C., Andrew D. Toms, R. S., Sullivan P., Bass D., Leone J., (2020). Automated ICP-MS method to measure bromine, chlorine, and iodine species and total metals content in drinking water, *Talanta Open*, Volume 1, 100002, ISSN 2666-8319, https://doi.org/10.1016/j.talo.2020.100002.

Gray, N.F. (2008). Drinking Water Quality – Problems and Solutions. (2nd edition). New York: Cambridge University Press

Haag, W.R. & Hoigne, J. (1983) Ozonation of bromide-containing waters-kinetics of formation of hypobromous acid and bromate, *Environ. Sci. Technol*. 17, 261–267.

Özdoğan, N., Sefercik, U.G., Kılınç, Y., Çalışkan, E. & Atalay, C. (2021). Su Kalitesinin İnsansız Hava Aracı Verileri ve Fiziko-kimyasal Parametrelerin Analizi ile Belirlenmesi: Aydınlar (Gülüç) Çayı Örneği. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 572-582.

Kaçmaza, S., Ertekina, K., Zeyreka, M., & Ergüna, M. Y. Yeraltı Suyu Örneklerinde Spektrofotometrik Metotla Mangan (II) ve Çinko (II) Analizi. 24. Ulusal Kimya Kongresi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 29 Haziran-2 Temmuz 2010, Zonguldak

Karasakal, A., (2007). Kuşburnu Bitkisinde Spektrofotometrik Yöntemle Askorbik Asit Tayini, (Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü)

Karabıdak, Salih M., Kaya, A., Kaya, S., (2019). Cancer risk analysis of some drinking water resources in Gümüşhane, Turkey, *Sustainable Water Resources Management*, 5:1939–1949.

Kart, M. (2021). Çevre politikalarının oluşturulmasında Türkiye'de çevre alanında faaliyet gösteren sivil toplum kuruluşlarının bir baskı aracı olarak rolünün değerlendirilmesi (Master's thesis, Aksaray Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü).

Kaya, A., Karabıdak S. M., Kaya S., Gümüşhane Merkez ve Merkeze Bağlı Bahçecik Köyü Su Kaynaklarının Radyoaktivitesinin Tayini, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (2016) 6 (1): 13-22

Kaya, S., Kaya A., Çelik N., Taylan Kara R., Taşkın H. ve Koz B., (2020). Determination of the environmental natural radioactivity and mapping of natural background radioactivity of the Gumushane province, Turkey, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Cilt 325, Sayı 2, 4 April 2020. S., 933-957, https://doi.org/10.1007/s10967-020-07390-4,

Koçak, Ö. & Güner A., (2009). Erzurum il merkezindeki içme ve kullanma sularının kimyasal, fiziksel ve mikrobiyolojik kalitesi, *Atatürk Üniv. Vet. Bil. Dergisi*, 4(1):9- 22.

Koçak, C., (2020). Ambalajlı sular ile üç büyük ilin musluk sularının kimyasal ve mikrobiyolojik açıdan karşılaştırılması, *Turk J Public Health,*18(3): 210-225

Küçükeşmen, C. & Sönmez, H., (2008). Diş hekimliğinde florun, insan vücudu ve dişler üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, *S.D.Ü. Tıp Fak. Derg.* 15 (3)/ 43-53

Liu, Y. Mou, S. Heberling, S. Determination of trace level bromate and perchlorate in drinking water by ion chromatography with an evaporative preconcentration technique, *J. Chromatogr. A*, 956 (2002) 85–91.

Neale, P. A. & Leusch, F. D. L. (2019). Assessing the role of different dissolved organic carbon and bromide concentrations for disinfection by-product formation using chemical analysis and bioanalysis, *Environmental Science and Pollution Research*, 26,17100–17109.

Oğuz, T. C., (2015). İçme Suyu Arıtımında Yaygın Olarak Karşılaşılan Su Kalite Problemleri ve Arıtımı İçin Çözüm Önerileri, Uzmanlık Tezi, T. C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı yayınları.

Özçelik, S., (1984). İçme Sularının Dezenfeksiyonunda Kullanılan Metodlar ve Uygun Metodun Seçimi. *Gıda*, 9(2).

Özgür, C., (2020). Düşük Bromür Ve Organik Madde İçeren Su Kaynakları İçin Ön Dezenfektan Seçiminde Çok Ölçütlü Karar Verme Metotlarının Uygulanması, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 25, Sayı 2, s. 1039-1057. DOI: 10.17482/uumfd.745419

Peng, Y. Guo, W. Zhang, J. Guo, Q. Jin, L. Hu, S., (2016). Sensitive screening of bromate in drinking water by an improved ion chromatography ICP-MS method, *Microchem. J.* 124, 127–131.

Shmueli, Deborah F. (May 1999). "Water quality in international river basins". *Political Geography*. 18 (4). ss. 437-476. doi:10.1016/S0962-6298(98)00106

Surleva, A., & Ivanova, V. (2019). Determination of bromide and bromate ions in the presence of standard ions by suppressed ion chromatography, *Mater. Sci. Forum* 967 171–178.

Stookey, J.J., (2016) Negative, null and beneficial effects of drinking water on energy intake, energy expenditure, fat oxidation and weight change in randomized trials: a qualitative review. *Nutrients*, 8(1):19 CrossRef PubMedCentral.

Takayanagi, T., Ishida, M., Mbuna, J., Driouich, R., & Motomizu, S. (2006). Determination of bromate ion in drinking water by capillary zone electrophoresis with direct photometric detection. Journal of Chromatography A, 1128(1-2), 298-302.

Tırıs, G. (2021). Amlodipin içeren farmasötik preparatlarda etken maddelerin yeni spektrofotometrik yöntemlerle analizi (Doctoral dissertation, Ankara Universitesi (Turkey)).

Tümer, Ş. K., & Özdoğan, M. (2023). Çiğ Soya ve Tam Yağlı Soyanın Besin Madde Değerlerinin ve Isıl İşlem Faktörlerinin Kimyasal ve Spektrofotometrik Yöntemlere göre Değerlendirilmesi. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(1), 143-148. https://doi.org/10.25308/aduziraat.1287207

URL 1, https://www.naturelsuaritma.com.tr/ictigimiz-suyun-icinde-ne-var/ 26.11.2024 saat:14.56 alınmıştır.

U.S. EPA (1999) Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual, U.S. Environmental Protection Agency Publications EPA 815-R-99-014, Washington, D.C.

Wallace, B., Purcell, M. ve Furlong, J., (2002) Total organic carbon analysis as a precursor to disinfection byproducts in potable water: Oxidation technique considerations, J. *Environ. Monit*., 4, 35–42. DOI: 10.1039/b106049j

WHO (World Health Organization), 2020, https://www.who.int/water_sanitation_health/waterquality/guidelines/chemicals/gdwq4-with-add1-chap12.pdf?ua=1, (accessed March 2020).

Zhu, B. Zhong, Z. and Yao, J. (2006) Ion chromatographic determination of trace iodate, chlorite, chlorate, bromide, bromate and nitrite in drinking water using suppressed conductivity detection and visible detection, *Journal of Chromatography A*, 1118, pp. 106-110.

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 221-233 doi: 10.17714/gumusfenbil.1625918 Research Article

Impact of wind loads on the structural integrity of reinforced concrete (RC) minarets

Rüzgar yüklerinin betonarme minarelerin yapısal bütünlüğüne etkisi

Muhammet KARABULUT*[1,2],

[1]*Department of Structural Mechanics and Analysis, Technical University of Berlin, 10623, Berlin, Germany*
[2]*Department of Civil Engineering, Zonguldak Bülent Ecevit University, 67100, Zonguldak, Turkey*

• Received: 23.01.2025 • Accepted: 01.03.2025

Abstract

The rapid climatic shifts caused by global warming represent a growing and serious threat that demands immediate global attention and preparation. The collapse of minarets in Mersin, İzmir, Ankara and Kahramanmaraş due to strong winds has served as the inspiration for this research article. These incidents highlight the lack of sufficient investigation into the wind effects on minarets in Turkey and underscore the presence of minaret structures that may pose significant risks. In the conducted study, the Çamlıca Mosque minarets, the tallest minarets in Turkey, were used as a reference. Finite element analyses were performed using the ANSYS program for three distinct height scenarios: a high height of 107 meters, a medium height of 57 meters, and a low height of 27 meters. The dimensions of the base, pulpit, transition segment and spire parts of the minarets are the same, only the body lengths have been changed. Wind speeds were calculated according to the height of the minarets and the relevant regulation TS498 data was considered. The research concluded that the minaret with a body height of 20 meters, considered the lowest, was the safest under the influence of strong winds, experiencing a displacement of approximately 9.1 mm at the top. However, it was observed that the displacement values for the medium-height (57 m) and tall (107 m) minarets would increase significantly, with a high risk of structural collapse occurring at the transition segments. In the study, where principal tensile and compressive stress were also calculated and presented, it was found that the tensile stress in the lowest minaret was around 1.5 MPa. However, this value increased significantly in the medium and tallest minarets, rising to approximately 6.5 times and 25 times higher, respectively.

Keywords: Compressive stress, Displacement, Pulpit section, Transition segment, Tensile stress, Wind effect on minaret

Öz

Küresel ısınmanın neden olduğu hızlı iklim değişiklikleri, acil küresel önlem ve hazırlık gerektiren büyüyen ve ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Mersin, İzmir, Ankara and Kahramanmaraş'taki minarelerin şiddetli rüzgarlar nedeniyle çökmesi bu araştırma makalesinin ilham kaynağı olmuştur. Kuvvetli rüzgarlar yüzünden minarelerin devrilmesi, Türkiye'de minareler üzerindeki rüzgar etkilerinin yeterli düzeyde araştırılmadığını ve önemli riskler oluşturabilecek minare yapılarının sayısını vurgulamaktadır. Yapılan çalışmada, Türkiye'nin en yüksek minareleri olan Çamlıca Camii minareleri referans olarak kullanılmıştır. Sonlu elemanlar minare model analizleri, 100 metre yüksek, 50 metre orta ve 20 metre düşük olmak üzere üç farklı yükseklik senaryosu için ANSYS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Minarelerin kaide, minber, geçiş parçası ve sivri uç kısımlarının boyutları aynı olup, ana gövde uzunlukları değiştirilmiştir. Rüzgar hızları minarelerin yüksekliklerine göre hesaplanmış ve ilgili yönetmelik TS498 verileri dikkate alınmıştır. Araştırmada, gövde yüksekliği en alçak olarak kabul edilen 27 metre olan minarenin, en üst noktasında yaklaşık 9,1 mm'lik bir yer değiştirme meydana gelmiş, kuvvetli rüzgar etkisi altında en güvenli olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak orta yükseklikteki (57 m) ve yüksek (107 m) minareler için yer değiştirme değerlerinin önemli ölçüde arttığı, geçiş segmentlerinde yapısal çökme riskinin yüksek olduğu görülmüştür. Asal çekme ve basınç gerilmelerinin de hesaplanıp sunulduğu çalışmada, en alçak minaredeki asal çekme gerilmesinin 1,5 MPa civarında olduğu bulunmuştur. Ancak bu değer orta ve yüksek minarelerde önemli ölçüde artarak sırasıyla yaklaşık 6.5 kat ve 25 kata kadar artabileceği hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: *Basınç gerilmesi, Yerdeğiştirme, Minare kaide kısmı, Geçiş kısmı, Çekme gerilmesi, Minareye rüzgar etkisi*

*Muhammet KARABULUT; karabulut@beun.edu.tr

1. Introduction

Global warming has the potential to trigger extreme events such as fires, floods, storms, and severe winds on an unprecedented scale, necessitating changes in structure design standards to better withstand these new challenges, as already evident in the increasing frequency and severity of natural disasters today. In this study, the risk status of strong winds according to minaret heights was examined parametrically. Minarets are among the most slender, delicate and tallest structures, but when considered in terms of the number of minarets, it is predicted that there are many more than other skyscrapers and tall tower structures. In countries with a dense Muslim population, such as Turkey, it is possible to see a few minarets on almost every street.

Minarets, the slender and tall structures, are more vulnerable to lateral loads such as earthquakes and wind. According to the TS-498/97 regulation, in wind load calculations, parameters such as the building surface exposed to the wind, the aerodynamic load coefficient (Cf) depending on the type of building, the wind speed depending on the height of the building from the ground, and the roof slope are the effects taken into account (Küçük, 2009; TS 498, 2003). Minaret damage and destruction caused by strong winds in Turkey was investigated (Türkeli, 2014). The stress distribution contours reveal critical areas, such as where the cross section narrows above 10 m and around openings (doors or control openings). These "mortal places" are vulnerable and require extra care to ensure the structure retains sufficient ductility and can withstand stress without failing. Determination and comparison of wind loads for industrial reinforced concrete chimneys that are geometrically similar to minarets were investigated (Karaca & Erdem, 2012). ACI 307/98, CICIND 2001, DIN 1056, Eurocode 1 and TS 498 standards were compared and evaluated. As a result of the analysis, the most comprehensive and largest wind load values were obtained from Eurocode1. Existing RC minarets in Northern Cyprus were studied in terms of earthquake and wind effects (Reşatoğlu et al., 2018). The study particularly emphasized the increase in the number of RC minarets in Northern Cyprus in recent years. The research was carried out with SAP2000 finite element program and static wind analysis and dynamic earthquake response spectrum analyses were performed. The shear force values coming to the base were determined to be greater in TS498 than in ACI307-98. However, a more consistent graph was obtained in the inclination angle of the wind load intensity in ACI307-98. The performance of masonry minarets in Turkey against earthquakes and winds was studied, focusing on the causes of minaret topples (Doğangün et al., 2006). When the codes of practice and research articles for earthquake and wind resistant design of minarets were investigated, unfortunately it was seen that there was no Turkish standard and specification directly related to the analysis and design of minarets. The damage photographs of the minarets caused by earthquake and strong winds are presented, and secondly, the local stress concentrations and displacement behaviors obtained from seismic analyses are briefly discussed and demonstrated. The use of TS498 and TS-EN-1991-1-4 in wind load calculation of reinforced concrete minarets considering the soil-structure ınteraction has been compared (Türkeli, 2019). The results indicate that soil-structure interaction negatively affects wind loads by increasing them, and this interaction should be considered in wind load calculations. Determination of natural foundation period of minarets and evaluation of the effect of different materials on their seismic sensitivity by using artificial neural network were investigated (Işık et al., 2023). When the actual periods from experimental analysis were compared with values estimated by the ANN using fewer parameters, the results showed a 99% accuracy. Evaluation of masonry minarets collapsing due to strong winds under uncertainty was investigated numerically and experimentally (Ural & Firat, 2015).

In Turkey, wind effects, similar to earthquakes, have caused damage to minarets. (Doğangün et al., 2006) On February 27, 2002, a storm with a velocity of 96 km/h struck Mersin-Erdemli, leading to the collapse of minarets at five mosques and damage to those at four others (Figure 1a). Nearly a year later, on February 9, 2003, a windstorm with a velocity of 100 km/h caused another minaret failure in the same city (Figure 1b). Most recently, on July 24, 2005, two masonry minarets in the city center of Kahramanmaraş-Afşin failed due to strong winds at 60 km/h (Figure 1c). (Erdoğan, 2024) On November 24, 2024, the minaret of a mosque in the Tarsus district of Mersin collapsed due to strong winds (Figure 1d). (Konuralp, 2024) On November 23, 2024, a strong wind collapsed the cone of a mosque minaret in Izmir (Figure 1e). (Diri, 2023) On May 17, 2023, the minarets of two mosques collapsed in a storm in Ankara (Figure 1f). Due to winds reaching speeds of 45 kilometers per hour, many trees fell and roofs were blown away. In the resulting wind, the minaret of the İmik Dede Mosque in the Çankaya district collapsed and stones falling from the minaret fell into the courtyard of the mosque. Similarly, in the Etimesgut district, a roof that flew off a building due to the wind fell on the minaret of the Etimesgut Central Mosque, causing it to collapse (Figure 1g). (Yiyen, 2024) On November 24, 2024, the minaret of the Fatih Mosque in the Osmangazi Neighborhood of the Onikişubat district collapsed in

the strong winds in Kahramanmaraş (Figure 1h). (NTV, 2020) On January 6, 2020, the minaret of a mosque in Edirne, where an orange warning was issued due to strong winds, collapsed due to the wind (Figure 1k). The Figure 1 below illustrates examples of minarets that have collapsed due to the impact of strong winds in Turkey. Upon examining the minaret collapses presented in Figure 1, it is observed that the minarets typically collapse by detaching from the transition zone at the base. This zone, characterized by a significant loss of the transition section, experiences higher shear forces and moment values, which contribute to the structural failure.



Figure 1. Examples of minarets that have collapsed due to the impact of strong winds in Turkey

The effect of strong winds on reinforced concrete minarets has been studied quite limitedly compared to the seismic effect. In recent years, it has been observed that the minarets made of masonry stone have been replaced

by reinforced concrete minarets that can be built taller due to developing technology and material quality. This study contributes to the research gap in the literature by examining the displacement, principal tensile and compressive stresses that occur as a result of the effects of strong wind loads, especially on tall minarets. In this context, the height of the Çamlıca Mosque minaret, which is the highest minaret in Turkey, is 107 meters and was examined as a reference example in terms of its height. Additionally, a study was conducted on minarets with total heights of 27 meters and 57 meters, both having the same cross-sectional features, to examine the impact of height on displacement and stress.

2. Finite element methods and materials

This study was carried out by applying static wind loads on the finite element models of the minarets. Minarets are designed in 5 parts: foundation, pulpit, transition segment, main body and spire. The stairs, balconies, doors and windows of the 3D modeled minarets are not included in the scope of this study. Numerical analyses of three-dimensional minaret finite element models under static wind loads were carried out in the ANSYS program. Figure 2 shows the entire 27-meter-high minaret and the details of the upper and lower parts. All sections of the other two minarets have the same dimensions, except that the heights of the main body are 50 m and 100 m instead of 20 m.

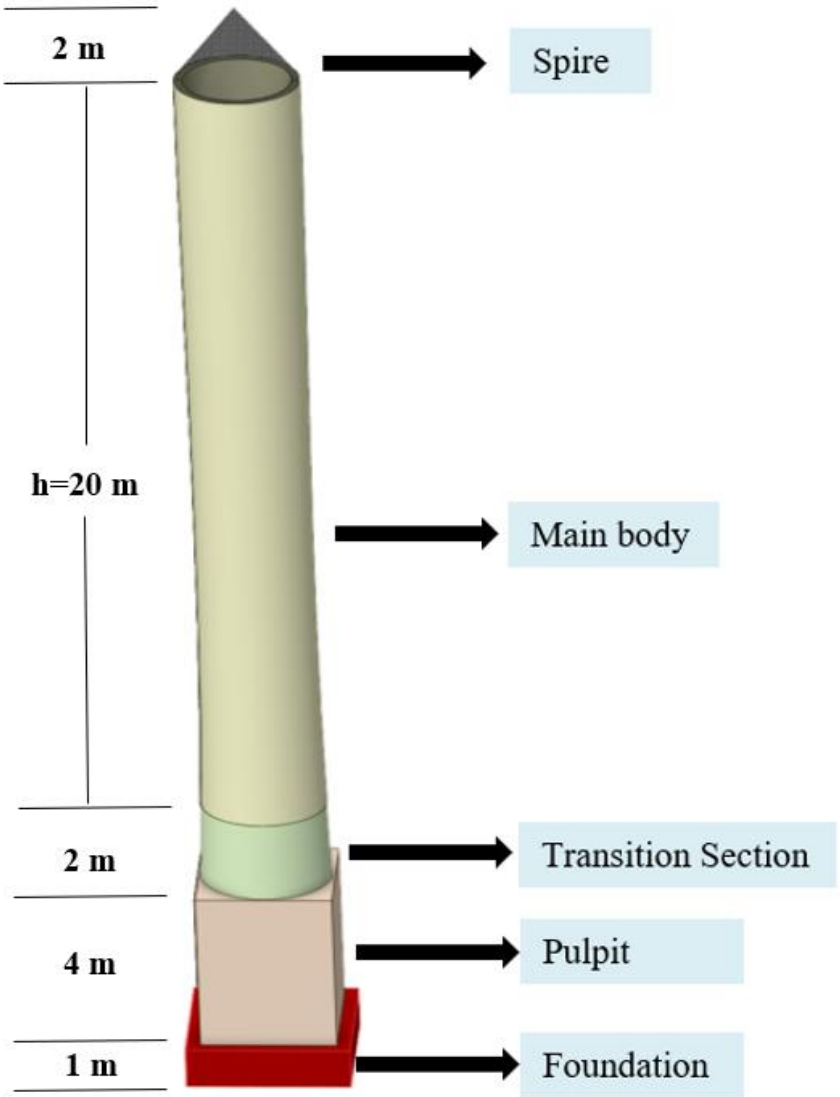


Figure 2. Low height 27-meter-high minaret and the details of the upper and lower parts.

Figure 3 presents the details of the cross-sectional areas of the foundation, pulpit, transition section and main body of the minarets. The foundation section has a square base measuring 3 meters by 3 meters, with a height

of 1 meter. The pulpit section has a square section of 2.5 m x 2.5 m from outside to outside and a cylindrical space of 2 m diameter inside and its height is 4 meters. The transition part has the shape of a cylindrical cone that narrows from 2.4 meters to 2.3 meters on the outside, and the inside has a cylindrical volume of 2 meters in diameter and 2 meters in height. The main body section has a constant thickness wall with a 30 cm section.

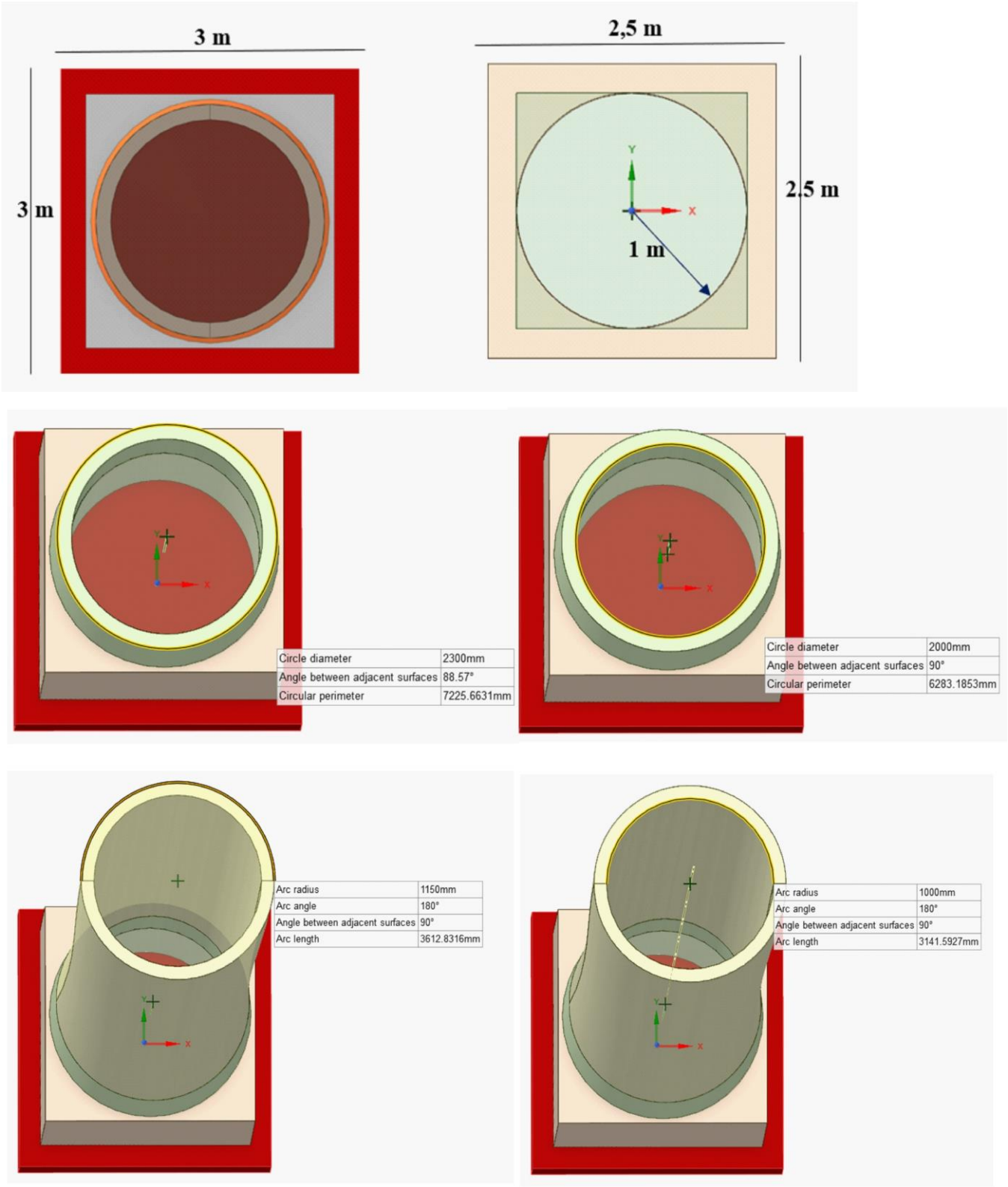


Figure 3. Low height 27-meter-high minaret and the details of the upper and lower parts.

Figure 4 shows finite element minaret models of low (27 m), moderate (57 m) and high (107 m) minarets, varying according to their heights.

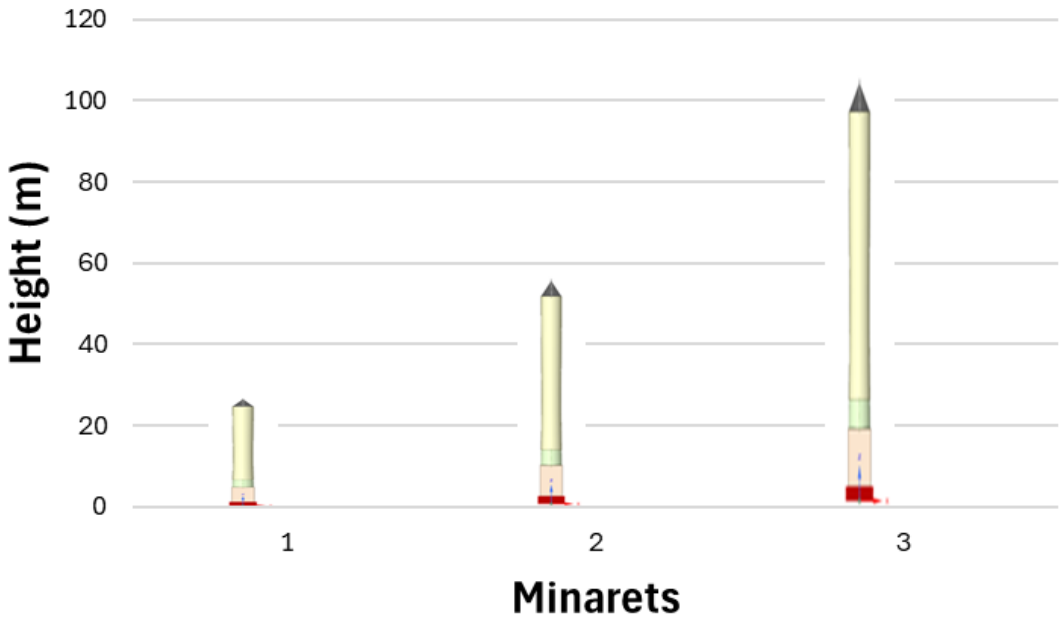


Figure 4. Low height 27-meter-high minaret and the details of the upper and lower parts.

Figure 5 shows wind load pressure and finite element models of minarets with heights of 27m, 57m and 107m, respectively. The 27-meter-high minaret is composed of 1,474 elements and 9,858 nodes. The 57-meter-high minaret features 2,641 elements and 18,981 nodes, while the 107-meter-high minaret contains 4,806 elements and 34,284 nodes.

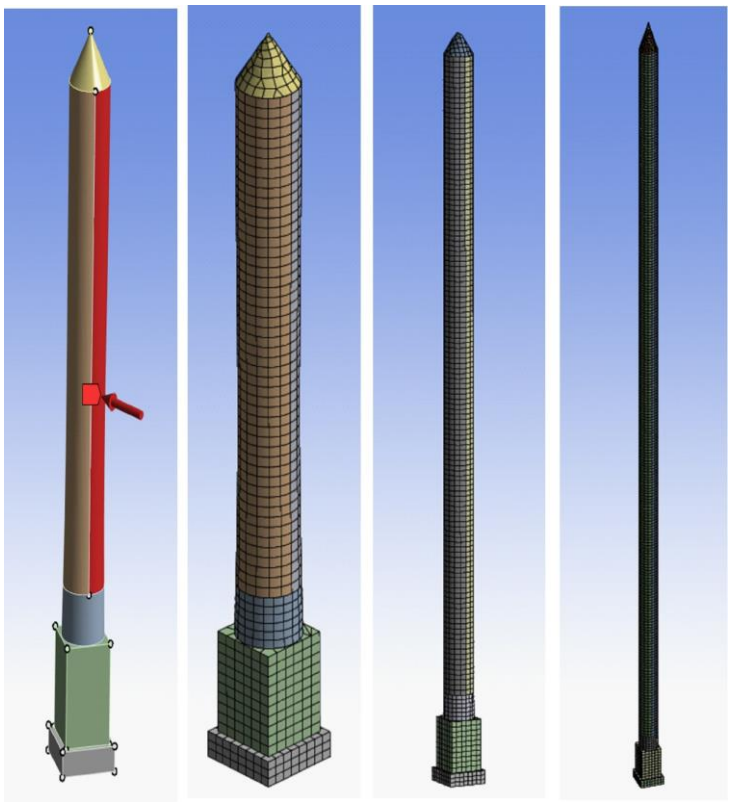


Figure 5. Wind load pressure and finite element models of 27m, 57m and 107m minarets respectively

Concrete and steel material information used in the finite element models is presented in Table 1.

Table 1. Material properties

Materials	Elastic Modulus (MPa)	Poisson Ratio ν
Concrete	30000	0.2
Steel	200000	0.3

3. Wind load calculations method

In the strong wind load (W) calculations to be made in this section, the TS498 Turkish Standard on 'Calculation Values of Loads to Be Taken In Dimensioning of Building Elements' was taken into consideration. The wind load should be taken into account in every direction, acting at its maximum value (TS 498, 2003). The wind load calculation depends on the geometry of the structure. Pressure, suction and friction effects are combined and taken into account. The magnitude of the wind load on a structure as a whole is calculated by equation (1);

$$W = Cf\ q\ A\ (kN) \quad (1)$$

Notations;
Cf= Aerodynamic load coefficient
q = Suction (speed pressure) kN/m^2
A = Affected surface area, m^2

The determination of the load coefficient (Cf) depends on the geometry of the structure and the wind direction. This coefficient is obtained from the wind channel test. Equation (2) calculates the suction value of the wind.

Suction (Speed pressure)(q):

$$q=\rho v^2/2g\ (kN/m^2) \quad (2)$$

If we take the unit volume weight of air as $\rho = 1.25\ kg/m^3$ as a very approximate value, the speed (v) is substituted in m/s. Equation (3) calculates the approximate suction value depending on the wind speed.

$$q=v^2/1600\ (kN/m^2) \quad (3)$$

Table 2 presents the wind speed and suction values depending on the altitude according to TS498.

Table 2. Wind speed and suction values depending on the structure height

Height from Ground (m)	**Wind speed v (m/s)**	**Suction q (kN/m^2)**
0-8	28	0.5
9-20	36	0.8
21-100	42	1.1
>100	46	1.3

4. Results and discussions

In this section, the results of the static wind load finite element analysis conducted for the minarets are presented. First, the minarets were analyzed under a strong wind load of 1.28 kN/m^2 to understand the effect of the minaret body height on displacement and stresses.As a result of the analyses conducted on the three different main body heights, considering the effects of strong wind pressure, the total displacement at the top points of the minarets, as well as the maximum principal tensile and compressive stresses, are presented. Figures 6, 7 and 8 present the displacement, principal tension and compressive stress results of minarets with heights of 27 meters, 57 meters and 107 meters, respectively. As a result of the static wind finite element analysis, a displacement of approximately 9.11 mm was obtained at the top of the 27-meter minaret. It is observed that the maximum principal tensile stress of 1.57 MPa and the maximum principal compressive stress

of 1.53 MPa occur in the transition section of the minaret. This situation is in accordance with the studies in the literature and the cases of minaret collapse due to wind effect.

This proves that the finite element minaret model performs correctly. A displacement of 165.56 mm was obtained at the top of the 57-meter-high minaret, and it is seen that the spire part of the minaret is separated from the minaret. The maximum principal tensile stress was approximately 9.71MPa and the maximum principal compressive stress was approximately 9.74 MPa in the transition section.

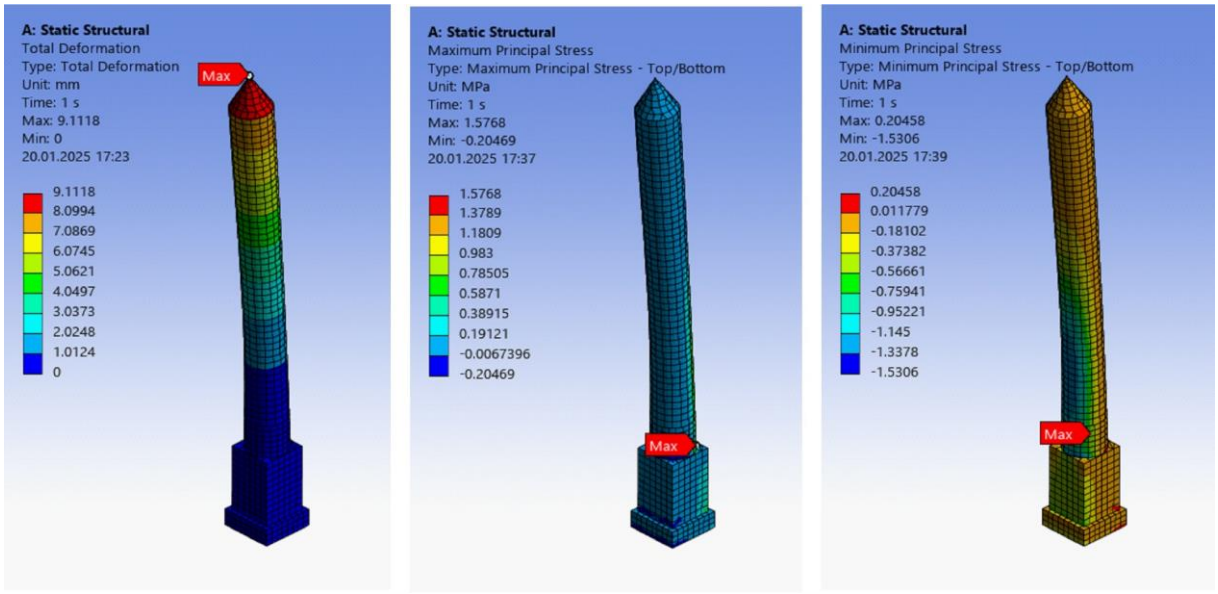


Figure 6. Finite element analysis results of the 27-meter-high minaret

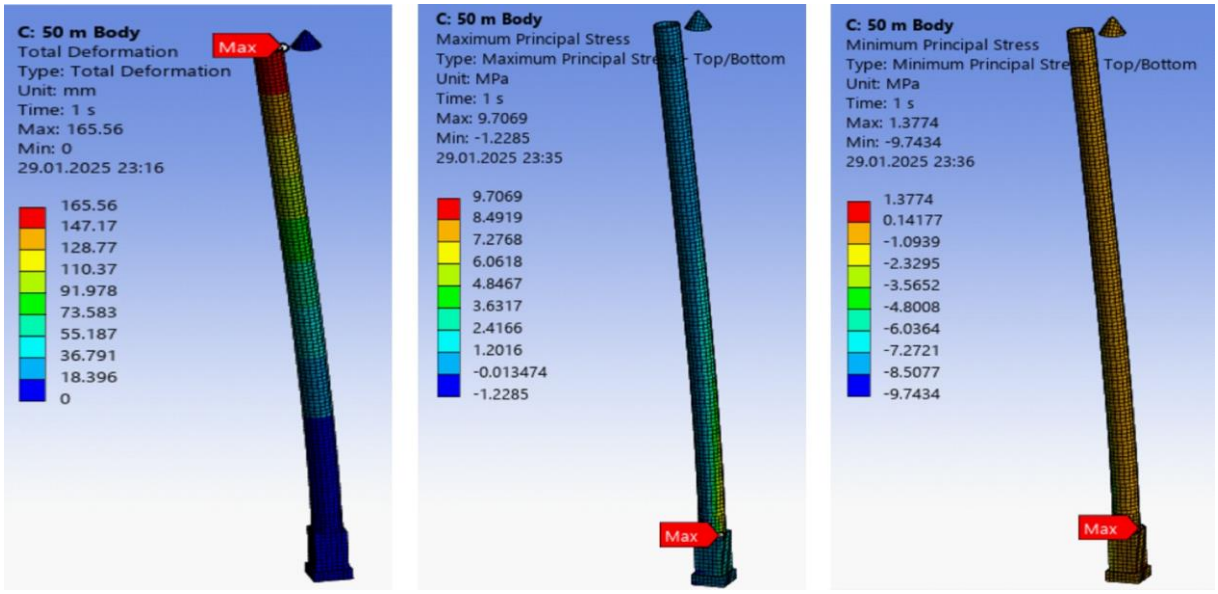


Figure 7. Finite element analysis results of the 57-meter-high minaret

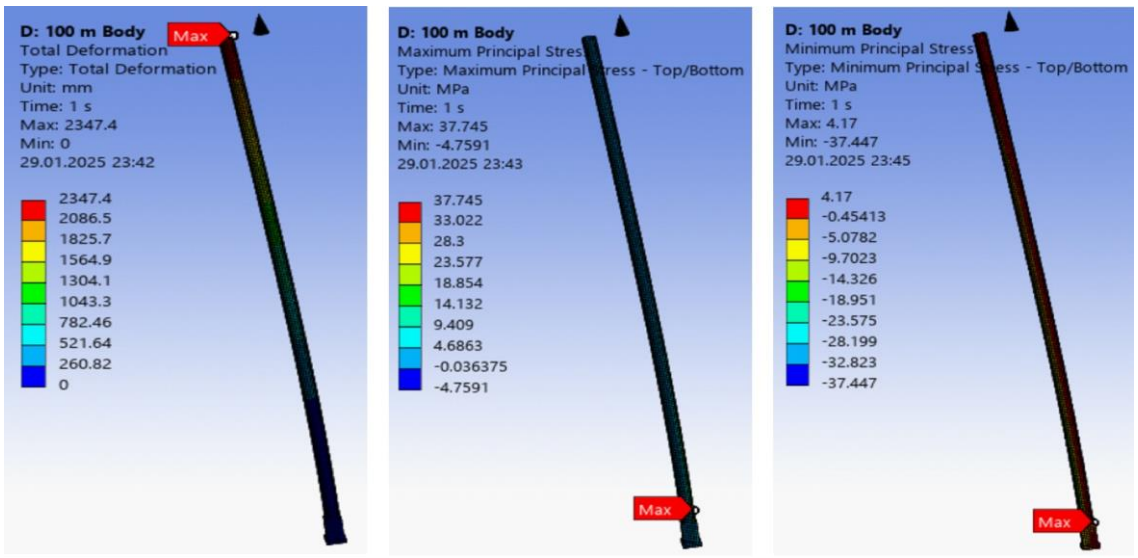


Figure 8. Finite element analysis results of the 107-meter-high minaret

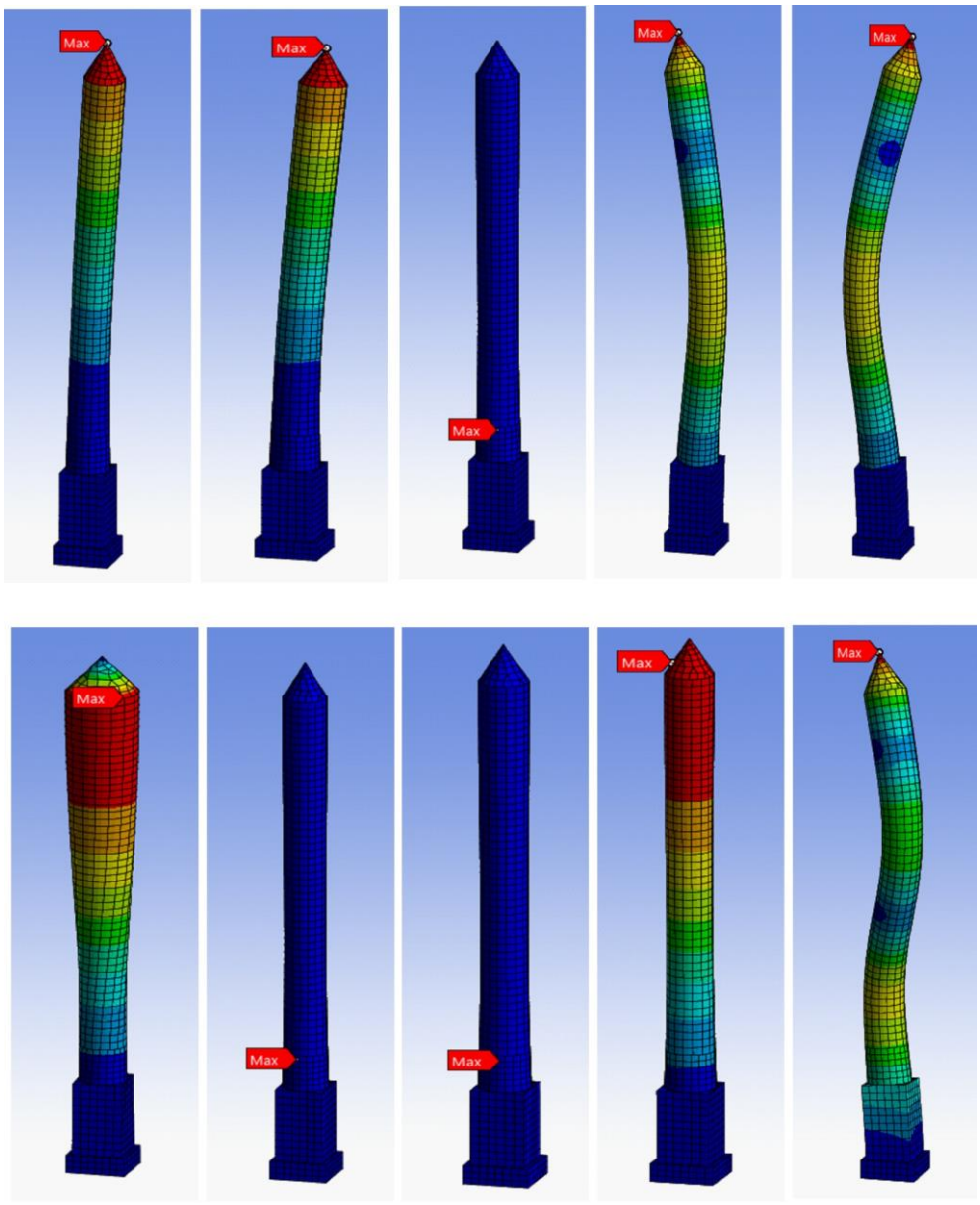


Figure 9. The first 10 modes of the 27-meter-high minaret are presented in order

When the finite element results of the 107-meter-high minaret were examined, it was found that the top point was separated from the cone part and the minaret collapsed by making a horizontal movement of approximately 234 cm. It was found that the principal tensile and compressive stresses in the 107-meter minaret were 24.67 and 24.5 times higher than the 27-meter minaret selected as reference, respectively. According to the analysis results, it was determined that the safest minaret was the 27-meter-high minaret with the lowest minaret body height and was selected as the reference minaret in the subsequent analyses of the study.

Figure 9 presents the modal shapes of the first 10 modes of the 27-meter-high minaret, which is the most suitable height according to the results of this study and the available cross-sectional areas. As seen in the figure, the first and second modes are formed in the x-direction in the axisymmetric plan geometry of the cylindrical shape of the minaret, and the fourth and fifth modes are formed in the y-direction. Torsional mode occurs in the 6th mode. In the 10th mode, buckling mode occurred. The third, seventh, eighth and ninth modes are interpreted to occur on the vertical axis.

Table 3 presents the frequency values of the first 10 modes of the 27-meter-high minaret. The mode frequency values of the 27-meter-high minaret vary between approximately 2.58 Hz and 36.32 Hz.

Table 3. Frequency values of the first 10 modes of the 27-meter-high minaret

Mode Shape No	Frequency (Hz)
1	2.5755
2	2.5766
3	13.356
4	15.703
5	15.709
6	23.432
7	30.495
8	32.05
9	36.021
10	36.318

Table 4 presents the wind loads used according to the height of the minarets. Behavior of the 27-meter-high minaret in extremely strong wind conditions. In order to investigate the behavior of the 27-meter-high minaret in possible extremely strong wind or storm conditions, the displacement, principal tensile and compressive stresses under the loads of the 2nd and 3rd cases presented in Table 4 are given in Figure 10-11.

Table 4. Wind loads

Case No	**Aerodynamic load coefficient (Cf)**	**Suction wind speed pressuse (q) (kN/m^2)**	**Wind Load (W) (kN/m^2)**
1	1.6	0.8	1.28
2	1.6	1.1	1.76
3	1.6	1.3	2.08

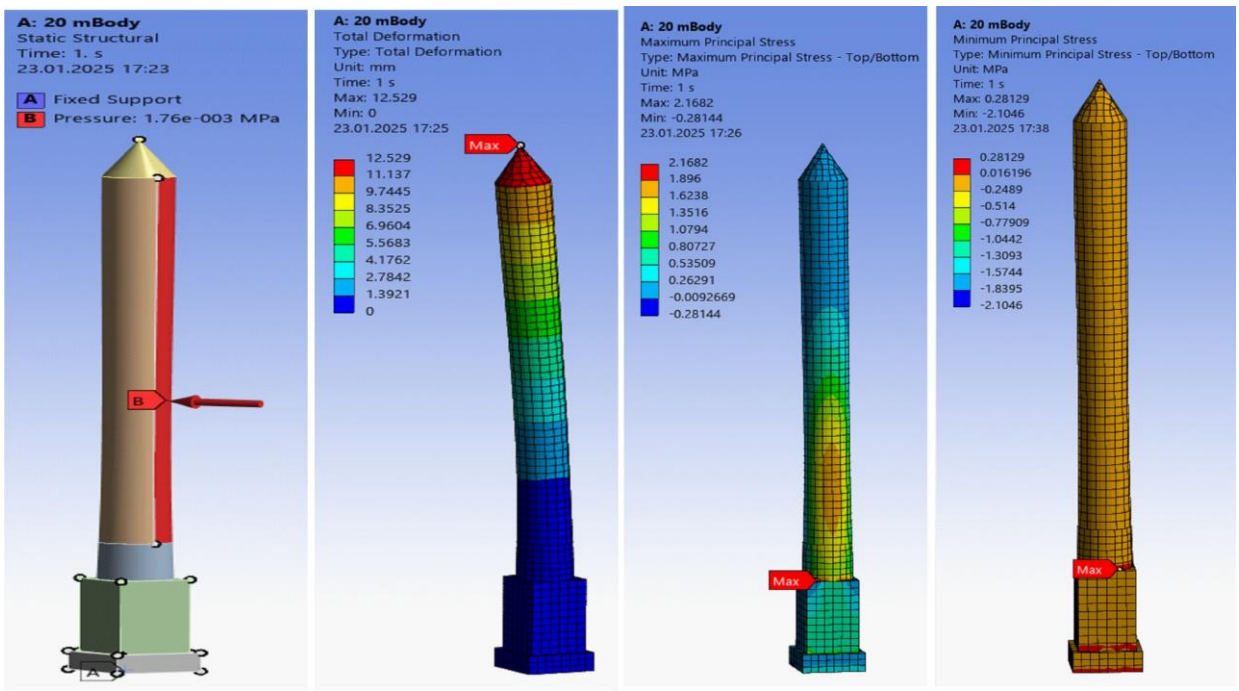


Figure 10. Analysis results of the 27-meter-high minaret under 1.76 kN/m^2 wind load

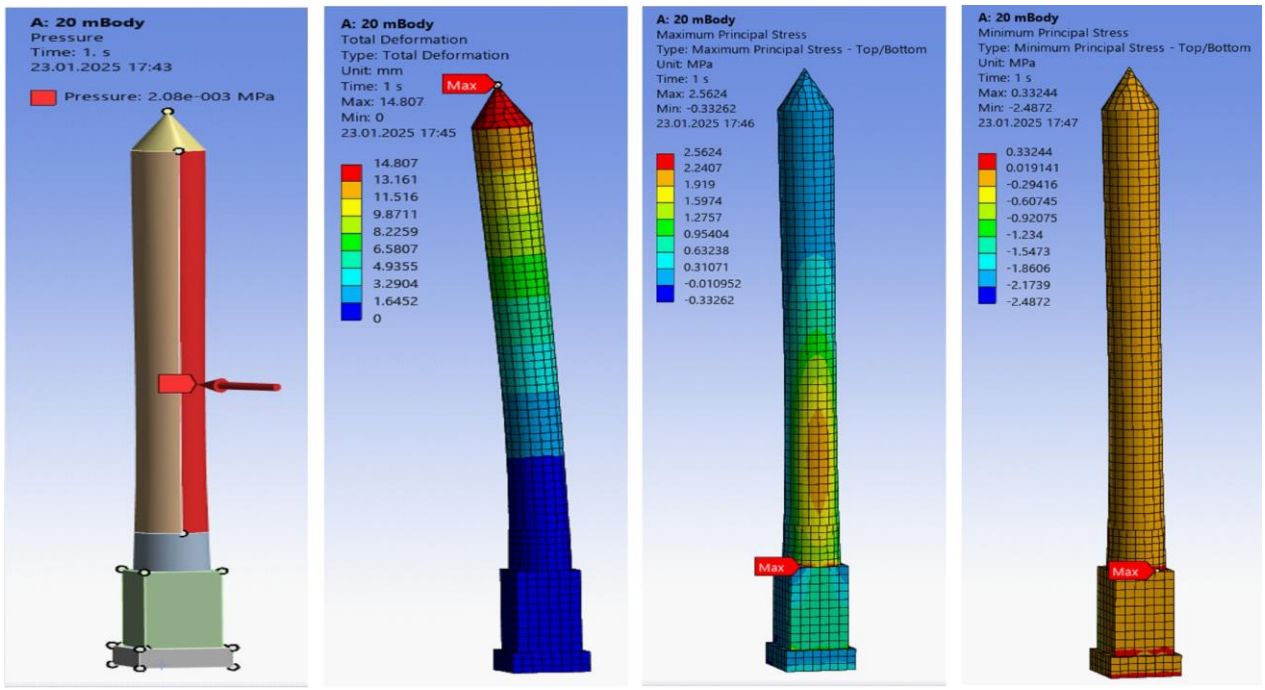


Figure 11. Analysis results of the 27-meter-high minaret under 2.08 kN/m^2 wind load

The results of Figures 6, 10 and 11 are presented comparatively in Table 5.

Table 5. Proposed minaret analysis results after extreme wind load

Case No	Wind Load W (kN/m^2)	Total Displacement (mm)	Max Principal Tensile Stress (MPa)	Max Principal Compression Stress (MPa)
Case 1	1.28	9.11	1.57	1.53
Case 2	1.76	12.53	2.17	2.10
Case 3	2.08	14.81	2.56	2.49

3 strong wind loads were applied to the 27-meter minaret and the results are given comparatively in Table 5. In the second and third cases, where the wind load increased by 37.5% and 62.5%, the total displacement values increased by 3.4 mm and 5.7 mm, respectively. The principal tensile stress values in cases 2 and 3 increased to 2.17 and 2.56 MPa, respectively. The principal compressive stress values in cases 2 and 3 increased to 2.10 and 2.49 MPa, respectively. This situation showed that the height of the minaret is a much more important and effective parameter than the wind intensity in terms of minaret safety.

5. Conclusion

In this study, the collapse of minarets due to strong winds, which has increased in number especially in recent years in Turkey, was taken into consideration. As a result of this research, in which the main body height of the minarets was evaluated in terms of minaret behavior and stresses, the following general outcomes and key findings were obtained.

When the situation depending on the minaret body height was examined in terms of safety, a non-linear increase in displacements and stresses was determined depending on the height as the minaret height increased.

The main body height of the minaret has increased only 2.5 times compared to the low minaret with a main body height of 20 m, but the total displacement value at the top of the minaret has increased approximately 18.4 times.

At a height of 57 meters, the principal tensile stress and principal compressive stress increased by 6.18 and 6.36 times, respectively, compared to that at a height of 27 meters.

Although the height of the main body of the 107-meter minaret has increased 5 times, the stresses have increased approximately 25 times, clearly revealing the structural risk factor that the height of the minaret carries.

It is recommended that high-minaret structures should be designed by taking into account the effects of strong winds along with earthquakes and storm situations where wind forces may reach extreme levels, and that the cross-sectional thickness of the minaret main body should be determined adequately.

In the study conducted according to the height of the main body of the minarets, a minaret height of 27 meters was recommended as the most suitable and safe minaret.

This parametric research study has shown that minaret slenderness is a more effective parameter in minaret structural safety analyses compared to wind load.

While evaluating minaret safety, material strength values are also suggested as a separate study subject.

The importance of minaret geometry in terms of minaret safety under wind loads is a separate issue that needs to be considered and studied in future studies.

Minarets that collapse due to wind effects typically fail by splitting at the transition area. This is primarily because the transition region experiences the highest principal tensile and compressive stresses under the applied wind loads, as revealed by studies. The moment effect also peaks in this area, contributing significantly to the failure. Additionally, the sudden reduction in cross-sectional area at this point causes a sharp increase in stresses, further exacerbating the structural vulnerability.

It should also be kept in mind that the higher the minarets are built, the higher the risk of them collapse over under lateral loads.

Acknowledgement

The author thanks to Zonguldak Bülent Ecevit University and Technical University of Berlin.

Author contribution

The research, literature, finite element modeling, analysis and evaluation parts of the study were carried out by Muhammet Karabulut.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

Diri, K. (2023, May 17). *Ankara'da etkili olan fırtınada 2 caminin minaresi yıkıldı*. İhlas Haber Ajansı. https://www.iha.com.tr/haber-ankarada-etkili-olan-firtinada-2-caminin-minaresi-yikildi-1171144

Doğangün, A., Acar, R., Livaoğlu, R., & Tuluk, Ö. İ. (2006). Performance of masonry minarets against earthquakes and winds in Turkey. *1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures, April 2006*, (pp. 24–27), Cairo, Egypt.

Erdoğan, A. C. (2024, November 24). *Mersin'de şiddetli rüzgar cami minaresini yıktı*. Anadolu Ajansı. https://www.aa.com.tr/tr/gundem/mersinde-siddetli-ruzgar-cami-minaresini-yikti/3403000

Işık, E., Ademović, N., Harirchian, E., Avcil, F., Büyüksaraç, A., Hadzima-Nyarko, M., Akif Bülbül, M., Işık, M. F., & Antep, B. (2023). Determination of Natural Fundamental Period of Minarets by Using Artificial Neural Network and Assess the Impact of Different Materials on Their Seismic Vulnerability. *Applied Sciences (Switzerland), 13*(2), 1-28. https://doi.org/10.3390/app13020809

Karaca, Z., & Erdem, T. (2012). Determination and comparison of wind loads for industrial reinforced concrete chimneys. *The Structural Design of Tall and Special Buildings, 21*, 133–153. https://doi.org/DOI: 10.1002/tal.617

Konuralp, T. (2024, November 23). *İzmir'de şiddetli rüzgar cami minaresinin külahını devirdi*. Anadolu Ajansı. https://www.aa.com.tr/tr/gundem/izmirde-siddetli-ruzgar-cami-minaresinin-kulahini-devirdi/3402379

Küçük, H. (2009). *Comparatıve study of turkısh standards (TS 500 – TS 498) and Russian standards (snıp – gost) for the design and construction regulations of reinforced concrete structures.* [Master Thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science].

NTV. (2020, January 6). *Edirne'de şiddetli rüzgar cami minaresini yıktı*. Anadolu Ajansı. https://www.ntv.com.tr/turkiye/edirnede-siddetli-ruzgar-cami-minaresini-yikti,7yywiSrf_Uuyt2mHB0D2Og

Reşatoğlu, R., Mirata, T., & Karaker, L. (2018). Earthquake and wind load effects on existing RC minarets in north Cyprus. *International Journal of Engineering and Technology(UAE), 7*(4), 3074–3085. https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.16598

Turkish Standard. (2003). *Turkish Standard Design Loads for Buildings 498* (TS 498:91.040.01 Yapılar (Genel)).

Türkeli, E. (2014). Determination and Comparison of Wind and Earthquake Responses of Reinforced Concrete Minarets. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *39*(5), 3665–3680. https://doi.org/10.1007/s13369-014-0999-5

Türkeli, E. (2019). The use of TS498 and TS-EN-1991-1-4 in the Wind Load Calculation of Reinforced Concrete Minarets Considering Soil-Structure Interaction. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *23*, 84–93. https://doi.org/10.19113/sdufenbed.538551

Ural, A., & Firat F. K., (2015). Evaluation of masonry minarets collapsed by a strong wind under uncertainty. *Natural Hazards*, 76, 999–1018. DOI 10.1007/s11069-014-1531-7

Yiyen, İ. B. (2024, November 24). *Kahramanmaraş'ta Sert Rüzgar Minareyi Yıktı*. Manşet. https://www.marasmanset.com/kahramanmarasta-sert-ruzgar-minareyi-yikti

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 234-244 doi: 10.17714/gumusfenbil.1484707 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Karpuz atıkları ve karpuz suyu ile zenginleştirilmiş tam buğday ekmeği üretimi ve duyusal özelliklerinin değerlendirilmesi

Production of bread enriched with watermelon waste and juice and evaluation of its sensory properties

Fatma CEBECİ*[1], Samet VERGİLİ[1], Mustafa KARAMAN[1]

Bayburt Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Beslenme ve Diyetetik Bölümü, 69000, Bayburt

• Geliş tarihi / *Received*: 15.05.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 03.03.2025

Öz

Ekmek, ülkemizde beslenme açısından önemli yer tutan, fazla tüketilen bir gıdadır. Bu nedenle ekmeğin zenginleştirilmesiyle besleyici değerinin artırılması üzerine çalışmalar, halkımızın sağlıklı ve dengeli beslenebilmesi açısından önemlidir. Karpuz, gıda endüstrisinde işlenmesi sırasında %30-41 kısmının kabuk ve %2'lik kısmının ise çekirdek yan ürünü açığa çıkaran bir meyvedir. Bu çalışmada karpuz atıklarının ve karpuz suyunun ekmeğin zenginleştirilmesinde kullanılmasıyla biyoaktif özelliği iyileştirilmiş ekmek üretimi hedeflenmiştir. Üretilen ekmek, kontrol tam buğday ekmeğiyle karşılaştırılmıştır. Duyusal analiz sonuçlarına göre kontrol tam buğday ekmeğiyle (KE) karşılaştırıldığında karpuz atıkları ve karpuz suyu ile zenginleştirilmiş ekmeğin (KAZE) renk, koku, gözenek yapısı, tekstür, çiğnenebilirlik, lezzet ve genel beğeni açısından farklı bulunmadığı gözlenmiştir (t testi, $p>0.05$). Toplam fenolik madde içeriği açısından kuru örneğin gramı başında KAZE ve KE örneklerinde sırasıyla 0.86±0.02 mg gallik asit eşdeğer cinsinden (GAE) ve 0.43±0.01 mg GAE değerleri bulunmuştur. Sırasıyla KAZE ve KE kuru örneklerinin gramı başına DPPH metodunda; 0.40±0.04 mg askorbik asit eşdeğeri (AAE) ve 0.30±0.04 mg AAE, ABTS metodunda; 1.13±0.05 mg AAE ve 0.62±0.02 mg AAE değerleri saptanmıştır. Sonuçlar KAZE örneğinin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite değerleri açısından KE örneğinden daha zengin olduğunu göstermektedir ($p<0.05$).

Anahtar kelimeler: Antioksidan aktivite, Duyusal analiz, Karpuz atıkları, Toplam fenolik madde, Zenginleştirilmiş ekmek

Abstract

Bread is a widely consumed food that has an important place in terms of nutrition in Turkiye. Consequently, studies on enhancing the nutritional value of bread by enrichment are important for people to have a healthy and balanced diet. Watermelon is a fruit that produces 30-41% of the skin and 2% of the seed by-product during processing in the food industry. In this study, it was aimed to produce bread with improved bioactive properties by using watermelon waste and watermelon juice to enrich bread. The bread produced was compared to control whole wheat bread. According to the sensory analysis results, it was found that the bread enriched with watermelon waste (KAZE) was not different in terms of color, odor, pore structure, texture, chewability, flavor and general liking when compared to the control bread (KE) (t test, $p>0.05$). In terms of total phenolic substance content, 0.86±0.02 mg GAE and 0.43±0.01 mg GAE values per gram of dry sample were found in KAZE and KE samples, respectively. In the DPPH method per gram of KAZE and KE dry samples, respectively; 0.40±0.04 mg AAE and 0.30±0.04 mg AAE, in the ABTS method; 1.13±0.05 mg AAE and 0.62±0.02 mg AAE were determined. The results show that the KAZE sample is richer than the control bread in terms of total phenolic substance and antioxidant activity values ($p<0.05$).

***Keywords**: Antioxidant activity, Sensory analysis, Watermelon waste, Total phenolic content, Enriched bread*

*Fatma CEBECİ; fatmacebeci@bayburt.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Fonksiyonel gıdalar içerdikleri fenolik bileşenler, antioksidanlar sayesinde insan sağlığını olumlu yönde etkilemektedir. Çok çeşitli fonksiyonel gıdalar geliştirilmekle beraber fonksiyonel fırıncılık ürünleri de bulunmaktadır. Bu ürünler arasında ekmek, önemli bir yer tutmaktadır ve ekmeğin zenginleştirilmesiyle besleyici değerinin artırılması da son yıllarda çalışılan bir konudur. Ekmeğe farklı tıbbi aromatik bitkilerin ilavesi (Burnaz vd., 2018; Özdemir vd., 2021), arı poleni ilavesi (Conte vd., 2018) veya gıda tüketim, işleme sırasında açığa çıkan gıda atıkları eklenerek zenginleştirme yapıldığı görülmektedir (Bastos vd., 2014; Habibi Najafi vd., 2016).

Meyveler, vitaminler ve fenolik bileşikler açısından zengin kaynaklar olup farklı meyve türlerinin düzenli tüketiminin, pek çok hastalığın yaygınlığını azalttığı gösterilmektedir. Bu meyveler arasında bulunan karpuz (*Citrullus lanatus*) et, kabuk, yaprak ve tohumlarında farklı konsantrasyonlarda fenolik bileşikler, flavonoidler, karotenler, vitaminler, yağ asitleri, aminoasitler ve sitrülin gibi biyoaktif bileşikler içermektedir. Ayrıca karpuzdaki biyoaktif bileşenler, antioksidan, antidiyabetik, antiinflamatuar, antimikrobiyal gibi farklı aktivitelere de sahiptir (Erhirhie & Ekene, 2013; Ismael vd., 2022). Karpuz kabuğunun bileşimini inceleyen farklı çalışmalar mevcuttur, bu çalışmalara bakıldığında %90.9 oranında nem içeren karpuzun (kuru maddesinde kül %13.02-13.09, yağ %0.92-2.44, protein %6.77-11.17, ham lif %17.28-24 ve karbonhidrat % 56.02 aralığında raporlanmıştır (Al-Sayed & Ahmed, 2013; Feizy vd., 2020). Karpuz ve karpuz kabuğunun belirgin düzeyde kafeik asit, vanilin, sirinjik asit, klorojenik asit ve sinapik asit gibi fenolikleri içerdiği raporlanmıştır (Tlili vd., 2011; Al-Sayed & Ahmed, 2013). Ayrıca çalışmalar karpuzda bulunan bu polifenolik içeriğe bağlı olarak hipertansiyon, yaşa bağlı hastalıklar ve dejeneratif hastalıklar üzerinde olumlu etkiler gösterdiğini belirtmektedir (Figueroa vd., 2011; Burton-Freeman vd., 2021).

Karpuzun gıda endüstrisinde işlenmesi sırasında %30-41 kısmının kabuk ve %2'lik kısmının ise çekirdek yan ürünü olarak elde edildiği görülmektedir (Rico vd., 2020). Atıkların nasıl değerlendirildiğine bakıldığında ülkemizde açığa çıkan karpuz kabuğu atıklarının bir kısmının yurtdışına ihraç edilmesinin yanı sıra reçel üretiminde de kullanıldığı bilinmektedir (Yaman, 2012). Son yıllarda karpuz kabuğu tozunun farklı ürünlere ilave edilmesiyle biyoaktif içeriği, mikrobiyal yükü, raf ömrü, besin değeri gibi özelliklere olan etkisinin inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin; bir çalışma karpuz kabuğu küspesi, tozu ve ekstraktını tereyağına ekleyip ürünün raf ömrü ve mikrobiyal yüküne olan etkisini incelemiştir (Zia vd., 2022). Çelik (2021) tarafından yürütülen çalışmada ise karpuz kabuğu tozu glutensiz kek üretiminde kullanılmış, bir başka çalışma ise kurabiye üretiminde karpuz kabuğu tozunu kullanmıştır (Ashoka vd., 2021). Bu çalışma ise biyoaktif bileşen açısından zengin karpuz atıkları ile karpuz suyunun ekmeğin zenginleştirilmesinde kullanılmasını hedeflemiştir. Çalışmada üretilen zenginleştirilmiş ekmek, kontrol ekmek ile karşılaştırılmıştır. Kontrol ekmek, literatürde daha önce çalışılmış olan tam buğday ekmeği formülasyonuna göre hazırlanmıştır. Bu çalışma öncelikle düşük orandaki karpuz kabuğu, karpuz çekirdeği tozu ve karpuz suyu ilavesinin ekmeğin duyusal ve kimyasal özelliklerini nasıl etkilediğini incelemeyi amaçlamaktadır.

2. Materyal ve metot
2. Material and method

2.1. Materyal
2.1. Material

Ekmek üretiminde kullanılan un, maya, tuz, şeker, shortening yerel bir marketten temin edilmiştir. Hamur hazırlanmasında kullanılan vital gluten, emülgatör, soya unu, fungal alfa amilaz, askorbik asit Kimbiotek Kimyevi Mad. San. Tic. A.Ş.'den (Türkiye) satın alınmıştır. Toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite analizlerinde kullanılan gallik asit Apollo Scientific (İngiltere), askorbik asit ise Merck (Almanya) firmalarından temin edilmiştir. ABTS (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ve DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) ise Sigma-Aldrich (A.B.D.) firmasından satın alınmıştır.

Karpuz suyla yıkanıp toprak, kir vb. maddelerden uzaklaştırılmıştır. Daha sonra karpuz kabuğu ve çekirdeği yenilebilir kısımlardan ayrılmıştır. Karpuz kabukları 2x2 cm olacak şekilde doğranmıştır. Karpuz kabuğu ve çekirdekleri oda koşullarında kuru ve karanlık bir ortamda ön kurutmaya tabi tutulmuştur. Ardından meyve sebze kurutma cihazında (Dalle BY1159, Çin) 50°C'de 20 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutulan karpuz

kabuğu ve çekirdekleri önce mutfak robotunda parçalanıp, ardından kahve öğütücüden geçirilerek toz haline getirilmiş ve ekmek üretiminde kullanılmak üzere -18°C'de saklanmıştır. Karpuzdan geriye kalan yenilebilir kısım mutfak robotunda parçalanıp süzülerek karpuz suyu elde edilmiş ve ekmek üretiminde kullanılmak üzere -18°C'de saklanmıştır.

2.2. Ekmeklerin hazırlanması
2.2. Preparation of breads

Karpuz atıkları ve karpuz suyu ile zenginleştirilmiş ekmek (KAZE) ve kontrol olarak kullanılan tam buğday ekmeği (KE) Tablo 1'de verilen formülasyonlara göre tam buğday unu kullanılarak hazırlanmıştır. Kontrol ekmeğin formülasyonu için literatürde yer alan tam buğday ekmeği formülasyonundan faydalanılmıştır (Paşa, 2010). Ekmekler direkt hamur metoduyla tüm malzemeler tek seferde karıştırılarak üretilmiştir.

Tablo 1. Hamur formülasyonları
Table 1. *Dough formulations*

Malzemeler	KAZE	KE
	Miktar	Miktar
Tam buğday unu	100 g	100 g
Su	75 ml	50 ml
Maya	3 g	3 g
Tuz	1 g	1 g
Şeker	1 g	1 g
Vitalgluten	2 g	2 g
Shortening	1 g	1 g
Emülgatör	0.5 g	0.5 g
Aktif soya unu	0.5 g	0.5 g
Fungal alfa amilaz	0.002 g	0.002 g
Askorbik asit	0.005 g	0.005 g
Karpuz suyu	40 ml	-
Karpuz kabuğu tozu	1 g	-
Karpuz çekirdeği tozu	1 g	-

KAZE; karpuz atıkları ve karpuz suyu ile zenginleştirilmiş ekmek.
KE; kontrol olarak kullanılan tam buğday ekmeği.

Tüm malzemeler karıştırıldıktan sonra hazırlanan hamurlar 30°C'de 30 dakika süreyle kitle fermentasyonuna bırakılmıştır. Ardından 100 g'lık parçalara ayrılan hamura ekmek şekli verilip 30°C'de 40 dakika parça fermentasyonuna bırakılmıştır. Fermentasyon sonunda ekmek hamurları, elektrikli fırında (Arçelik, Türkiye) 200°C'de 30 dakika süreyle pişirilmiştir. Pişirilen ekmekler soğutulduktan sonra duyusal analiz için panelistlere sunulmuştur. Soğuyan ekmekler için ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Ayrıca ekmekler hacimleri kolza tohumuyla yer değiştirme yöntemi kullanılarak cm^3 cinsinden ifade edilmiştir.

2.3. Duyusal analiz
2.3. Sensory analysis

Duyusal analiz cinsiyet dağılımı eşit olacak şekilde Bayburt Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi öğrenci ve akademisyenlerinden oluşan 20 kişilik bir panel ile yürütülmüştür. Katılımcılar öncelikle çalışmayla ilgili bilgilendirilmiş ardından onam formunu okumaları istenmiştir. Herhangi bir alerjisi bulunmadığı teyit edilen katılımcılar duyusal analize panelist olarak seçilmiş ve duyusal değerlendirmeyi nasıl yapacakları konusunda bilgilendirilmiştir. Ekmekler panelistler için kodlanarak tek taraflı körleme yapılmıştır. Duyusal analizde renk, koku, gözenek yapısı, tekstür (yapısal özelliği), çiğnenebilirlik, lezzet ve genel beğeni kriterleri üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Panelistlerden bu kriterlere göre ekmekleri 1'den 7'ye kadar puan vererek (1-aşırı kötü, 2-çok kötü, 3-kötü, 4-orta, 5-iyi, 6-çok iyi, 7-mükemmel) değerlendirmeleri istenmiştir (Altuğ Onoğur & Elmacı, 2011). Sonuçlar, iki farklı ekmek için panelistlerden elde edilen puanların ortalamaları ± standart sapma olarak sunulmuştur.

2.4. Renk analizi
2.4. Color analysis

Ekmekler kurutulup kahve öğütücüden geçirilerek toz haline getirilmiştir. Ekmek örneklerinde kabuk, ekmeğin alt tarafı ve tamamının (toz halinde) renk analizi yürütülmesinde ColorFlex EZ kolorimetre (HunterLab, Virginia, Amerika) kullanılmıştır. Cihazda L* açıklık koordinatı, a* kırmızı/yeşil koordinatı ve b* sarı/mavi koordinatı ölçümleri yapılmıştır.

2.5. Kimyasal analizler
2.5. Chemical analysis

2.5.1. Kuru madde analizi
2.5.1. Dry matter analysis

Kuru madde miktarı AOAC 930.04 numaralı metoda göre belirlenmiştir. Sabit tartıma getirilmiş kaplara 2 g öğütülmüş örnek alınarak etüvde (Memmert, Schwabach, Almanya) 3 saat boyunca 105 ºC de kurutulmuştur. Daha sonra ilk ve son tartımlar arası farktan, örneğe ait toplam kuru madde miktarı yüzde olarak hesaplanmıştır (AOAC, 2015). Analiz 3 tekrarlı olarak yürütülmüş, sonuçlar ortalama ± standart sapma olarak verilmiştir.

2.5.2. Kül miktarı analizi
2.5.2. Ash content analysis

Kül miktarı AOAC 923.03 numaralı standart metoda göre göre belirlenmiştir (AOAC, 2015). Öğütülmüş örneklerden 2 g tartılarak, kül fırınında (Carbolite Gero, İngiltere) 550ºC'de 4 saat süreyle yakılmıştır. Analiz sonrası kül miktarları % olarak hesaplanmıştır. Analiz 3 tekrarlı olarak yürütülmüş, sonuçlar ortalama ± standart sapma olarak verilmiştir.

2.5.3. Toplam fenolik madde analizi
2.5.3. Total phenolic content analysis

Toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite analizleri için ekmeklerden ekstraktlar hazırlanmıştır (Zlatanovic vd., 2019). Bu amaçla 0.4 g örneğe 5.6 ml etanol/su (1:1) karışımı eklenmiş ve oda sıcaklığında 1 saat süreyle çalkalamalı inkübatör kullanılarak (IKA 4000, Almanya) ekstrakte edilmiştir. Ekstraksiyonu takiben örnekler, 4°C'de 15 dakika 4500 *g* kullanılarak (Hettich Universal 320R, Almanya) santrifüj edilmiştir. Berrak üst faz toplanıp toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite tayininde kullanılmıştır.

Toplam fenolik madde (TPC) ölçümü Zlatanović vd. (2019)'a göre Folin-Ciocalteu's metodu kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen ekstraktlardan 0.25 ml alınarak, 1:10 oranında seyreltilmiş 1 ml Folin-Ciocalteu reaktifiyle karıştırılmış ve 6 dakika reaksiyona bırakılmıştır. Bu süre sonunda 1 ml (75 g/l) sodyum karbonat solüsyonu eklenip karıştırılmıştır. Örnekler reaksiyon için 2 saat oda sıcaklığında ve karanlıkta bekletildikten sonra, absorbans değerleri 765 nm'de (Shimadzu UV 1800) ölçülmüştür. Sonuçlar, gallik asit eşdeğer cinsinden mg (GAE)/g kuru örnek olarak ifade edilmiştir. Gallik asit standart eğrisini oluşturmak için 5-100 µg/ml gallik asit konsantrasyonları kullanılmış, eğri elde edilmiş (R^2=0.9971) ve buradan örneklerdeki miktara ulaşılmıştır. Karpuz suyunun toplam fenolik madde içeriğinin belirlenmesinde aynı yöntem kullanılmış, standart eğri elde edilmiş (R^2=0.9970) ve sonuçlar mg GAE/ml örnek şeklinde sunulmuştur.

2.5.4. Antioksidan aktivite analizi
2.5.4. Antioxidant activity analysis

DPPH ile antioksidan aktivite belirlenmesinde Gu vd. (2019) tarafından kullanılan mikroplaka metodu bazı modifikasyonlarla kullanılmıştır. Öncelikle metanol içerisinde 0.1 mM DPPH çözeltisi hazırlanıp, DPPH solüsyonundan 260 µl, uygun düzeyde seyreltilmiş örneklerden ise 40 µl eklenip karıştırılmıştır. Karışım oda sıcaklığında 30 dakika inkübe edildikten sonra absorbans 517 nm'de mikroplaka okuyucu (Multiscan FC Mikroplaka Okuyucu, Thermo Fisher Scientific) kullanılarak ölçülmüştür. Sonuçlar, ağırlığının gramı başına mg askorbik asit eşdeğeri (AAE) olarak ifade edilmiştir (mg AAE/g). Askorbik asit standart eğrisini oluşturmak için ise metanolde 0-50 µg/ml askorbik asit konsantrasyonları kullanılmış, eğri elde edilmiş (R^2=0.9974) ve buradan örneklerdeki miktara ulaşılmıştır. Karpuz suyunun antioksidan aktivite

belirlenmesinde aynı yöntem kullanılmış, standart eğri elde edilmiş (R^2=0.9989) ve sonuçlar mg AAE/ml örnek şeklinde sunulmuştur.

ABTS ile antioksidan aktivite belirlenmesinde Gu vd. (2019) tarafından kullanılan mikroplaka metodu bazı modifikasyonlarla kullanılmıştır. Öncelikle, 5 ml 7 mM ABTS çözeltisi ile 88 µL 140 mM potasyum persülfat çözeltisi ile karıştırılmış, karışım 16 saat boyunca oda sıcaklığında karanlıkta bekletilmiştir. Daha sonra 0.5 ml ABTS çözeltisi, 45 ml etanol eklenerek seyreltilmiş ve absorbansı 734 nm'de 0.7 olacak şekilde ayarlanıp ABTS ölçüm çözeltisi hazırlanmıştır. Ardından örnekler (10 µl) ve 290 µl hazırlanan ABTS ölçüm çözeltisi karıştırılmış, oda sıcaklığında 6 dakika inkübe edilmiştir. Absorbans 734 nm'de mikroplaka okuyucu (Multiscan FC Mikroplaka Okuyucu, Thermo Fisher Scientific) kullanılarak ölçülmüştür. Sonuçlar, ağırlığının gramı başına mg askorbik asit eşdeğeri (AAE) olarak ifade edilmiştir (mg AAE/g). Askorbik asit standart eğrisini oluşturmak için ise metanolde 0-100 µg/ml askorbik asit konsantrasyonları kullanılmış, eğri elde edilmiş (R^2=0,9978) ve buradan örneklerdeki miktara ulaşılmıştır. Karpuz suyunun antioksidan aktivite belirlenmesinde aynı yöntem kullanılmış, standart eğri elde edilmiş (R^2=0.9952) ve sonuçlar mg AAE/ml örnek şeklinde sunulmuştur.

2.6. İstatistiksel analizler
2.6. Statistical analysis

Verilerin istatistiksel analizinde IBM SPSS Statistics Versiyon 22 programı kullanılmış, sonuçlar üç tekrarın ortalaması ± standart sapma olacak şekilde sunulmuştur. Ortalamalar arasındaki istatistiksel anlamlılık t testi veya tek yönlü ANOVA ve tukey testi kullanılarak (%95 güven aralığında) saptanmış ve $p<0.05$ değeri istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.

3.Bulgular ve tartışma
3.Results and discussion

3.1. Ekmeklerin fiziksel özellikleri
3.1. Physical properties of bread

Ekmeklerin kabarma sonuçlarına göre sırasıyla KAZE ve KE örneklerinin yükseklik değerleri 5.57±0.07 ve 5.11±0.25 cm olarak bulunmuştur. Örnekler arasında kabarma yüksekliği açısından farklılık bulunmakta ($p<0.05$) ve KAZE örneğinin daha fazla kabarmış olduğu görülmektedir. Yapılan hacim ölçümlerinde KE örneklerinde ortalama 192±2.83 cm^3 olarak saptanan hacim, KAZE örneklerinde 240.67±6.43 cm^3 olarak gözlenmiştir ve istatistiksel anlamda daha yüksektir ($p<0.05$). 100g olarak ayarlanan hamur ağırlıkları pişirme sonrası da ölçülerek hesaplanan fire oranları KAZE ve KE örnekleri için sırasıyla %21.72±0.75 ve %29.77±1.06 olup örnekler arasındaki farklılık istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur ($p<0.05$). Hazırlanan ekmeklerin kesit görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir ve renk analizi sonuçları Tablo 2'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre karpuz atıkları ve karpuz suyu ilavesi, ekmeklerin L* değerlerini azaltmış ($p<0.05$), daha koyu renkli ekmekler elde edilmiştir.



Şekil 1. Ekmeklerin görseli. KAZE; karpuz atıkları ve karpuz suyu ile zenginleştirilmiş ekmek. KE; Kontrol olarak kullanılan tam buğday ekmeği.
Figure 1. *Image of breads. KAZE; watermelon waste and juice enriched bread. KE; whole wheat bread as control.*

Kontrol ekmeğe kıyasla KAZE örneklerinin daha fazla kabardığı, ekmek yüksekliğinin istatistiksel açıdan farklı olacak şekilde etkilendiği görülmektedir. Karpuz kabuğu tozunun kek üretiminde kullanılmasının araştıran benzer çalışmalar düşük miktarlardaki karpuz kabuğu ilavesinin kek hacmini artırdığını bildirmiştir (Al-Sayed & Ahmed, 2013; Hoque & Iqbal, 2015). Örneğin; tamamen buğday unundan yapılan kontrol keke kıyasla, un içeriği %2.5 ve %5 karpuz kabuğu tozu ile ikame edilen kek örneklerinin daha fazla kabardığı raporlanmıştır ancak %5'in üzerindeki karpuz kabuğu tozu ilavesinde kek hacminin olumsuz etkilendiği de bildirilmiştir (Al-Sayed & Ahmed, 2013). Benzer tablo Hoque & Iqbal (2015) tarafından yürütülen çalışmada da raporlanmış ve una katılan karpuz kabuğu tozu ilavesi %10 iken kontrole göre hacmin artış gösterdiği ancak %10'un üzerine çıktığında hacmin azaldığı bildirilmiştir. Düşük karpuz kabuğu tozu ilavesi yapılan durumlarda karpuz kabuğu tozundaki diyet lifinin hamurun su tutma kapasitesini artırması sonucu hacmin olumlu yönde etkilendiği (Hoque & Iqbal, 2015) ancak karpuz kabuğu tozu ilavesi oranı arttıkça hamur ağırlığının artması sonucu hacmin olumsuz yönde etkilenebileceği raporlanmıştır (Al-Sayed & Ahmed, 2013). Karpuz kabuğu tozu ilavesinin ekmek üzerine etkilerini inceleyen çalışmada ise ekmek üretiminde kullanılan un %3-12 aralığında karpuz kabuğu tozu ile ikame edilmiş ve karpuz kabuğu tozu eklenen ekmeklerin kontrol ekmeklere göre daha düşük bir hacim gösterdiği bildirilmiştir (El Baldry vd., 2014). Çalışmamızda düşük oranda (1 g) karpuz kabuğu tozu kullanılmış ayrıca karpuz çekirdeği tozu ve karpuz suyu da eklenmiştir. Karpuz çekirdeği tozunun un ikamesi olarak ekmek üretiminde kullanıldığı çalışmada karpuz çekirdeği tozu eklenen ekmeklerin kontrol ekmeklere göre daha yüksek hacme sahip olduğu bildirilmiştir (Bolaji vd., 2022). Literatürde karpuz suyunun ekmek hacmine olan etkisi üzerine bir çalışma bulunmadığından karşılaştırma yapılamamıştır ancak karpuz suyunda bulunan şeker içeriğinin fermentasyon hızını ve gaz oluşumunu olumlu yönde etkileyerek ekmek hacminin artışına katkı sağladığı düşünülmektedir.

Tablo 2. Renk analizi sonuçları
Table 2. *Color analysis results*

Örnekler	L		a		b	
	KAZE	**KE**	**KAZE**	**KE**	***KAZE***	***KE***
Tümü (toz)	69.30±0.17^{b}	70.90±0.26^{a}	7.05±0.3^{a}	5.80±0.09^{b}	23.56±0.08^{a}	20.94±0.06^{b}
Kabuk	30.92±0.31^{b}	46.04±0.83^{a}	11.63±0.14^{b}	12.57±0.16^{a}	16.63±0.05^{b}	26.08±0.31^{a}
Alt	25.11±0.31^{b}	33.66±0.74^{a}	8.95±0.31^{a}	13.93±0.32^{a}	9.73±0.55^{b}	21.78±0.86^{a}

KAZE; karpuz atıkları ve karpuz suyu ile zenginleştirilmiş ekmek. KE; kontrol olarak kullanılan tam buğday ekmeği. Cihazda L* açıklık koordinatı (L*=0 siyahı gösterir ve L*=100 beyazdır), a* kırmızı/yeşil koordinatı (+a* kırmızıyı, – a* ise yeşili belirtir) ve b* sarı/mavi koordinatıdır (+b* sarıyı, -b* ise maviyi belirtir).
Sonuçlar 3 tekrarın ortalaması±standart sapma olarak sunulmuştur. Farklı harfler istatistiksel açıdan önemli farklılıkları göstermektedir (t testi, $p<0.05$).

3.2. Duyusal analiz
3.2. Sensory analysis

Hazırlanan KAZE ve KE örnekleri (Şekil 1) için duyusal analizde renk, koku, gözenek yapısı, tekstür (yapısal özelliği), çiğnenebilirlik, lezzet ve genel beğeni kriterleri üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Değerlendirme sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur. Duyusal analiz parametreleri için ortalamaların 5 üstünde olduğu görülmektedir (5-iyi). Sonuçlar, kontrol tam buğday ekmeğiyle karşılaştırıldığında KAZE örneğinin renk, koku, gözenek yapısı, tekstür, çiğnenebilirlik, lezzet ve genel beğeni açısından farklı bulunmadığını göstermektedir (t testi, $p>0.05$).

Tablo 3. Duyusal analiz sonuçları
Table 3. *Sensory analysis results*

Örnekler	Renk	Koku	Gözenek Yapısı	Tekstür	Çiğnenebilirlik	Lezzet	Genel Beğeni
KAZE	5.45±1.15^{a}	5.35±1.39^{a}	5.35±1.31^{a}	5.30±1.45^{a}	5.75±1.48^{a}	5.55±1.76^{a}	5.60±1.18^{a}
KE	5.60±1.23^{a}	5.05±1.31^{a}	5.50±1.23^{a}	5.45±1.47^{a}	5.60±1.43^{a}	5.30±1.17^{a}	5.70±1.17^{a}

KAZE; karpuz atıkları ve karpuz suyu ile zenginleştirilmiş ekmek. KE; kontrol olarak kullanılan tam buğday ekmeği. Sonuçlar 3 tekrarın ortalaması±standart sapma olarak sunulmuştur. Örneklerin duyusal analiz parametreleri arasında istatistiksel olarak fark bulunmamıştır (t testi, $p>0.05$).

Duyusal analiz parametreleri için ortalamaların 5 üstünde olduğu görülmektedir (5-iyi), bu da panelistlerin renk, koku, gözenek yapısı, tekstür, çiğnenebilirlik ve lezzet açısından iki ekmeği de beğendiğini

göstermektedir. Sonuçlar, KE ile karşılaştırıldığında KAZE örneğinin renk, koku, gözenek yapısı, tekstür, çiğnenebilirlik, lezzet ve genel beğeni açısından farklı bulunmadığını göstermektedir (t testi, $p>0.05$).

3.3. Kimyasal analizler
3.3. Chemical analysis

Çalışmada üretilen KAZE ve KE örneklerinin ekmek içi ve kabuk nem değerleri Tablo 4'de verilmiştir. Sonuçlara göre KAZE örneklerinde ekmek içi nem oranı %35.20±0.71, kabuk nem oranı %24.65±0.96 olarak bulunmuştur. KE örneklerinde ise ekmek içi nem oranı %37.21±1.56 iken kabukta % 22.83±0.38 olarak bulunmuştur. Ekmek içi nem değerleri açısından örnekler arasında fark bulunmazken (t testi, $p>0.05$), kabuk nem değerleri arasındaki fark istatiski açıdan önemli bulunmuştur (t testi, $p<0.05$). KE ve KAZE örneklerinin kül miktarları sırasıyla %3.47±0.46 ve %3.88±0.05 bulunmuştur. Örnekler arasında kül miktarları açısından bir farklılık bulunmamaktadır (t testi, $p>0.05$) (Tablo 4).

Tablo 4. Ekmeklerin nem ve kül değerleri
Table 4. *Moisture and ash contents of the breads*

Örnekler	Nem (%)		Kül (%)
	Ekmek içi	Kabuk	
KAZE	35.20±0.71[a]	24.65±0.96[a]	3.88±0.05[a]
KE	37.21±1.56[a]	22.83±0.38[b]	3.47±0.46[a]

KAZE; karpuz atıkları ve karpuz suyu ile zenginleştirilmiş ekmek. KE; kontrol olarak kullanılan tam buğday ekmeği. Sonuçlar 3 tekrarın ortalaması±standart sapma olarak sunulmuştur. Aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel açıdan önemli farklılıkları göstermektedir (t testi, $p<0.05$).

Normal bir beyaz ekmeğin bileşimine bakıldığında %37.0 su, % 50.5 karbonhidrat, % 8.7 protein, % 3.2 yağ ve % 2.0 kül olduğu görülmektedir (Elgün & Ertugay, 2002). Zenginleştirme amacıyla ekmeğe farklı protein veya biyoaktif bileşen içeriği yüksek gıdaların eklendiği durumlarda ise kül miktarı farklılık göstermektedir. Piyasada satılan farklı ekmeklerin özelliklerinin değerlendirildiği bir çalışmada incelenen tam buğday ekmeklerinin %1.4-3.5 aralığında değişmekle beraber ortalama %2.4±0.4 kül içerdiği görülmüştür (Karaağoğlu vd., 2008). Karpuz kabuğu tozu ilavesinin ekmek üzerine etkilerini inceleyen çalışmada ekmek üretiminde kullanılan un, artan oranlarda (%3-12 aralığında) karpuz kabuğu tozu ile ikame edildiğinde karpuz kabuğu tozu oranı arttıkça kül oranının da arttığı gözlenmiştir (El-Badry vd., 2014). Benzer şekilde kek üretiminde artan oranlarda karpuz kabuğu tozu ilavesi ile kül miktarının arttığı bildirilmiştir (Al-Sayed & Ahmed, 2013). Diğer yandan karpuz çekirdeği tozunun tam buğday ekmeği üretiminde kullanıldığı bir çalışmada ise karpuz çekirdeği tozu oranı arttıkça kül oranının azaldığı raporlanmıştır (Bolaji vd., 2022). Çalışmamızda ekmek üretiminde hem karpuz kabuğu hem de karpuz çekirdeği tozu ilavesi yapılmış ve sonuç olarak KAZE örneğinin kül oranı KE örneğinden farklı bulunmamıştır ($p>0.05$).

Hazırlanan örnekler arasında ekmek içi açısından % nem farkı bulunmazken, KAZE örneğinin kabuktaki nem içeriği daha yüksek bulunmuştur ($p<0.05$). Literatürde karpuz kabuğu tozu ilavesinin kek üretiminde test edildiği çalışmada karpuz kabuğu tozu oranı arttıkça nem oranının da arttığı raporlanmış ve bu durum karpuz kabuğu tozundaki diyet lifi içeriğinin su tutma özelliğine bağlanmıştır (Hoque & Iqbal, 2015). Ekmek üretiminde karpuz kabuğu tozu kullanan çalışmada un yerine %3 oranında karpuz kabuğu tozu ile ikame edilen ekmeğin nem içeriği kontrol ekmekle benzer iken karpuz kabuğu tozu oranı arttıkça (%6, %9, %12) nem oranının da arttığı gözlenmiştir (El-Baldry vd., 2014). Tam buğday ekmeği üretiminde karpuz çekirdeği tozu kullanan çalışma ise kontrol tam buğday ekmeğiyle kıyaslandığında en yüksek nem içeriğinin un yerine %10 karpuz çekirdeği tozu içeren ekmekte gözlendiğini bildirmiştir (Bolaji vd., 2022). Sonuç olarak karpuz atıkları ilavesinin ekmek ve kek gibi ürünlerde nem içeriğini artırdığı söylenebilir. Çalışmamızda bu çalışmalardan farklı olarak hem kabuk hem ekmek içi nem analizi yapılmış ve üretilen KAZE örneğinin sadece kabuk kısmında bu artış gözlenmiştir.

Çalışmada ekmeğe eklenmek üzere hazırlanan karpuz çekirdeği ve karpuz kabuğu tozlarının (Şekil 2) ve karpuz suyunun toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite ölçümleri yapılmıştır. Karpuz çekirdeği tozu ve karpuz kabuğu tozu ve karpuz suyunun toplam fenolik madde içeriği sırasıyla 0.39±0.00 mg GAE/g kuru örnek, 1.14±0.11 mg GAE/g kuru örnek ve 0.07±0.00 mgGAE/ml örnek olarak bulunmuştur. DPPH yöntemine göre antioksidan aktivite, karpuz çekirdeği tozu 0.39±0.02 mg AAE/g kuru örnek iken karpuz kabuğu tozunda

1.08±0.05 mg AAE/g kuru örnek olarak ölçülmüştür. Karpuz suyunda ise 0.05±0.00 mg AAE/ml örnek olarak belirlenmiştir. ABTS yönteminde ise benzer şekilde karpuz çekirdeği tozunda antioksidan aktivite 0.79±0.01 mg AAE/g kuru örnek iken, karpuz kabuğu tozunda 1.50±0.03 mg AAE/g kuru örnek olarak belirlenmiştir. Karpuz suyunda ise bu değer 0.09±0.00 mg AAE/ml örnek olarak saptanmıştır (Tablo 5).



Şekil 2. Karpuz çekirdeği ve kabuğu tozunun görseli
Figure 2. *Image of watermelon seed and rind powders*

Tablo 5. Karpuz kabuğu, karpuz çekirdeği tozları ve karpuz suyunun toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite değerleri
Table 5. *Total phenolic content and antioxidant activity values of watermelon rind, seed powders and watermelon juice*

Örnekler	**TFM** (mg GAE/g kuru örnek) ∗(mg GAE/ml örnek)	**DPPH** (mg AAE/g kuru örnek) ∗(mg AAE/ml örnek)	**ABTS** (mg AAE/g kuru örnek) ∗(mg AAE/ml örnek)
Karpuz çekirdeği tozu	0.39±0.00^{b}	0.39±0.02^{b}	0.79±0.01^{b}
Karpuz kabuğu tozu	1.14±0.11^{a}	1.08±0.05^{a}	1.50±0.03^{a}
Karpuz suyu∗	0.07±0.00^{c}	0.05±0.00^{c}	0.09±0.00^{c}

TFM; toplam fenolik madde. GAE; gallik asit eşdeğeri. AAE; askorbik asit eşdeğeri. Sonuçlar 3 tekrarın ortalaması±standart sapma olarak sunulmuştur. ∗Sonuçlar karpuz suyunda ml örnek için sunulmuştur. Aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel açıdan önemli farklılıkları göstermektedir (ANOVA, $p<0.05$).

Sonuçlara göre karpuz kabuğu tozunda toplam fenolik madde içeriği ve toplam antioksidan aktivitesi karpuz çekirdeği tozu ve karpuz suyundan daha yüksektir (ANOVA, $p<0.05$). Neglo vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada karpuzun farklı kısımlarının toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite özellikleri incelenmiş ve çalışmamızla benzer sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite karpuzun dış kabuk kısmında elde edilirken, en düşük değerler tüketilen iç kısımda saptanmıştır. Çalışmamızda da karpuzun iç kısmından elde edilen karpuz suyunun toplam fenolik madde içeriği ve antioksidan aktivite değerleri diğer kısımlara göre düşük bulunmuştur.

Çalışmamızda karpuz kabuğu tozu için belirlenen toplam fenolik madde içeriği literatürdeki bazı çalışmalardan daha düşük bulunmuştur. Örneğin; karpuz kabuğunu toz halinde glutensiz kek elde etmek için kullanan bir çalışmada hazırlanan toplam fenolik madde içeriği 1.89 mg GAE /g kuru örnek olarak saptanmıştır (Çelik, 2021). Farklı çalışmalarda elde edilen sonuçların çalışmamızdan farklı sonuçlar sunması meyvelerin fenolik bileşiminin varyete, mevsimsel koşullar vb. pek çok faktöre bağlı olarak değişmesiyle açıklanabilir.

Toplam fenolik madde içeriği açısından bakıldığında KAZE ve KE örneklerinde sırasıyla 0.86±0.02 mg GAE/g örnek ve 0.43±0.01 mg GAE/g örnek değerleri bulunmuştur. Sırasıyla KAZE ve KE kuru örnekleri için DPPH metodunda; 0.40±0.04 mg AAE/g örnek ve 0.30±0.04 mg AAE/g örnek, ABTS metodunda; 1.13±0.05 mg AAE/g örnek ve 0.62±0.02 mg AAE/g örnek değerleri saptanmıştır. Sonuçlar KAZE örneğinin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite değerleri açısından KE'den daha zengin olduğunu

göstermektedir ($p<0.05$) (Tablo 6). KAZE örneğine kontrolden farklı olarak eklenen karpuz atıkları biyoaktif özelliği iyileştirmiştir. Eklenen karpuz suyunun toplam fenolik madde içeriği ve antioksidan aktivite değerleri incelenen diğer kısımlara göre düşük bulunmuştur. Literatürde karpuz suyu ve karpuz çekirdeği tozunun fırıncılık ürünlerinin biyoaktif özellikleri üzerine etkisini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Diğer yandan karpuz kabuğu tozunun fırıncılık ürünlerinde kullanımının toplam fenolik madde ve antioksidan içeriği iyileştirdiğine dair çalışmalar mevcuttur. Örneğin; karpuz kabuğu tozunu glutensiz kek üretiminde kullanan bir çalışmada, keklere karpuz kabuğu tozu ikame edilmesiyle toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite değerleri önemli düzeyde artış sağlamıştır (Çelik, 2021). Aynı şekilde buğday ununu %3-12 aralığında karpuz kabuğu tozu ile ikame ederek tava ekmeği üreten bir çalışmada benzer sonuçlar elde edilmiş ve karpuz kabuğu tozu oranı arttıkça toplam fenolik madde ve antioksidan aktivitenin de belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir (Badr, 2015). Bisküvi üretiminde karpuz kabuğu tozunu kullanan çalışma da un yerine karpuz kabuğu tozu ikame oranı arttıkça toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite değerlerinde artış raporlamıştır (Naknaen vd., 2016).

Tablo 6. Ekmeklerin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite değerleri
Table 6. *Total phenolic content and antioxidant activity values of the breads.*

Örnekler	TFM	DPPH	ABTS
	(mg GAE/g kuru örnek)	(mg AAE/g kuru örnek)	
KAZE	0.86±0.02[a]	0.40±0.04[a]	1.13±0.05[a]
KE	0.43±0.01[b]	0.30±0.04[b]	0.62±0.02[b]

KAZE; karpuz atıkları ve karpuz suyu ile zenginleştirilmiş ekmek. KE; kontrol olarak kullanılan tam buğday ekmeği. TFM; toplam fenolik madde. GAE; gallik asit eşdeğeri. AAE; askorbik asit eşdeğeri. Sonuçlar 3 tekrarın ortalaması±standart sapma olarak sunulmuştur. Aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel açıdan önemli farklılıkları göstermektedir (t testi, $p<0.05$).

4. Sonuçlar
4. Conclusions

Bu çalışmada karpuz atıkları ve karpuz suyu kullanılarak biyoaktif içeriği yüksek zenginleştirilmiş tam buğday ekmeği üretilmesi hedeflenmiştir. Toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite analiz sonuçlarına göre çalışmada kullanılan una (100g), düşük bir miktarlarda eklenen karpuz kabuğu tozu (1 g) ve karpuz çekirdeği tozu (1 g) ile karpuz suyu ilavesinin ekmeğin fenolik madde içeriğini yükselttiği ve antioksidan aktivitesini iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca, duyusal analiz sonuçlarına göre yapılan ilavelerin ekmeğin beğeni düzeyini olumsuz yönde etkilememesi olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma, ekmeğin zenginleştirilmesi için karpuz kabuğu atıklarının ve karpuz suyunun kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Teşekkür
Acknowledgement

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A desteği kapsamında 1919B012208603 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederiz. Ayrıca renk analizinin yürütülmesinde bizlere destek olan Dr. Tayyibe ERTEN'e teşekkürü borç biliriz.

Yazar katkısı
Author contribution

Fatma CEBECİ: Deney tasarımı, deneylerin yürütülmesi, analiz sonuçlarının yorumlanması ve makale yazımı.
Samet VERGİLİ: Literatür taraması, deneylerin yürütülmesi
Mustafa KARAMAN: Literatür taraması, deneylerin yürütülmesi

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.
Çalışmada yürütülen duyusal analiz için Bayburt Üniversitesi Etik Kurulu'ndan 26.11.2022 tarih ve 104599 sayı numaralı etik kurul izni alınmıştır.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Al-Sayed, H. M. A., & Ahmed, A. R. (2013). Utilization of watermelon rinds and sharlyn melon peels as a natural source of dietary fiber and antioxidants in cake, *Annals of Agricultural Sciences, 58*(1), 83-95. https://doi.org/10.1016/j.aoas.2013.01.012.

Altuğ Onoğur, T. & Elmacı, T. (2011). *Gıdalarda duyusal değerlendirme*. Sidas Medya Ltd. Şti, İzmir, Türkiye.

AOAC (2015). *Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists*. 18th Edition, AOAC, Arlington, 806-814.

Ashoka, S., Shamshad Begum, S., & Vijayalaxmi, K. G. (2021). Byproduct utilization of watermelon to develop watermelon rind flour based cookies. *The Pharma Innovation Journal, 10*(2), 196-199. https://doi.org/10.22271/tpi.2021.v10.i2c.5658

Badr, S.A. (2015). Quality and Antioxidant Properties of Pan Bread Enriched With Watermelon Rind Powder. *Current Science International*, (4), 117-126.

Bastos, S. C., Tavares, T., de Sousa Gomes Pimenta, M. E., Leal, R., Fabrício, L. F., Pimenta, C. J., Nunes, C. A., & Pinheiro, A. C. (2014). Fish filleting residues for enrichment of wheat bread: chemical and sensory characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, *51*(9), 2240–2245. https://doi.org/10.1007/s13197-014-1258-1

Bolaji, O. T., Adeyeye, S. A. O., & Ogunmuyiwa, D. (2022). Quality evalution of bread produced from whole wheat flour blended with watermelon seed flour. *Journal of Culinary Science & Technology*, *22*(4), 607-630. https://doi.org/10.1080/15428052.2022.2068466

Burnaz, N. A., Ertop, M. H., & Karataş, Ş. M. (2018). Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Kullanımı ile ekmeğin fenolik madde içeriğinin zenginleştirilmesi. *Gıda*, *43*(2), 240-249. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/429258

Burton-Freeman, B., Freeman, M., Zhang, X., Sandhu, A., & Edirisinghe, I. (2021). Watermelon and L-citrulline in cardio-metabolic health: Review of the evidence 2000–2020. *Current atherosclerosis reports*, *23*(12), 81. https://doi.org/10.1007/s11883-021-00978-5

Conte, P., Del Caro, A., Balestra, F., Piga, A., & Fadda, C. (2018). Bee pollen as a functional ingredient in gluten-free bread: A physical-chemical, technological and sensory approach. *Lwt*, *90*, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.002

Çelik, C. (2021). *Karpuz kabuğu tozunun glutensiz kekte kullanım potansiyeli* [Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

El-Badry, N., El-Waseif, M. A., Badr, S.A. and Ali, H. E. (2014). Effect of Addition Watermelon Rind Powder on The Rheological, Physiochemical and Sensory Quality Attributes of Pan Bread, *Middle East Journal of Applied Sciences*, *4*(4): 1051-1046.

Elgün, A., & Ertugay, Z. (2002). *Tahıl İşleme Teknolojisi*. Erzurum: Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 297.

Erhirhie, E. O., & Ekene, N. E. (2013). Medicinal values on Citrullus lanatus (watermelon): pharmacological review. *International Journal of Research in Pharmaceutical and Biomedical Sciences*, *4*(4), 1305-1312.

Feizy, J., Jahani, M., & Ahmadi, S. (2020). Antioxidant activity and mineral content of watermelon peel. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, *3*(1), 35-40. https://doi.org/10.22059/jfabe.2020.75811

Figueroa, A., Sanchez-Gonzalez, M. A., Perkins-Veazie, P. M., & Arjmandi, B. H. (2011). Effects of watermelon supplementation on aortic blood pressure and wave reflection in individuals with prehypertension: a pilot study. *American journal of hypertension*, *24*(1), 40-44. https://doi.org/10.1038/ajh.2010.142

Gu, C., Howell, K., Dunshea, F.R., & Suleria, H.A.R. (2019). LC-ESI-QTOF/MS characterisation of phenolic acids and flavonoids in polyphenol-rich fruits and vegetables and their potential antioxidant activities. *Antioxidants (Basel)*, *8*(9), 405. https://doi.org/10.3390/antiox8090405

Habibi Najafi, M. B., Pourfarzad, A., Zahedi, H., Ahmadian-Kouchaksaraie, Z., & Haddad Khodaparast, M. H. (2016). Development of sourdough fermented date seed for improving the quality and shelf life of flat bread: study with univariate and multivariate analyses. *Journal of food science and technology*, *53*, 209-220. doi: 10.1007/s13197-015-1956-3

Hoque, M. & Iqbal, A. (2015). Drying of Watermelon Rind and Development of Cakes from Rind Powder. *International Journal of Novel Research in Life Sciences*, 14-21.

Ismael, R. N., Mustafa, Y. F., & Al-Qazaz, H. K. (2022). *Citrullus lanatus*, a potential source of medicinal products: a review. *Journal of Medicinal and Chemical Sciences*, *5*(4), 607-618. doi: 10.26655/JMCHEMSCI.2022.4.16.

Karaağaoğlu, N., Karabudak, E., Yavuz, S., Yüksek, O., Dinçer, D., Tosunbayraktar, G., & Eren F. H. (2008). Çeşitli ekmeklerin protein, yağ, nem, kül, karbonhidrat ve enerji değerleri. *Gıda*, *33*(1), 19-25. https://dergipark.org.tr/en/pub/gida/issue/6820/91605

Naknaen, P., Itthisoponkul, T., Sondee, A., Angsombat, N. (2016). Utilization of Watermelon Rind Waste as a Potential Source of Dietary Fiber to Improve Health Promoting Properties and Reduce Glycemic Index for Cookie Making, *Food Science*, 25(2): 415-424. doi: 10.1007/s10068-016-0057-z

Neglo, D., Tettey, C. O., Essuman, E. K., Kortei, N. K., Boakye, A. A., Hunkpe, G., ... & Devi, W. S. (2021). Comparative antioxidant and antimicrobial activities of the peels, rind, pulp and seeds of watermelon (Citrullus lanatus) fruit. *Scientific African*, *11*, e00582. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00582

Özdemir, G., Altıner, D. D., & Şahan, Y. (2021). Bazı tıbbi bitkilerle zenginleştirilmiş ekmeklerin duyusal özellikleri ve satın alma niyetine etkisi. *Gıda*, *46*(4), 767-784. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1601972

Paşa, R. E. (2010). *Tam buğday ekmeği üretimi üzerine bir araştırma*. [Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Rico, X., Gullón, B., Alonso, J. L., & Yáñez, R. (2020). Recovery of high value-added compounds from pineapple, melon, watermelon and pumpkin processing by-products: An overview. *Food Research International*, *132*, 109086. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109086

Tlili, I., Hdider, C., Lenucci, M. S., Riadh, I., Jebari, H., & Dalessandro, G. (2011). Bioactive compounds and antioxidant activities of different watermelon (Citrullus lanatus (Thunb.) Mansfeld) cultivars as affected by fruit sampling area. *Journal of food composition and analysis*, *24*(3), 307-314. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.06.005

Yaman, K. (2012). Bitkisel Atıkların Değerlendirilmesi ve Ekonomik Önemi. Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 12(2), 339-348. https://dergipark.org.tr/en/pub/kastorman/issue/17233/180035

Zia, S., Khan, M. R., Aadil, R. M., & Shahid, M. (2022). Development and storage stability of value-added watermelon fruit butter by incorporating watermelon rind byproduct. Journal of Food Processing and Preservation, 46(11), e17031. https://doi.org/10.1111/jfpp.17031

Zlatanović, S., Kalušević, A., Micić, D., Laličić-Petronijević, J., Tomić, N., Ostojić, S., & Gorjanović, S. (2019). Functionality and storability of cookies fortified at the industrial scale with up to 75% of apple pomace flour produced by dehydration. *Foods*, *8*(11), 561. https://doi.org/10.3390/foods8110561

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 245-259 doi: 10.17714/gumusfenbil.1567137 Research Article

Analytical and numerical solutions of some differential equations: a comparative study using Natural transform and Runge-Kutta method

Bazı diferansiyel denklemlerin analitik ve numerik çözümleri: Natural dönüşüm ile Runge-Kutta yöntemi kullanılarak karşılaştırmalı bir çalışma

Hatice MUTİ*[1], Gaye Yeşim TAFLAN[2]

[1]*Samsun University, College of Civil Aviation, Department of Aviation Management, 55420, Samsun*

[2]*Samsun University, Özdemir Bayraktar Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Aircraft Maintenance,55420, Samsun*

• Received: 14.10.2025 • Accepted: 03.03.2025

Abstract

This paper focuses on Natural transform and the Runge-Kutta numerical method. These techniques have been used to analyze blood glucose concentrations and electrical circuits. These examples have been selected to demonstrate the applicability of Natural transform in many different areas. It was aimed to solve electrical circuits, which are generally solved by Laplace transform in engineering literature, with Natural transform and to obtain a comparative solution with Runge-Kutta method, which is a numerical method. These engineering problems defined with differential equations were analyzed using Natural transform. Firstly, the differential equations were written using the Natural transform, then the new equations were solved and applying the inverse transform, the results of the equations were obtained. The fourth-order Runge-Kutta numerical method was the second method employed in this study. The results found with this methods were presented in tables and compared graphically. The results applying Natural transform and Runge–Kutta method are equivalent to exact solution.

Keywords: Glucose concentration, Natural transform, RLC circuit, Runge-Kutta

Öz

Bu çalışma, Naturel dönüşüm ve Runge-Kutta sayısal yöntemi üzerine odaklanmaktadır. Bu teknikler kan şekeri konsantrasyonlarının analizinde ve devre analizlerinde kullanılmıştır. Örnekler, Naturel dönüşümün birçok farklı alanda uygulanabilirliğini göstermek için seçilmiştir. Mühendislik literatüründe genellikle Laplace dönüşümü ile çözülen elektrik devrelerinin Naturel dönüşüm ile çözülmesi ve sayısal bir yöntem olan Runge-Kutta yöntemi ile karşılaştırmalı bir çözüm elde edilmesi amaçlanmıştır. Diferansiyel denklemlerle tanımlanmış bu mühendislik problemleri Natural dönüşümü ile analiz edilmiştir. İlk olarak diferansiyel denklemler Naturel dönüşüm kullanılarak yazılmış, daha sonra yeni denklemler çözülmüş ve ters dönüşüm uygulanarak denklemlerin sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ikinci yöntem, dördüncü dereceden Runge-Kutta sayısal yöntemidir. Bu metotlarla elde edilen sonuçlar tablolar halinde sunulmuş ve grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Naturel dönüşüm ve Runge-Kutta yöntemi uygulanarak elde edilen sonuçların tam çözüme eşdeğer olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: *Glikoz konsantrasyonu, Naturel dönüşüm, RLC devresi, Runge-Kutta*

*Hatice MUTİ; hatice.muti@samsun.edu.tr

1. Introduction

Integral transforms are essential mathematical techniques that are frequently used to solve differential equations and analyze complicated systems in many scientific and technical fields. They are essential in applications including signal processing, control theory, fluid dynamics, and quantum physics because of their capacity to translate differential equations into algebraic equations (Debnath & Bhatta, 2016). Numerous integral transforms, each designed to handle a particular difficulty, have been introduced as a result of the physical science and engineering models' rapid evolution throughout time. These transforms are derived from the different kernel functions in the fundamental integral transform. Fourier and Laplace transforms, which are the oldest and most popular transforms, have been frequently used in many problems before. In recent years, studies in this field have been continuing rapidly. In addition to these, many other transforms have been obtained and used: Sumudu, Natural, Anuj, Sawi, Shehu etc. (Gardner & Barnes, 1942; Bateman, et al., 1954; Lado, 1971; Watugala, 1998; Khan & Khan, 2008; Doetsch, 2013; Mahgoub & Mohand, 2019; Maitama & Zhao, 2019; Kumar et al., 2021). Additionally, generalized forms of these transforms have been extensively studied in the literature. For instance, Natural transform is the particular case of Upadhyaya transform (Upadhyaya, 2019; Upadhyaya et al., 2021).

Among the extensive suite of integral transforms, Natural transform has garnered significant attention due to their properties and wide-ranging applications. This transform not only simplify mathematical problems but also preserve essential characteristics such as scale and units, making them useful in practical applications. This transform has broad applications in fields such as signal processing, control theory, and financial mathematics, exemplifying their versatility and effectiveness in addressing complex mathematical problems. The duality features of the Natural transform with the Laplace and Sumudu transforms, as well as the scale change, weight shift, multiple shift, and convolution theorem, are thoroughly examined by Belgacem and Silambarasan (Belgacem & Silambarasan, 2012). The Natural transform has also dualities with Khalouta integral transforms (Khalouta, 2023).

The Natural transform has been extensively studied in the solution of lineer / nonlinear ordinary differential equations (ODEs) and partial differential equations (Al-Omari, 2013; Rawashdeh & Maitama, 2014, 2015, 2016). It is especially useful in problems involving initial and boundary conditions, and in the realm of fractional calculus for solving Fractional differential equations (FDEs). Alkan and Anaç studied numerical approximation techniques particularly designed for the studied equations are presented. The objective of this study is to use the fractional natural transform decomposition method (FNTDM) to solve the nonlinear time-fractional Korteweg–De Vries (KdV) equation, the nonlinear time-fractional Klein-Gordon equation, and the nonlinear time-fractional Fornberg Whitham equation. By using the recently created hybrid technique, this study seeks to provide novel numerical solutions for the aforementioned equations (Alkan & Anaç, 2024). Köklü studied that the Natural transform converged to the Laplace and Sumudu transform (Köklü, 2020). In 2019, Maitama and Zhao studied that the Shehu transform, which converges to the Natural transform, converges to Laplace and Sumudu transforms (Maitama & Zhao, 2019). Moreover, Kiliçman and Omran generalize the concept of one-dimensional Natural transform to two-dimensional Natural transform namely, double Natural transform (Kiliçman & Omran, 2017). The Natural transform, sharing a dual relationship with the Laplace transform, facilitates the solution of integral and differential equations by maintaining many of the Laplace transform's properties while offering advantages.

Different transform methods have been used in many engineering and applied mathematics studies. Vashi and Timol used Sumudu and Laplace transform to solve applications in physics and circuit theory (Vashi & Timol, 2016). Jadhav et al solved the RL, RC and LC circuit using Sumudu transform (Jadhav et al., 2022). Peker and Çuha used Kashuri Fundo transform for exact solutions of some cardiovascular models (Peker & Çuha, 2023). Silambarasan and Belgacem presented the Natural transform for Maxwell equations (Silambarasan & Belgacem, 2011). Chindhe and Kiwne used Natural transform for Cryptography (Chindhe & Kiwne, 2017). Higazy et al determined the number of infected cells and concentration of infected particles in plasma during HIV-1 infections using Shehu transform (Higazy et al., 2020).

The second method used in this study is the 4th-order Runge Kutta method, which is a numerical method. It is a powerful and versatile tool for solving ODEs. Due to its accuracy and ease of application, it is widely used in scientific and engineering applications. It is widely recognized that the foundational work on Runge-Kutta methods can be traced back to the contributions of Carl Runge (1895) (Runge, 1895), who extended the Euler

method by incorporating multiple derivative evaluations within a single integration step. This extension laid the groundwork for more sophisticated numerical integration techniques. Subsequent advancements were made by Heun (1900) (Heun, 1900) and Wilhelm Kutta (1901) (Kutta, 1901). Heun's work introduced enhancements to the initial Runge method, while Kutta further improved these techniques, particularly with his development of the fourth-order Runge-Kutta methods and initial approaches for higher-order methods (Butcher, 2008).

Runge–Kutta methods have attracted interest, and a number of researchers have contributed to the development of particular approaches as well as more recent developments in the theory. Second-order differential equations have many applications as well. The transform of a second-order initial value problem into an equivalent system of first-order initial value problems has been comprehensively addressed to ensure thoroughness (Iyengar & Jain, 2009). In the realm of second-order differential equations, the contributions of E. J. Nyström (Nyström, 1925) were particularly notable. Nyström not only advanced the theory of numerical methods for first-order differential equations but also devised specialized techniques for effectively addressing second-order problems. The pursuit of higher-order methods continued, culminating in the introduction of sixth-order numerical techniques by Hušta in the mid-20th century (Hušta 1956, 1957). Hušta's work represented a significant leap in the precision and efficiency of numerical integration methods, extending the range of applications for Runge-Kutta type methods. The 4th-order Runge-Kutta method has a local truncation error of O (h^5) and a global error of O (h^4). This makes it highly accurate for most problems, but the step size h must be chosen carefully to balance accuracy and computational cost.

Our aim is to evaluate the accuracy and applicability of both numerical and analytical techniques in solving ODEs by comparing the Runge-Kutta method and the Natural transform. It is also aimed to show that the Runge-Kutta method converges to the exact solution. In this study, for the first-order differential equation, the application of blood glucose concentration was chosen, and for the second-order differential equation, electrical circuits were selected. The results of the Runge-Kutta method and Natural transform are presented in the tables and shown graphically.

2. Methods

The definition and properties of the Natural transform are firstly explained in this section. Then, the 4th-order Runge-Kutta method for first and second-order initial value problems is explained.

2.1. Natural transform

Khan and Khan defined the Natural transform (Khan & Khan, 2008). Belgacem and Silambarasan defined inverse Natural transform and studied some properties (Silambarasan & Belgacem, 2011; Belgacem & Silambarasan, 2012). The Natural transform, on the other hand, shares a dual relationship with the Laplace transform, which enhances its utility in solving integral and differential equations.

On the set of definitions, Natural transform was defined (Khan & Khan, 2008; Belgacem & Silambarasan, 2012):

$$D = \left\{ f(t) :\ \exists N,\ k_1, k_2 > 0,\ |f(t)| < Ne^{t/k_i},\ if\ \ t \in (-1)^i \times [0,\ \infty) \ \right\},$$
$$R(u,s) = N(f) = \int_0^\infty f(ut) e^{-st} dt, \quad s > 0,\ \ u > 0 \tag{1}$$

The Natural transform retains many properties of the Laplace transform while offering unique advantages, such as its straightforward application to problems involving initial conditions and boundary value problems. This transform is particularly useful in fractional calculus, where it aids in the resolution of fractional differential equations by transforming them into algebraic equations, thus simplifying their analysis and solution (Debnath, & Bhatta, 2016).

The most commonly used transformations of Natural transform are given in Table 1 and some of their properties are given in Table 2.

Table 1. Special Natural transforms (Belgacem & Silambarasan, 2012)

$f(t)$	$N[f(t)]$	$f(t)$	$N[f(t)]$
1	$\frac{1}{s}$	$\frac{\sin at}{a}$	$\frac{u}{s^2+a^2u^2}$
t	$\frac{u}{s^2}$	$\cos at$	$\frac{s}{s^2+a^2u^2}$
$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}, n=1,2,\ldots$	$\frac{u^{n-1}}{s^n}$	$\frac{e^{bt}\sin at}{a}$	$\frac{u}{(s-bu)^2+a^2u^2}$
e^{at}	$\frac{1}{(s-au)}$	$e^{bt}\cos at$	$\frac{s-bu}{(s-bu)^2+a^2u^2}$

Table 2. Properties of Natural transform (Khan & Khan, 2008; Belgacem & Silambarasan, 2012)

Comment	Formula of Natural transform
Duality with Laplace transform	$R(s,u)=\frac{1}{u}F(\frac{s}{u})$
Linearity property	$N[af(t)+bg(t)]=aN[f(t)]+bN[g(t)]$
Function derivatives	$N[f'(t)]=\frac{s}{u}R(s,u)-\frac{f(0)}{u}$
	$N[f''(t)]=\frac{s^2}{u^2}R(s,u)-\frac{s}{u^2}f(0)-\frac{f'(0)}{u}$
	$N[f^n(t)]=\frac{s^n}{u^n}R(s,u)-\sum_{k=0}^{n-1}\frac{s^{n-(k+1)}}{u^{n-k}}f^k(0)$
First scale preserving theorem	$N[f(at)]=\frac{1}{a}R(\frac{s}{a},u)$
First shifting theorem	$N[e^{at}f(t)]=\frac{s}{s-au}R\left(\frac{us}{s-au}\right)$

2.2. The Runge-Kutta 4th order method

The Runge - Kutta 4th order (RK4) method is a numerical technique for resolving ordinary differential equations:

$$z'=g(t,z), \quad z(t_0)=z_0 \tag{2}$$

The Runge-Kutta 4th order method is based on the following

$$z_{i+1}=z_i+\frac{1}{6}(l_1+2l_2+2l_3+l_4)h \tag{3}$$

where knowing the value of $z=z_i$ at t_i, we find the value of $z=z_{i+1}$ at t_{i+1} and $h=t_{i+1}-t_i$, $l_1=g(t_i,z_i)$, $l_2=g\left(t_i+\frac{1}{2}h, z_i+\frac{1}{2}l_1h\right)$, $l_3=g\left(t_i+\frac{1}{2}h, z_i+\frac{1}{2}l_2h\right)$, $l_4=g(t_i+h, z_i+l_3h)$.
Let the linear second-order initial value problem be given as

$$m_0(t)z'' + m_1(t)z' + m_2(t)z = q(t), \quad z(t_0) = b_0, \quad z'(t_0) = b_1 \tag{4}$$

Define $w_1 = z$, then we have the system $w_1' = z' = w_2, \quad w_1(t_0) = b_0$. If we substitute them in Equation (4), we get $w_2' = z'' = \frac{1}{m_0(t)}[q(t) - m_1(t)z'(t) - m_2(t)z(t)]$ and the following first-order equation is obtained

$$w'_2 = \frac{1}{m_0(t)}[q(t) - m_1(t)w_2 - m_2(t)w_1], \qquad w_2(t_0) = b_1 \tag{5}$$

The system is given by

$$\begin{bmatrix} w_1' \\ w_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_2 \\ g_2(t, w_1, w_2) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} w_1(t_0) \\ w_2(t_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}$$

where $g_2(t, w_1, w_2) = \frac{1}{m_0(t)}[q(t) - m_1(t)w_2 - m_2(t)w_1]$.

Generally, we may have a system as well

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} g_1(t, z_1, z_2) \\ g_2(t, z_1, z_2) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} z_1(t_0) \\ z(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

In vector notation, denote $\boldsymbol{z} = [z_1 \quad z_2]^t$, $\boldsymbol{g} = [g_1 \quad g_2]^t$, $\boldsymbol{b} = [b_0 \quad b_1]^t$

Then we can create the system

$$\boldsymbol{z}' = \boldsymbol{g}(t, \boldsymbol{z}), \quad \boldsymbol{z}(t_0) = \boldsymbol{b} \tag{7}$$

By expressing the answer in vector form, the techniques developed for the solution of the first-order initial value problem in Equation (2) may be applied to the system of Equations (7), i.e., the second-order initial value problem Equation (6) (Iyengar & Jain, 2009).

3. Application of Natural transform

In this study, differential equations of first and second-order are examined. Blood glucose concentration application for the first order differential equation and circuit analysis applications for the second order differential equation are presented. These illustrations have been chosen to show how Natural transform can be applied in a wide range of contexts.

3.1. The blood glucose concentration

A person's blood glucose concentration is determined at any given time. The blood glucose concentration is modelled mathematically as below (Khidir et al., 2023; Peker & Çuha, 2023):

$$\frac{dC(t)}{dt} + kC(t) = \frac{\beta}{P}, \quad t > 0 \qquad \text{and} \quad C(0) = C_i \tag{8}$$

where *C(t)* is the blood glucose concentration at time *t*, *k* is the constant velocity of the elimination, β is the proportion of the infusion, *P* is the volume in which glucose is distributed, C_i is the initial concentration of glucose in the blood. We will find the concentration of glucose in the blood by using the Natural transform method. The Natural transform of *C(t)* is denoted by $C(s,u)$. Applying the Natural transform on both sides of Equation (8),

$$\frac{s}{u}C(s,u) - \frac{C_i}{u} + kC(s,u) = \frac{\beta}{P}\frac{1}{s} \tag{9}$$

is obtained. Using partial fraction decomposition, *C(s,u)* is found

$$C(s,u) = \frac{C_i}{s+ku} + \frac{\beta}{P}\left(\frac{1}{sk} - \frac{1}{k(s+ku)}\right) \tag{10}$$

Operating inverse Natural transform on both sides of Equation (10), we obtain the concentration of glucose in the blood:

$$C(t) = C_i e^{-kt} + \frac{\beta}{Pk}\left(1 - e^{-kt}\right) \quad (11)$$

The results of both obtained with the Kashuri Fundo transform by Peker and Çuha and obtained with the Anuj transform by Kumar et al. are consistent with those obtained with the Natural transform (Peker & Çuha, 2023; Kumar et al, 2021). Solving this problem greatly helps doctors to determine the patient's exact blood glucose level at any time when receiving continuous intravenous injections.

3.2. Electrical circuits

In this section, circuit analysis for the second order differential equations are presented: series RLC circuit, parallel RLC circuit and two-meshed RL circuit.

3.2.1. Series RLC circuit

In a series RLC circuit, the resistor (R), inductor (L), capacitor (C) and source are connected in series with each other. In this structure, all currents ($i(t)$) are the same. Using Kirchoff's voltage law (KVL), the following equation for the circuit of Figure 1 is obtained:

$$V_R(t) + V_L(t) + V_c(t) = V_k(t) \quad (12)$$

where $V_R(t), V_L(t), V_c(t)$ and $V_k(t)$ are the voltage of resistor, inductor, capacitor and source, respectively and defined as $V_R(t) = Ri(t)$, $V_L(t) = L\frac{di(t)}{dt}$ and $V_C(t) = \frac{1}{C}\int V(t)dt$. When the voltage formulas are substituted in Equation (12),

$$Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C}\int i(t)dt = V_k(t) \quad (13)$$

is obtained. When the derivative of both sides of the equation is taken, the second order differential equation is obtained as:

$$\frac{d^2i(t)}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{LC}i(t) = \frac{1}{L}\frac{dV_k(t)}{dt} \quad (14)$$

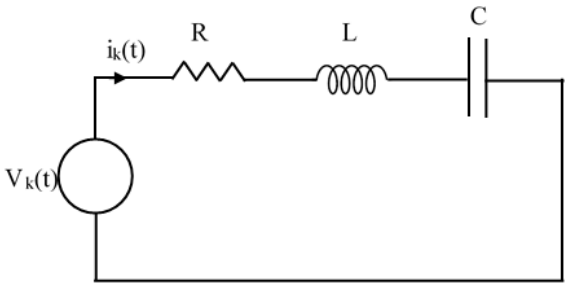


Figure 1. A series RLC circuit (Arifoğlu, 2013)

The circuit of Figure 2 models the ignition system of a car (Irwin & Nelms, 2015). V_S, C, L and R represent voltage source (battery), capacitor, inductor and resistor, which is the internal resistance of the inductor, respectively. And there is also a switch in the circuit. Initially, the resistor, inductor, capacitor are connected to the battery by switching and the capacitor charge up to voltage source. At time t=0, the switch is closed and the capacitor discharges.

We calculate $i_L(t)$ using Natural transform assuming that $V_s = 12V$, $C = \frac{1}{3.8}F$, $L = 200mH$ and $R = 4\Omega$ for the circuit of Figure 2*. The initial conditions are $i_L(0) = 0A, V_c(0) = 12\,V, i_L'(0) = 60A$. Using the initial values the following initial value problem is obtained:

*: In (Irwin & Nelms, 2015), the C value is calculated in the conditions below: it is required to be overdamped, the current (i(t)) reaches at least 1mA within 100ms after switching, and it remains above 1A between 1-1.5s. In this question, the values in (Irwin & Nelms, 2015) are used and $i_L(t)$ is calculated with Natural transform.

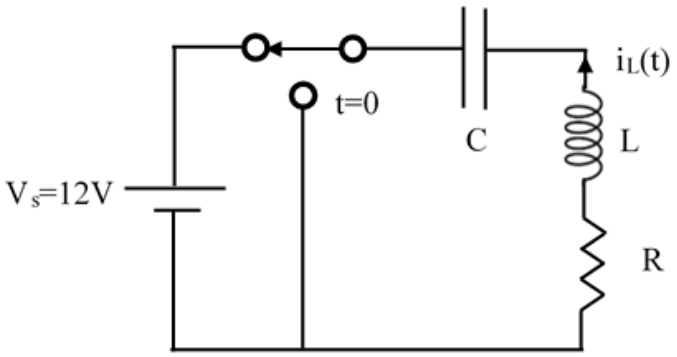


Figure 2. A circuit model of ignition system of a car (Irwin & Nelms, 2015)

$$\frac{d^2i(t)}{dt^2} + 20\frac{di(t)}{dt} + 19i(t) = 0,\ i(0) = 0A,\ i'(0) = 60A \tag{15}$$

The Natural transform of $i(t)$ is denoted by $I(s,u)$. If the Natural transform is applied to Equation (15), we will get

$$\frac{s^2}{u^2}I(s,u) - \frac{s}{u^2}i(0) - \frac{i'(0)}{u} + 20\frac{s}{u}I(s,u) - 20\frac{i(0)}{u} + 19I(s,u) = 0 \tag{16}$$

Substituting the initial values in the Equation (16), $I(s,u)$ is obtained:

$$\frac{s^2}{u^2}I(s,u) - \frac{60}{u} + 20\frac{s}{u}I(s,u) + 19I(s,u) = 0 \tag{17}$$

$$I(s,u) = \frac{60u}{s^2+2su+19u^2} \tag{18}$$

After decomposition, the inverse Naturel transform is taken and the current is obtained:

$$i(t) = \frac{-10}{3}e^{-19t} + \frac{10}{3}e^{-t} \tag{19}$$

3.2.2. Parallel RLC circuit

In a parallel RLC circuit, the resistor, inductor and capacitor are connected in parallel to each other and the source. In this configuration, while the voltage across each component is the same, the currents are different and can be found using Kirchoff's Current Law (KCL). Using KCL, the currents for the circuit of Figure 3 are written as:

$$I_R(t) + I_L(t) + I_c(t) = I_k(t) \tag{20}$$

where $I_R = \frac{V(t)}{R}$, $I_L(t) = \frac{1}{L}\int V(t)dt$ and $I_c(t) = C\frac{dV(t)}{dt}$. Substituting these formulas in Equation (20)

$$\frac{V(t)}{R} + \frac{1}{L}\int V(t)dt + C\frac{dV(t)}{dt} = I_k(t) \tag{21}$$

is obtained. Taking the derivative of both sides, the second-order differential equation is obtained:

$$\frac{d^2V(t)}{dt^2} + \frac{1}{RC}\frac{dV(t)}{dt} + \frac{1}{LC}V(t) = \frac{1}{C}\frac{di_k(t)}{dt} \tag{22}$$

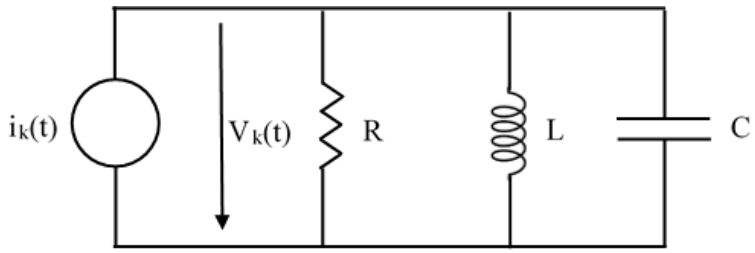


Figure 3. A Parallel RLC circuit (Arifoğlu, 2013)

We determine $V(t)$ in the circuit of Figure 3 using Natural transform assuming that $i_k(t) = 5e^{-2t}$, $R = 4\Omega$, $L = 8H$, $C = \frac{1}{8}F$, $V'(0) = 0$ and $V(0)$=0 (Arifoğlu, 2013). Using the initial values the following initial value problem is obtained:

$$\frac{d^2V(t)}{dt^2} + 2\frac{dV(t)}{dt} + V(t) = -80e^{-2t},\ V(0) = 0,\ V'(0) = 0 \tag{23}$$

$V(s,u)$ denotes the Natural transform of $V(t)$. Taking the Natural transform of Equation (23), then we will reach

$$\frac{s^2}{u^2}V(s,u) - \frac{s}{u^2}V(0) - \frac{V'(0)}{u} + 2\frac{s}{u}V(s,u) - 2\frac{V(0)}{u} + V(s,u) = \frac{-80}{s+2u} \tag{24}$$

Substituting the initial values in the equation, $V(s,u)$ is obtained:

$$V(s,u) = \frac{-80\ u^2}{(s+2u)(\ s^2+2su+u^2)} \tag{25}$$

Taking inverse Natural transform, we get

$$V(t) = -80e^{-2t} + 80e^{-t} - 80te^{-t} \tag{26}$$

3.2.3. Two-mesh circuit

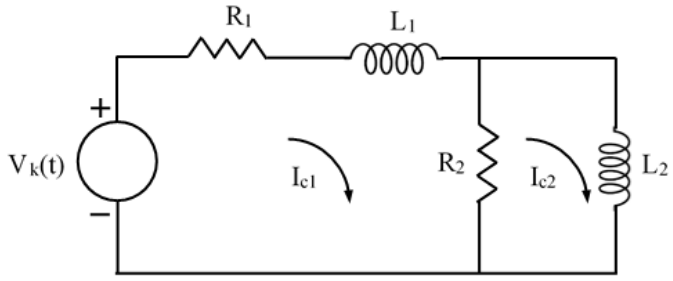


Figure 4. A two-mesh circuit (Arifoğlu, 2013)

We find the current of inductor (I_{L2}) in the circuit of Figure 4 assuming that $V_K(t) = 100\sin(3t)$, $R_1 = 4\Omega$, $R_2 = 2\Omega$, $L_1 = 1H$ and $L_2 = 3H$. The initial conditions of $I_{c1}(t=0) = 0, I_{c2}(t=0) = 0$ (Arifoğlu, 2013). Firstly, applying KVL to each mesh, the mesh equations are written as:

$$(R_1 + R_2)i_{c1}(t) + L_1\frac{di_{c1}(t)}{dt} - R_2 i_{c2}(t) = V_K(t) \tag{27}$$

$$R_2\big(i_{c2}(t) - i_{c1}(t)\big) + L_2\frac{di_{c2}(t)}{dt} = 0 \tag{28}$$

After writing the values in the Equations (27)-(28),

$$6i_{c1}(t) + \frac{di_{c1}(t)}{dt} - 2i_{c2}(t) = 100sin3t \tag{29}$$

$$2\big(i_{c2}(t) - i_{c1}(t)\big) + 3\frac{di_{c2}(t)}{dt} = 0 \tag{30}$$

are obtained. In Equation (30), $i_{c1}(t)$ is written in terms of $i_{c2}(t)$ and substituted in Equation (29) to obtain second order initial value problem:

$$\frac{d^2 i_{c2}(t)}{dt^2} + \frac{20}{3}\frac{di_{c2}(t)}{dt} + \frac{8}{3} i_{c2}(t) = \frac{200}{3} sin3t,\ i_{c2}(0) = 0,\ i_{c2}{}'(0) = 0 \quad (31)$$

The Natural transform of $i_{c2}(t)$ is denoted by $I(s,u)$. If the Natural transform is applied to Equation (31), we get

$$\frac{s^2}{u^2} I(s,u) - \frac{s}{u^2} i(0) - \frac{i'(0)}{u} + \frac{20}{3}\left(\frac{s}{u} I(s,u) - \frac{i(0)}{u}\right) + \frac{8}{3} I(s,u) = \frac{200}{3}\frac{3u}{s^2+9u^2} \quad (32)$$

Substituting the initial values in the equation, $I(s,u)$ is written as below:

$$I(s,u) = \frac{600u^3}{(s^2+9u^2)(3s^2+20su+8u^2)} \quad (33)$$

After the inverse Naturel transform is taken, the current is obtained:

$$i_{c2}(t) = 3.7475e^{-0.4274t} - 0.7180e^{-6.2393t} - 0.9594\sin(3t) - 3.0295\cos(3t) \quad (34)$$

The solutions of Equation (8), Equation (15), Equation (23) and Equation (31) obtained with Natural transform correspond exactly to the analytical solutions.

4. Application of Runge-Kutta numerical method

The Ruge-Kutta method is used to calculate the blood glucose concentration and circuit's voltage and current. The results of the methods are given in Figure 5-8 and in Table 3-6, respectively. The number of samples obtained with the Runge-Kutta method is inversely proportional to the step size. Because of many samples, Table 3-6 shows the results at particular times. The error values in the tables are calculated by taking multiple numbers after the comma.

Firstly, in Equation (11) the parameters $C_i = C(0) = 320, \beta = 280, P = 45, k = 0.058$ (Khidir et al., 2023) were used to calculate the blood glucose concentration and $C(t) = 320e^{-0.058t} + \frac{280}{45\ 0.058}\left(1 - e^{-0.058t}\right)$ is obtained. Using the same parameters, the RK4 method was applied to Equation (8) for 0≤t≤90s and h=1. Blood glucose concentration was calculated for each cycle. Before determining the step size, blood glucose concentration was calculated for step size values 0.1, 0.25, 0.5 and 1. For the step size selected (h=1), it has been observed that the exact solution and the numerical solution converge. Choosing the step size differently caused the number of cycles to change. The solution of Natural transform (exact solution), the numerical solution (RK4 solution) and error for the concentration are given in Table 3. The results obtained graphically are also supported with the results given in Table 3. Figure 5 shows the blood glucose concentration (blue: result obtained with Natural transform, red: result obtained with the Runge-Kutta method).

Table 3. Error of the blood glucose concentration in RK4 method

t	NT solution	RK4 solution	Absolute Error	t	NT solution	RK4 solution	Absolute Error
0	320	320	0	50	118.9842	118.9843	3.36E-06
5	266.4505	266.4506	4.57E-06	55	116.0378	116.0378	2.77E-06
10	226.3814	226.3815	6.84E-06	60	113.8331	113.8331	2.26E-06
15	196.3992	196.3992	7.67E-06	65	112.1833	112.1833	1.83E-06
20	173.9646	173.9646	7.66E-06	70	110.9489	110.9489	1.47E-06
25	157.1776	157.1776	7.16E-06	75	110.0252	110.0252	1.18E-06
30	144.6164	144.6165	6.43E-06	80	109.3341	109.3341	9.43E-07
35	135.2174	135.2174	5.61E-06	85	108.8169	108.8169	7.5E-07
40	128.1845	128.1845	4.8E-06	90	108.4299	108.4299	5.94E-07
45	122.922	122.922	4.04E-06				

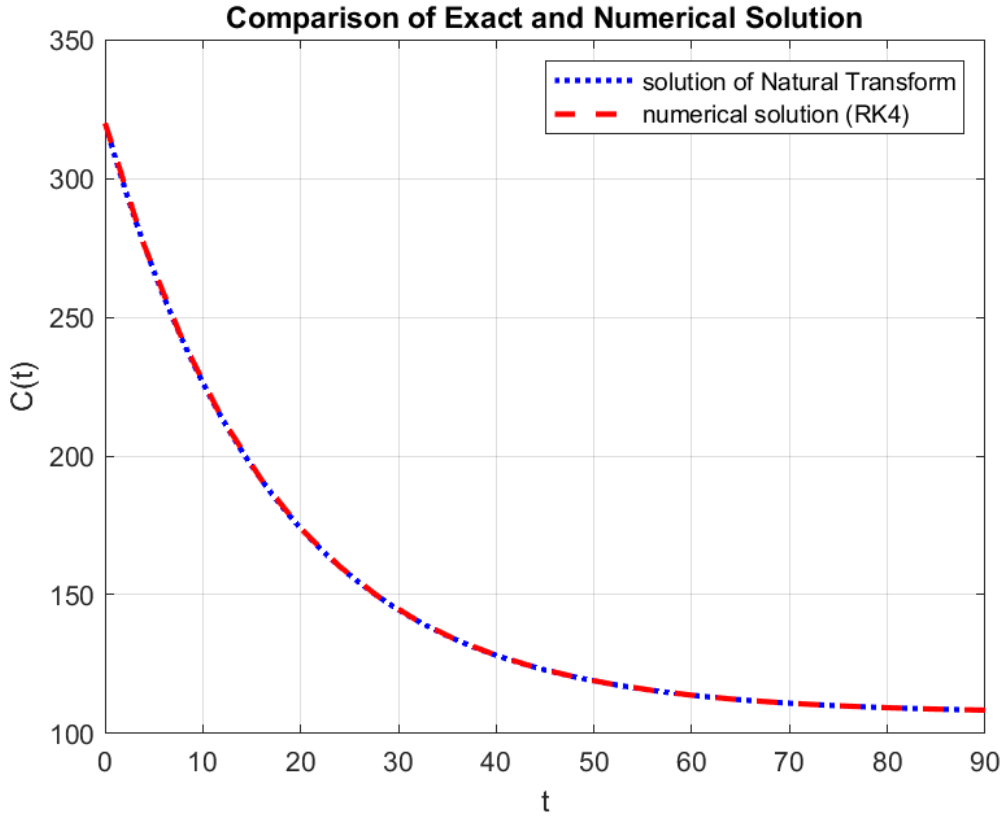


Figure 5. Exact and numerical solutions (RK4) of the blood glucose concentration $(C_i = 320, \beta = 280, P = 45, k = 0.058, h = 1)$

Secondly, taking the initial conditions (i(0)=0, i' (0)=60) in Equation (15), comparison of the analytical solution and the numerical solution of the current in Figure 2 were given in Table 4 when RK4 was applied for h = 0.01 and 0≤t≤5s. The current in the series RLC circuit is given in Figure 6. In (Irwin & Nelms, 2015), it is aimed that i(t) reaches at least 1mA within 100ms after switching, and it remains above 1A between 1-1.5s. All are seen in the Figure 6 and Table 4. Also it can be seen that as t goes to infinity, the current goes to zero. For the RK4 method, the results were obtained by changing the step size as 0.01, 0.05, 0.075, 0.1, respectively and step size was selected as 0.01. The reason for this is that at other values of the step size, the solutions created by the RK4 method for t < 0.5s are not the same with the results obtained with Natural transform and exact solution.

Table 4. Error of the current in the circuit of Figure 2 in RK4 method

t	NT solution	RK4 solution	Absolute Error	t	NT solution	RK4 solution	Absolute Error
0	0	0	0	2.75	0.213093	0.213093	4.92E-11
0.25	2.567164	2.567162	1.7E-06	3	0.165957	0.165957	4.18E-11
0.5	2.021519	2.021519	3E-08	3.25	0.129247	0.129247	3.53E-11
0.75	1.574553	1.574553	2.9E-10	3.5	0.100658	0.100658	2.96E-11
1	1.226265	1.226265	9.85E-11	3.75	0.078392	0.078392	2.47E-11
1.25	0.955016	0.955016	1E-10	4	0.061052	0.061052	2.05E-11
1.5	0.743767	0.743767	9.37E-11	4.25	0.047547	0.047547	1.7E-11
1.75	0.579246	0.579246	8.52E-11	4.5	0.03703	0.03703	1.4E-11
2	0.451118	0.451118	7.58E-11	4.75	0.028839	0.028839	1.15E-11
2.25	0.351331	0.351331	6.64E-11	5	0.02246	0.02246	9.44E-12
2.5	0.273617	0.273617	5.75E-11				

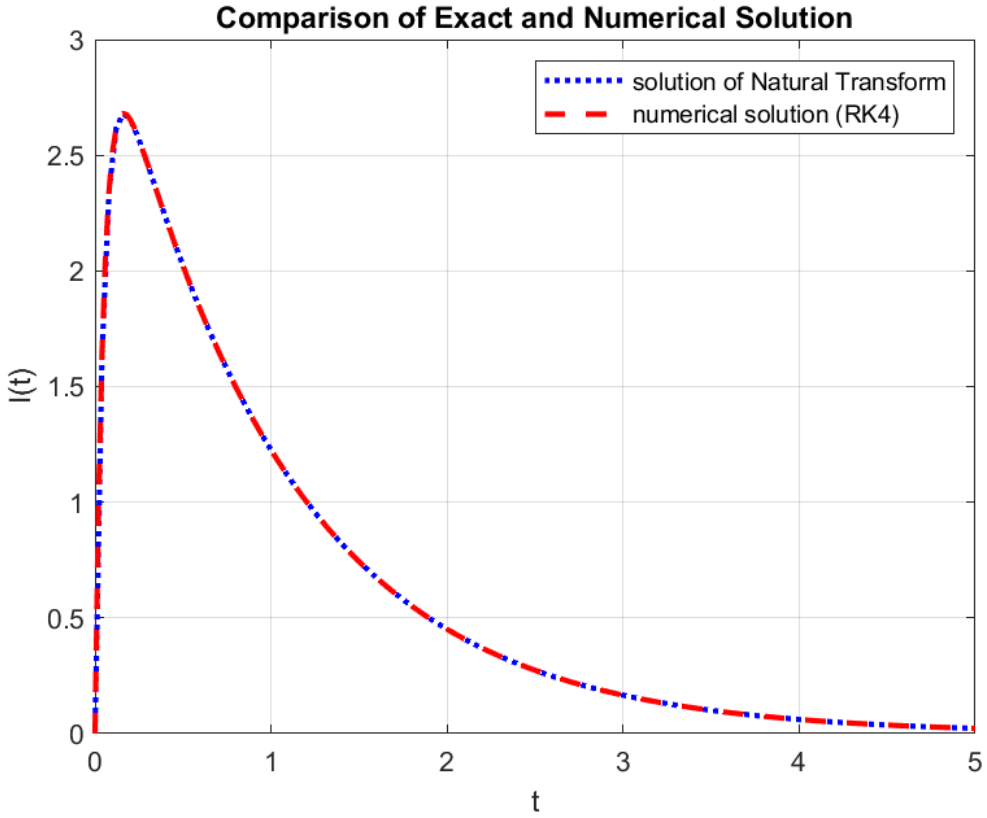


Figure 6. Exact and numerical solutions (RK4) of the current in the circuit of Figure 2

Thirdly, with initial conditions $V(0) = 0,\ V'(0) = 0$, Equation (23) was examined. The analytical solution and the numerical solution of the voltage in the parallel RLC circuit were given in Table 5 when RK4 was applied for h = 0.01 and 0≤t≤10s. The voltage in the parallel RLC circuit also goes to zero while t goes to infinity (Figure 7). When the step size is greater than 1, the solution obtained with the RK4 method does not converge to the results obtained with Natural transform and the exact solution.

Table 5. Error of the voltage in the circuit of Figure 3 in RK4 method

t	NT solution	RK4 solution	Absolute Error	t	NT solution	RK4 solution	Absolute Error
0	0	0	0	5.5	-1.47257	-1.47257	1.11E-10
0.5	-5.16913	-5.16913	1.2E-08	6	-0.99199	-0.99199	5.15E-11
1	-10.8268	-10.8268	8.3E-09	6.5	-0.66169	-0.66169	1.68E-11
1.5	-12.9082	-12.9082	3.8E-09	7	-0.43777	-0.43777	1.6E-12
2	-12.2921	-12.2921	1E-09	7.5	-0.28763	-0.28763	9.9E-12
2.5	-10.3892	-10.3892	2.52E-10	8	-0.18787	-0.18787	1.3E-11
3	-8.16423	-8.16423	6.47E-10	8.5	-0.12208	-0.12208	1.2E-11
3.5	-6.11243	-6.11243	6.4E-10	9	-0.07898	-0.07898	1.1E-11
4	-4.42259	-4.42259	4.95E-10	9.5	-0.0509	-0.0509	8.7E-12
4.5	-3.12039	-3.12039	3.34E-10	10	-0.03269	-0.03269	6.8E-12
5	-2.15978	-2.15978	2.03E-10				

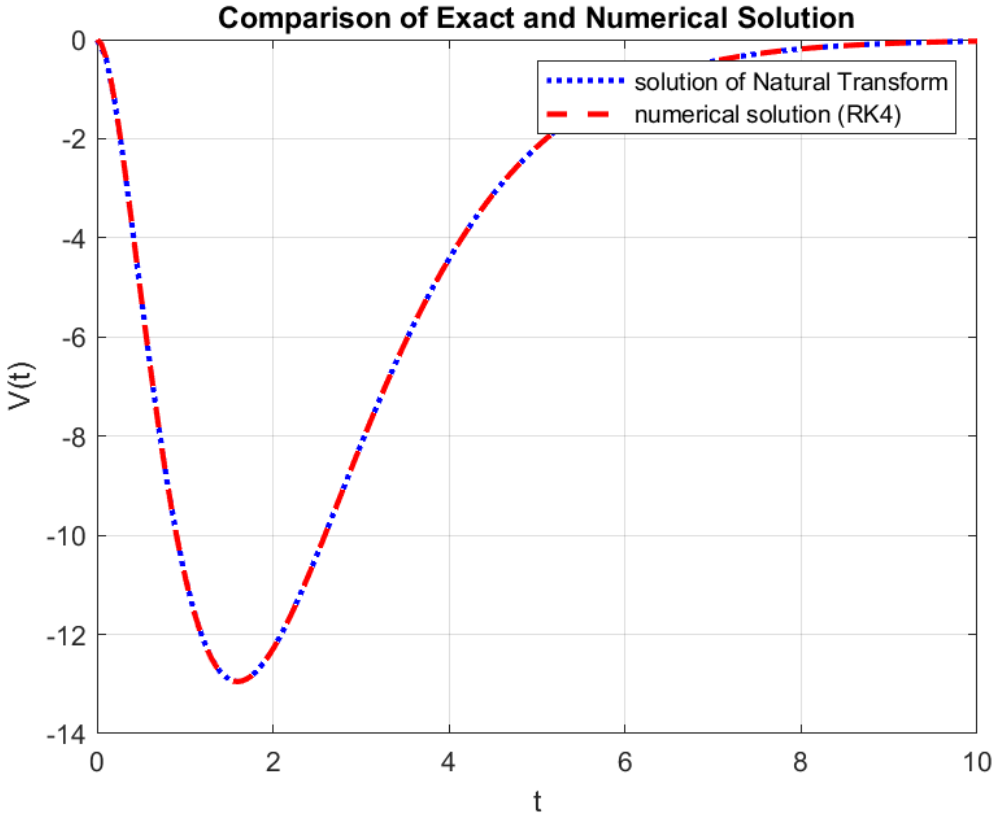


Figure 7. Exact and numerical solutions (RK4) of the voltage in the circuit of Figure 3

Finally, considering Equation (31) with initial conditions $i_{c2}(0) = 0,\ i'_{c2}(0) = 0$, the analytical solution and the numerical solution of the current around mesh 2 in Figure 4 were given in Table 6 when RK4 was applied for h = 0.01 and 0≤t≤20s. Figure 8 shows the current around mesh 2 of the two-mesh circuit. It is seen that the steady-state part of the Equation (34) is sinusoidal. When the step size is larger than 0.2, the results obtained with the RK4 method diverge from the results obtained with the Natural Transform. The step size (h) chosen for Runge-Kutta method for electrical circuits are 0.01.

Figure 5-8 demonstrate that the numerical method approximates the analytical solution well for small step sizes. As the step size increases, deviations between the two solutions may become more noticeable. Also, Table 3-6 demonstrate that the error is rather small.

Table 6. Error of the current in the circuit of Figure 4 in RK4 method

t	NT solution	RK4 solution	Absolute Error	t	NT solution	RK4 solution	Absolute Error
0	0	0	0	11	-0.88501	-0.88501	4.03E-08
1	5.306584	5.306584	4.29E-08	12	1.361337	1.361336	3.5E-08
2	-1.04674	-1.04674	4.7E-08	13	-1.71795	-1.71795	2.82E-08
3	3.404598	3.404598	5.14E-08	14	2.100482	2.100482	2.1E-08
4	-1.36365	-1.36365	5.3E-08	15	-2.40164	-2.40164	1.39E-08
5	2.119886	2.119886	5.5E-08	16	2.680386	2.680386	6.2E-09
6	-0.99156	-0.99156	5.5E-08	17	-2.88875	-2.88875	1.6E-09
7	1.044832	1.044832	5.43E-08	18	3.050211	3.050211	9.36E-09
8	-0.29361	-0.29361	5.2E-08	19	-3.1435	-3.1435	1.7E-08
9	0.04756	0.04756	4.92E-08	20	3.178519	3.178519	2.42E-08
10	0.532749	0.532749	4.5E-08				

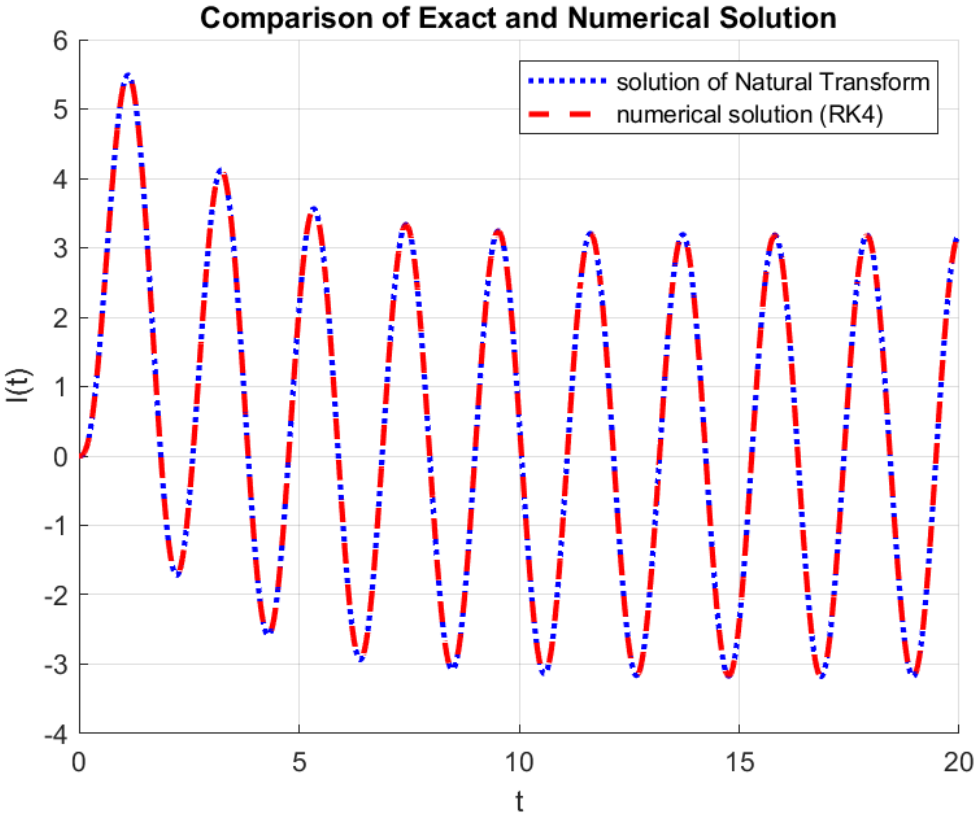


Figure 8. Exact and numerical solutions (RK4) of the current in the circuit of Figure 4

5. Discussion and conclusions

This study demonstrates a comparative analysis between the analytical solution of differential equations considered in section 3 using the Natural Transform and the numerical solution obtained through the fourth-order Runge-Kutta method. Using the Runge Kutta method, both blood glucose concentration and currents and voltage of electrical circuits were calculated for different values of the step size. The convergence of the results calculated with Runge Kutta method and obtained with Natural transform was obtained for these step size (h) which are 1 and 0.01, respectively.

The Natural Transform provided an exact solution, serving as a benchmark for evaluating the performance of the numerical approach. The Runge-Kutta method successfully approximated the analytical solution with high accuracy, especially when a small step size was used. Graphical comparisons showed that both solutions align closely across the solution domain, with only minor discrepancies due to numerical approximation errors.

Overall, the study highlights the strength of combining analytical and numerical approaches, with the Natural Transform offering insight into the exact behavior of the system and the Runge-Kutta method providing a robust tool for approximating solutions when analytical methods are infeasible. Ongoing research and development in these transforms continue to expand their utility, offering new solutions to complex scientific and engineering problems. In future studies, the results obtained with integral transform can be compared with numerical methods for different applications.

Acknowledgement

We sincerely thank the referees and journal editors for their careful review and valuable contributions.

Author contribution

All authors had the same contribution. All authors read and approved the final manuscript.

Declaration of ethical code

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

Alkan, A., & Anaç, H. (2024). The novel numerical solutions for time-fractional Fornberg-Whitham equation by using fractional natural transform decomposition method. *AIMS Mathematics*, *9*(9), 25333-25359.

Al-Omari, S. K. Q. (2013). On the application of natural transforms. *Int. J. Pure Appl. Math*, *85*(4), 729-744.

Arifoğlu, U. (2013). *Elektrik-Elektronik Devrelerinin Analizi*, Alfa Basım Yayım.

Bateman, H., Erdélyi, A., Magnus, W., & Oberhettinger, F. (1954). *Tables of integral transforms* (Vol. 1, p. 197). New York: McGraw-Hill.

Belgacem, F. B. M., & Silambarasan, R. (2012). Theory of natural transform. *Math. Engg. Sci. Aeros*, 3, 99-124.

Butcher, J.C. (2008). *Numerical Methods for Ordinary Differential Equations*, John Wiley &Sons.

Chindhe, A. D., & Kiwne, S. (2017). Application of Natural transform in Cryptography. *Journal of New Theory*, (16), 59-67.

Debnath, L., & Bhatta, D. (2016). *Integral transforms and their applications*. Chapman and Hall/CRC.

Doetsch, G. (2013). *Theorie und Anwendung der Laplace-transformation* (Vol. 67). Springer-Verlag.

Gardner, M. F., & Barnes, J. L. (1942). *Transients in linear systems studied by the Laplace transformation* (Vol. 1). J. Wiley & Sons, Incorporated.

Heun K. (1900) Neue Methoden zur approximativen Integration der Differentialgleichungen einer unabh¨angigen Ver¨anderlichen. *Z. Math. Phys.*, 45, 23–38.

Higazy, M., Aggarwal, S., & Hamed, Y. S. (2020). Determination of Number of Infected Cells and Concentration of Viral Particles in Plasma during HIV-1 Infections Using Shehu Transformation. Journal of Mathematics, 2020(1), 6624794.

Huˇta A. (1956) Une am´elioration de la m´ethode de Runge–Kutta–Nystr¨om pour la ´esolution num´erique des ´equations diff´erentielles du premier ordre. *Acta Fac. Nat. Univ. Comenian. Math.*, 1, 201–224.

Huˇta A. (1957) Contribution `a la formule de sixi`eme ordre dans la m´ethode de Runge–Kutta–Nystr¨om. *Acta Fac. Nat. Univ. Comenian. Math.*, 2, 21–24. Iserles A., Munthe-Kaas H. Z

Irwin, J. D., Nelms R.M. (2015). *Temel Mühendislik Devre Analizi*, Editor: Timur Aydemir, Çevirenler: Hasan Dağ, Sedat Sünter, Timur Aydemir, Halis Altun, Nobel Akademik Yayıncılık.

Iyengar, S.R., & Jain R.K. (2009). *Numerical Methods*, New Age International.

Jadhav, C. P., Dale, T. B., & Boadh, R. (2022). Solution of fractional differential equations for LC, RC and LR circuits using sumudu transform method. *NeuroQuantology*, 20(17), 994.

Khalouta, A. (2023). A New Exponential Type Kernel Integral Transform: Khalouta Transform and Its Application. Vol. LVII.

Khan, Z. H., & Khan, W. A. (2008). N-transform-properties and applications. *NUST journal of engineering sciences*, 1(1), 127-133.

Khidir, A. A., Alfaifi, W. I., Alsharari, S. L., Alanazi, I. M., & Alyasi, L. S. (2023). Study on Determining the Blood Glucose Concentration During an Intravenous Injection Using Volterra Integral Equations. *Journal of Advances in Mathematics and Computer Science*, 38(10), 172-184.

Kiliçman, A., & Omran, M. (2017). On double Natural transform and its applications. *J. Nonlinear Sci. Appl*, 10(4), 1744-1754.

Köklü, K. (2020). Resolvent, natural, and Sumudu transformations: solution of logarithmic Kernel integral equations with natural transform. Mathematical Problems in Engineering, 2020(1), 9746318.

Kumar, A., Bansal, S., & Aggarwal, S. (2021). Determination of the blood glucose concentration of a patient during continuous intravenous injection using Anuj transform. Neuroquantology, 19(12), 303.

Kumar, A., Bansal, S., & Aggarwal, S. (2021). A new novel integral transform "Anuj transform" with application. *Design Engineering*, *9*, 12741-12751.

Kutta W. (1901) Beitrag zur n¨aherungsweisen Integration totaler Differentialgleichungen. *Z. Math. Phys.*, 46, 435–453.

Lado, F. (1971). Numerical fourier transforms in one, two, and three dimensions for liquid state calculations. *Journal of Computational Physics*, *8*(3), 417-433.

Maitama, S., & Zhao, W. (2019). New integral transform: Shehu transform a generalization of Sumudu and Laplace transform for solving differential equations. arXiv preprint arXiv:1904.11370.

Mahgoub, M. M. A., & Mohand, M. (2019). The new integral transform "Sawi Transform". *Advances in Theoretical and Applied Mathematics*, *14*(1), 81-87.

Nyström, E. Johannes. (1925). Über die numerische integration von differentialgleichungen. Helsingfors

Peker, H. A., & Çuha, F. A. (2023). Exact solutions of some basic cardiovascular models by Kashuri Fundo transform. *Journal of New Theory*, (43), 63-72.

Rawashdeh, M. S., & Maitama, S. (2014). Solving coupled system of nonlinear PDE's using the natural decomposition method. Int. J. Pure Appl. Math, 92(5), 757-776.

Rawashdeh, M. S., & Maitama, S. (2015). Solving nonlinear ordinary differential equations using the NDM. J. Appl. Anal. Comput, 5(1), 77-88.

Rawashdeh, M. S., & Maitama, S. (2016). Solving PDEs using the natural decomposition method. Nonlinear studies, 23(1).

Runge C. (1895) Uber die numerische Aufl osung von Differentialgleichungen. *Math. Ann.*, 46, 167–178.

Silambarasan, R. & Belgacem, F. B. M. (2011). Applications of the Natural transform to Maxwell's Equations, PIERS Suzhou, China,, Sept 12-16, pp 899–902.

Upadhyaya, L. M. (2019). Introducing the Upadhyaya integral transform. Bulletin of Pure and Applied Sciences, 38E (1), 471-510.

Upadhyaya, L. M., Shehata, A., & Kamal, A. (2021). An update on the Upadhyaya transform Bulletin of Pure & Applied Sciences-Mathematics, 2021, Vol 40E, Issue 1, p26.

Vashi, J., & Timol, M. G. (2016). Laplace and Sumudu transforms and their application. *Int. J. Innov. Sci., Eng. Technol*, 3(8), 538-542.

Watugala, G. (1998). Sumudu transform-a new integral transform to solve differential equations and control engineering problems. *Mathematical engineering in industry*, *6*(4), 319-329.

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 260-273 doi: 10.17714/gumusfenbil.1624557 Research Article

Actionable targets in breast cancer: a multi-omics approach to uncover tumor-specific vulnerabilities

Meme kanserinde uygulanabilir hedefler: tümör-spesifik hassasiyetleri ortaya çıkarmak için multi-omik bir yaklaşım

Abdulkadir ELMAS*[1,2]

[1]*Giresun University, Faculty of Engineering, Dept. Of Electrical & Electronics Engineering, Giresun 28200, Türkiye*
[2]*Icahn School of Medicine at Mount Sinai, Department of Genetics and Genomic Sciences, New York, NY 10029, USA*

• Received: 21.01.2025 • Accepted: 06.03.2025

Abstract

Breast cancer remains a leading cause of cancer-related deaths worldwide, necessitating innovative therapeutic strategies. This study integrates proteomic, transcriptomic, and functional dependency data to systematically identify tumor-specific markers and vulnerabilities in breast cancer. We analyzed mass-spectrometry-based proteomic data from 115 tumor samples and 18 matched normal tissues, quantifying 10,468 proteins. By combining overexpression and differential expression analyses, we identified 172 tumor-specific proteins, including well-characterized targets such as ERBB2, EGFR, and CCND1, as well as novel candidates like TRPS1, UBE2C, and FOXP4. Functional validation of these candidate targets was performed through CRISPR-based expression-driven dependency analysis using the BEACON method and DepMap data, which revealed both gene- and protein-level dependencies, uncovering novel protein-unique cancer vulnerabilities. Notably, protein-specific dependencies such as UBE2C and E2F3 highlight potential therapeutic targets overlooked in transcriptomic analyses. In particular, markers such as TRPS1 and UBE2C, which exhibit strong protein expression-driven dependencies, may serve as potential candidates for precision oncology approaches, guiding drug development and patient stratification. This study presents a systematically prioritized set of actionable targets, emphasizing the critical role of multi-omics integration in driving precision oncology advancements for breast cancer.

Keywords: BEACON method, Breast cancer, Expression-driven dependency, Multi-omics approach, Precision oncology

Öz

Meme kanseri, dünya genelinde kanser kaynaklı ölümlerin başlıca nedenlerinden biri olup, önlenimi/tedavisi için yenilikçi terapötik stratejilerine gereksinim duyulmaktadır. Bu çalışma, meme kanserinde tümör-spesifik biyobelirteçleri ve zayıf noktaları sistematik olarak belirlemek için proteomik, transkriptomik ve fonksiyonel bağımlılık verilerini birleştirmektedir. 115 tümör örneği ve 18 eşlenmiş normal dokudan elde edilen kütle spektrometrisine dayalı proteomik veriler analiz edilmiş ve 10,468 adet protein incelenmiştir. Aşırı ekspresyon ve diferansiyel ekspresyon analizlerinin birleştirilmesiyle, ERBB2, EGFR ve CCND1 gibi iyi bilinen hedeflerin yanı sıra TRPS1, UBE2C ve FOXP4 gibi yeni adayların da bulunduğu 172 tümör-spesifik protein tespit edilmiştir. Bu aday hedeflerin fonksiyonel doğrulaması, BEACON yöntemi ve DepMap verileri kullanılarak CRISPR tabanlı ekspresyon odaklı bağımlılık analizi ile gerçekleştirilmiş olup, hem gen hem de protein düzeyinde bağımlılıkları ortaya koyarak proteine özgü yeni kanser hassasiyetlerini belirlemiştir. Özellikle UBE2C ve E2F3 gibi protein-spesifik bağımlılıklar, transkriptomik analizlerde gözden kaçan potansiyel terapötik hedefleri vurgulamaktadır. Özellikle, ekspresyon odaklı bağımlılık gösteren TRPS1 ve UBE2C gibi belirteçler, ilaç geliştirme ve hasta sınıflandırmasını yönlendiren hassas onkoloji yaklaşımları için potansiyel adaylar olarak hizmet edebilir. Bu çalışma, uygulanabilir hedefleri sistematik olarak önceliklendirerek, multi-omik entegrasyonun meme kanserinde hassas onkolojiyi ilerletmedeki kritik rolünü vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: *BEACON yöntemi, Meme kanseri, Ekspresyon temelli bağımlılık, Çoklu-omik yaklaşım, Hassas onkoloji*

*Abdulkadir ELMAS; abdulkadir.elmas@giresun.edu.tr

1. Introduction

Breast cancer (BRCA) remains a leading cause of cancer-related deaths worldwide, emphasizing the need for innovative therapeutic strategies (Giaquinto et al., 2024). Advances in genomic and proteomic technologies have transformed our understanding of this heterogeneous disease, enabling the discovery of novel biomarkers and therapeutic targets (Engel & Kaklamani, 2007; Mertins et al., 2016; Krug et al., 2020). Our prior work identified a subset of overexpressed protein kinases in breast cancer, as well as a number of tumor-expressed proteins, revealing potential tumor-specific vulnerabilities in breast cancer (Elmas, 2024). Building on these insights, the present study aims to broaden the scope of analysis to include both kinase and non-kinase proteins (Manning et al., 2002), focusing on tumor-specific overexpression patterns in breast cancer cohort. By integrating overexpression and differential expression data, we aim to distinguish markers uniquely upregulated in breast cancer tumors relative to their background expressions in matched normal tissue. Additionally, by comparing mRNA and protein-level overexpression, we investigate post-translational regulation to identify novel, protein-specific markers that are not evident at the transcriptomic level (Lang et al., 2020).

Previous multi-omics studies integrating transcriptomic and proteomic data have significantly advanced our understanding of breast cancer biology (Mertins el al., 2016). However, these approaches often face challenges in capturing protein-level regulatory mechanisms, as mRNA expression does not always correlate with protein abundance due to post-transcriptional modifications, protein degradation, and translational regulation (Vogel & Marcotte, 2012). Additionally, most studies lack functional validation and primarily focus on differential expression, without considering whether overexpressed genes/proteins are functionally essential for cancer cell survival. To overcome these limitations, our study integrates “expression-driven dependency” analysis, which allows for the identification of both gene- and protein-level functional dependencies, uncovering protein-specific vulnerabilities that may be overlooked in transcriptomic analyses.

A central aspect of this study is validating the functional importance of tumor-specific markers through expression-driven dependency (Elmas et al., 2024). Using cancer cell dependency and epression data sets from the Cancer Cell Line Encyclopedia (CCLE) (Barretina et al., 2012; Nusinow et al., 2020), we assess the correlation between gene knockout sensitivity and expression levels of candidate markers. This concept highlights cancer cells' heightened vulnerability to the depletion of highly expressed genes, presenting a promising avenue for precision oncology. To advance this approach, we employ our previously developed BEACON method (Elmas et al., 2024; Elmas & Huang, n.d.), a Bayesian framework that integrates multi-omics data—including transcriptomic, proteomic, and genetic dependency information—to systematically identify critical cancer dependencies across diverse molecular levels and tissue types.

Through these expanded analyses, we aim to uncover novel tumor protein biomarkers supported by functional *in vitro* cell assays and deepen our understanding of the proteomic underpinnings of breast cancer, paving the way for new targeted therapeutic strategies.

2. Materials and methods

2.1. Proteomic, transcriptomic and functional data acquisition

Proteomic data were obtained through mass spectrometry (MS)-based analysis of a cohort comprising 116 breast cancer patients, including 115 tumor samples and 18 matched normal tissues (Krug et al., 2020). Protein quantification was performed using the PDAC workflow with stringent quality control measures, as detailed on the PDC portal (https://pdc.cancer.gov/pdc/browse). To ensure data consistency and reliability, normalization protocols were applied to address batch effects and standardize protein abundance levels, facilitating downstream analysis of 10,468 proteins, including 481 kinases. Median Absolute Deviation (MAD) normalization was employed for each sample, ensuring unit MAD across the dataset. Proteins with more than 20% missing values were excluded from the analysis to maintain data integrity. Additionally, principal component analysis (PCA) was performed to assess technical biases and potential batch effects. The PCA results indicated that sample clustering was driven by biological factors (Figure S1) rather than technical grouping (Figure S2), supporting the conclusion that batch effects were minimal.

For transcriptomic analyses, RNA sequencing (RNA-seq) data encompassing gene expression profiles of 106 tumor samples were sourced from the GDC portal (https://portal.gdc.cancer.gov/). Quantile normalization and log2 transformation were applied to FPKM-normalized counts, and genes with no expression (FPKM ≤ 1) in at least 20% of the samples were excluded. This filtering resulted in 21,395 protein-coding genes, of which 596 encoded kinases.

Functional validation was conducted by integrating RNA-seq data (Ghandi et al., 2019) and protein expression data (Nusinow et al., 2020) from breast cancer cell lines, available through the Cancer Cell Line Encyclopedia (CCLE) at the Cancer Dependency Map (DepMap) portal (https://depmap.org/portal/) (public release 22Q2). Genetic dependency data were also acquired from DepMap (Tsherniak et al., 2017), incorporating genome-wide CRISPR knockout screening (Meyers et al., 2017; Pacini et al., 2021; Dempster et al., 2021) performed on the same breast cancer cell lines.

The prioritized markers were evaluated based on their druggability (DGIdb), consistency across molecular layers (mRNA/protein overexpression), and functional relevance (GED/PED analyses).

2.2. Overexpression and differential expression analyses

In our previous work (Elmas, 2024), overexpression and differential expression analyses were performed to identify proteins showing abundance in the overall BRCA cohort and the proteins showing significant difference in expression (DEP) between tumor and matched normal tissues, respectively. In this work, we integrated the overexpressed and DEP markers to prioritize tumor-specific overexpressed markers for subsequent analyses and functional validation, which were further stratified by druggability (Figures 1, 2), molecular consistency (Figure 3), and cellular expression-driven dependency patterns (Figure 4).

2.3. Identification of concordant and discordant overexpressed targets

To investigate the relationship between mRNA and protein overexpression in breast cancer, we analyzed proteomic and transcriptomic data from the BRCA cohort (Figures 1, 2). A marker's (mRNA/protein) overexpression rate was assessed by OPPTI method (Elmas et al., 2021), based on comparing the marker's expression levels to the inferred (background) expressions across tumors computed by a weighted k-nearest neighbor (KNN) algorithm. This algorithm improves upon existing methods by using a k-nearest neighbor approach to infer a protein's background expression level based on co-expressed protein neighbors, rather than relying on univariate analysis or a single neighbor, reducing bias from noise. The algorithm computes an overexpression score for each protein in each tumor sample, measuring the deviation of observed expression from the inferred (background) value. Statistical analyses are performed to identify targets with significant overexpression rates via permutation approach. To generate a null distribution, dysregulation scores are randomly reassigned among proteins within each sample, and overexpression events are recalculated. This process is repeated N = 100 × 'number of samples' times to account for the cohort size. The null overexpression values from all iterations are then used to construct a permutation-based distribution, and a p-value is assigned to each marker by estimating the likelihood of its observed overexpression occurring by random chance. Additionally, false discovery rate (FDR) corrections were applied by BH method (Benjamini & Hochberg, 1995) to control for multiple testing.

Proteins were categorized as concordant if overexpression was observed at both mRNA and protein levels, while discordant proteins exhibited significant protein overexpression (PRO > 10%, FDR < 0.05) with minimal RNA-level alteration (RNA < PRO/2). We restricted our (protein/mRNA) discordant overexpression analyses to proteins with an overexpression rate of at least 10%, ensuring that a substantial relative (2-fold) difference is achieved between the protein and mRNA expression levels across the cohort. This threshold was chosen to specifically capture cases where the relative disparity between mRNA and protein overexpression is pronounced (i.e., "PRO > 10%" and "RNA < PRO/2" yields "PRO-RNA > 5%"), ensuring that at least five tumor samples within the cohort exhibit a meaningful difference (112 × 5% ≈ 5). We focused on proteins implicated in key oncogenic signaling pathways (Sanchez-Vega et al., 2018), including Cell Cycle, WNT, RTK/RAS, TP53, NOTCH, and HIPPO pathways. The identified concordant and discordant targets were visualized on scatter plots and heatmaps (Figure 3).

2.4. Integration of functional assays (expression-driven dependency)

The BEACON method (Elmas et al., 2024) was employed to integrate transcriptomic, proteomic, and genetic dependency datasets corresponding to breast cancer cell lines to identify expression-driven dependencies (ED) at both mRNA and protein levels. BEACON incorporates prior distributions to account for outliers and uneven data distributions, ensuring robust correlation measurements. Unlike traditional correlation-based methods, BEACON models gene expression levels and dependency scores using a bivariate Gaussian distribution and employs Markov Chain Monte Carlo (MCMC) sampling to estimate the correlation coefficient, rho (ρ). To determine statistical significance, BEACON compares each gene's ρ estimate to a null distribution, assuming no correlation ($\rho = 0$). The method calculates a z-score for each gene by measuring how far its MCMC-derived ρ deviates from the expected null value, standardized by the variance observed in the simulated distribution. Finally, p-values are computed to evaluate the likelihood of obtaining the observed correlation by chance, and the false discovery rate (FDR) correction is applied by Benjamini-Hochberg (BH) procedure (Elmas et al., 2024). In this work, expression vs. dependency relationships were quantified by estimating the Bayesian correlation coefficient ρ through MCMC sampling, using 3 parallel chains (n.chains) and 500 iterations (n.iter) with 100 exhausted for adaptation phase (n.adapt). The significant dependencies were defined as $\rho < -0.25$ and FDR < 0.05.

Expression-driven dependency (ED) analyses were conducted to evaluate the functional importance of our prioritized candidate targets. Gene expression levels were correlated with CRISPR knockout sensitivity scores from DepMap across 23 breast cancer cell lines with mRNA expression data and 44 with protein expression data. GED (gene expression-driven dependency) and PED (protein expression-driven dependency) were defined based on significant negative correlations between expression levels and knockout sensitivity (Figure 4). Additionally, proteins exhibiting consistent ED at both mRNA and protein levels were classified as concordant dependencies, while those with PED but not GED were considered protein-specific dependencies.

3. Results

3.1. Breast cancer proteomics cohort

We analyzed genomic and extensive mass-spectrometry (MS)-based proteomic data from a cohort of 116 breast cancer patients, which included 115 tumor samples and 18 matched normal tissues (Krug et al., 2020). To ensure high-quality results, we implemented a robust normalization protocol and rigorous quality-control procedures (detailed in Methods). This enabled us to accurately quantify a total of 10,468 proteins for downstream analysis. Furthermore, we utilized the Drug-Gene Interaction database (DGIdb) (Cotto et al., 2018) to compile a comprehensive list of genes associated with drug compounds. By cross-referencing this list with the proteins quantified in our dataset, we identified 1,694 druggable proteins that are potential targets for existing therapeutic interventions.

3.2. Inter-tumor and tumor-normal analyses

Tumor-expressed proteins (DEPs) often exhibit altered expression profiles; however, not all DEPs represent suitable candidates for therapeutic interventions due to variability in expression and functional redundancy (Elmas et al., 2022). To address this, we conducted an integrative analysis combining (inter-tumor) protein overexpression and (tumor-normal) differential expression data to identify aberrantly expressed proteins that consistently (across the cohort) show elevated levels in tumor tissue samples relative to matched normal samples. This approach enables the identification of robust therapeutic targets that are more pronounced in cancerous tissues.

In the BRCA cohort, we identified 296 kinases that were both differentially expressed and overexpressed, as defined by DGIdb as targetable. Among these, DCLK2 kinase exhibited significantly high (FDR < 0.05) alterations: (log2-fold-change [FC] = 2.6, FDR = 0.03; overexpression rate [PRO] = 19.3%, FDR = 1.6e-4) (Figure 1A) (Table S1). For non-kinase targets, 1,350 proteins demonstrated concurrent differential expression and overexpression, with 24 reaching high statistical significance (FDR < 0.05), including CD5 (FC = 4.8, PRO = 23%), SRD5A3 (FC = 2.9, PRO = 25%), FCER1G (FC = 2.6, PRO = 21%), SDS (FC = 3.4, PRO = 17%), RARA (FC = 2.9, PRO = 16%), VKORC1 (FC = 2, PRO = 21%) (Figure 1B) (Table S1).

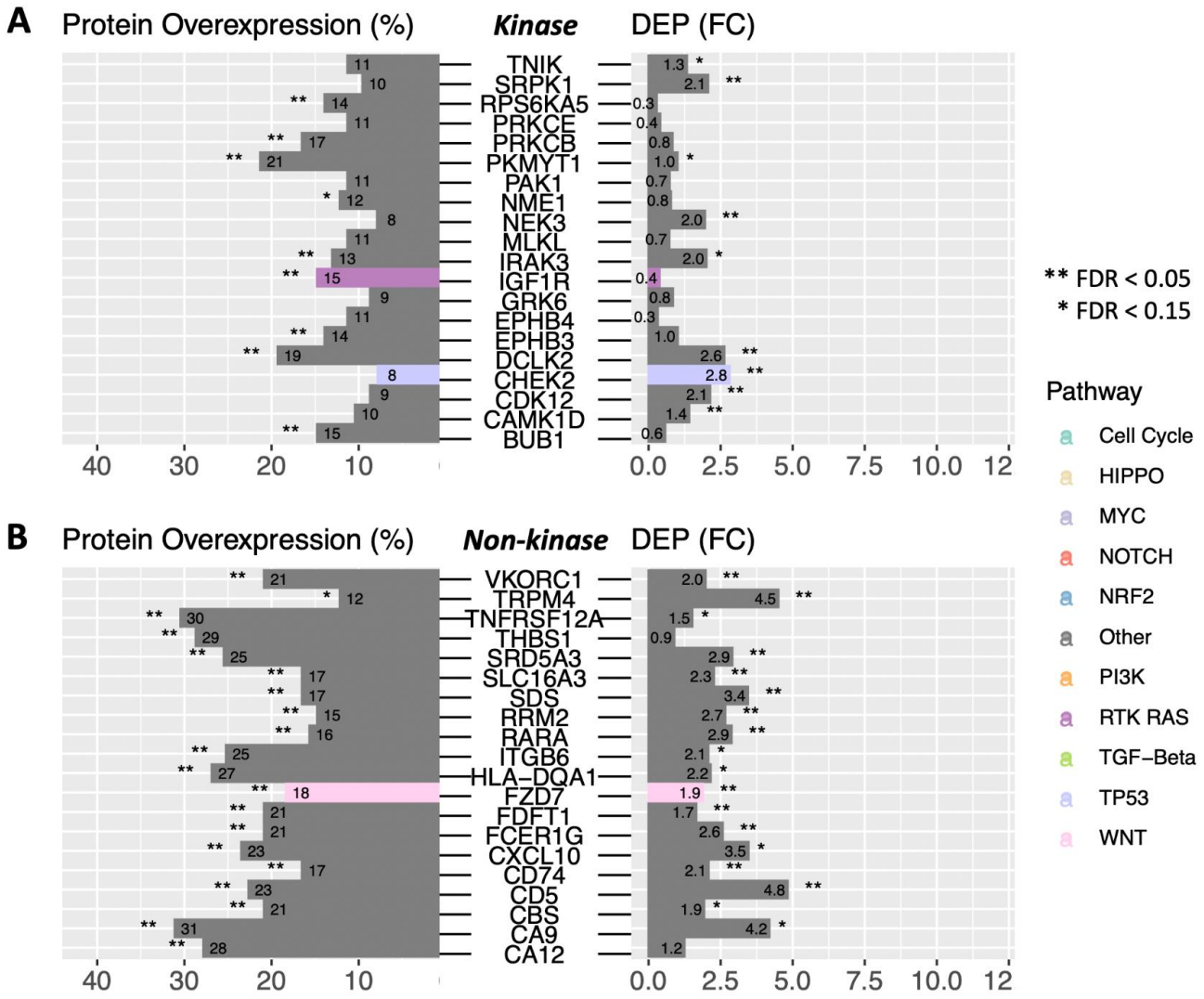


Figure 1. Top-20 tumor-specific overexpressed protein markers in BRCA identified in DGIdb. (A) Kinase proteins and (B) Non-kinase proteins are shown with their percentages of overexpression in tumors (left) and fold changes (FC) in differential expression between tumor and matched normal tissues (right). Significant fold changes are indicated with * (FDR < 0.15) and ** (FDR < 0.05). Pathways associated with each protein are color-coded.

We further analyzed proteins not targeted by existing drugs curated in DGIdb to identify novel opportunities for therapeutic intervention. Among kinases, 171 were both differentially expressed and overexpressed, with three displaying significant (FDR < 0.05) alterations: TK1 (FC = 3.6, PRO = 17%), ETNK2 (FC = 3.5, PRO = 17%), PTK7 (FC = 1.4, PRO = 13%) (Figure 2A) (Table S2). For non-kinase proteins, 144 were identified as significantly differentially expressed and overexpressed (FDR < 0.05). Notable examples include CNTN4 (FC = 3.6, PRO = 38%), ITGB8 (FC = 5.5, PRO = 28%), PEG3 (FC = 3.7, PRO = 29%), SHISA2 (FC = 3.1, PRO = 30%), DACH1 (FC = 2, PRO = 30%), HNRNPA1L2 (FC = 10.6, PRO = 23%), and UBE2C (FC = 4.7, PRO = 20%). (Figure 2B) (Table S2).

These findings highlight a subset of proteins with both significantly elevated (**) differential expression and overexpression levels, providing a prioritized list of candidate therapeutic targets in breast cancer (n=172; Tables S1, S2). By integrating protein-level data and druggability, we thus established a foundation for subsequent analyses, i.e., exploring mRNA-/protein-level abundance and functional dependencies to uncover potential vulnerabilities in breast cancer cells.

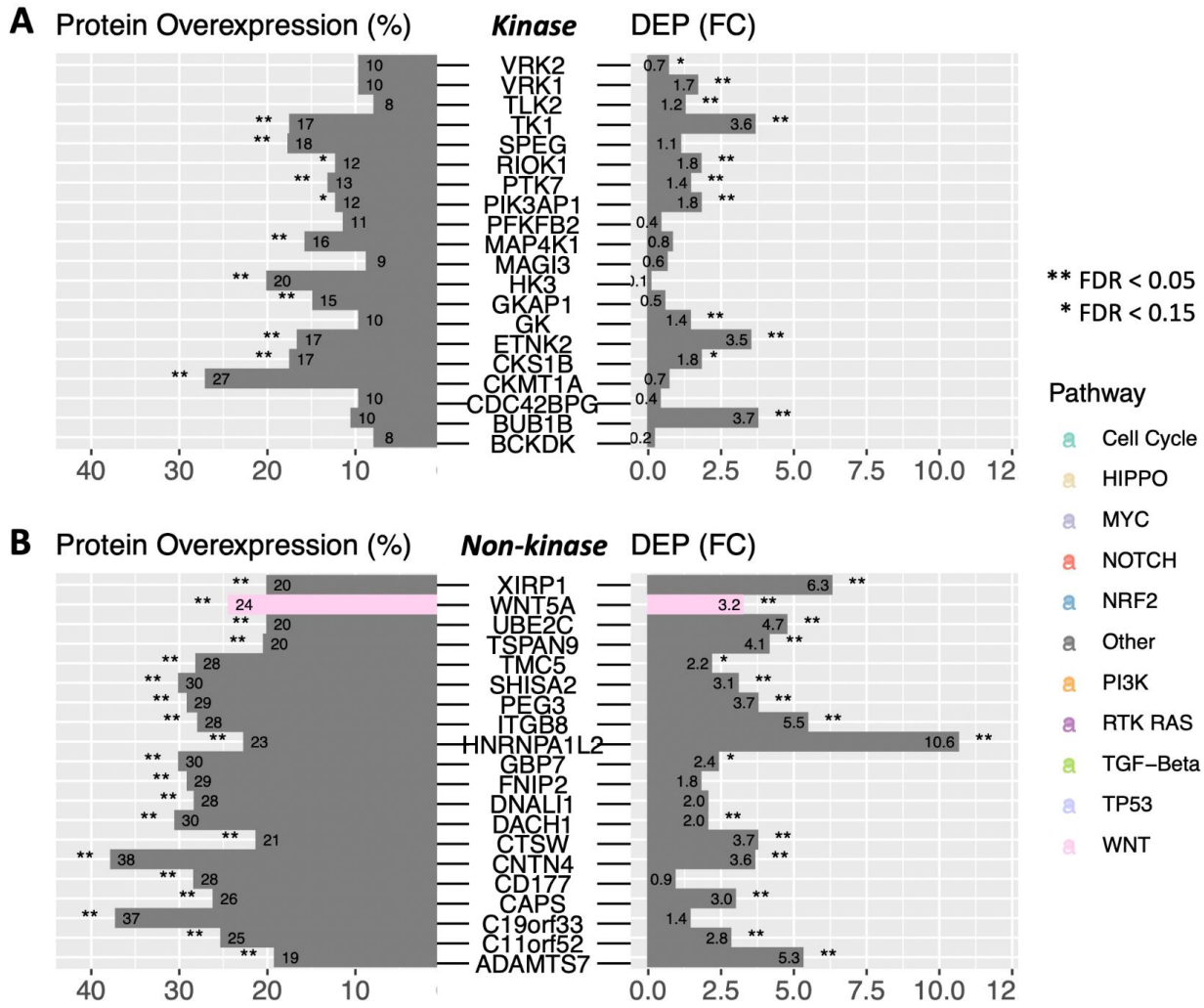


Figure 2. Top-20 tumor-specific overexpressed protein markers in BRCA cohort that are currently not targeted in DGIdb. (A) Kinase and (B) Non-kinase proteins are presented with tumor overexpression percentages (left) and fold changes (FC) in differential expression between tumor and matched normal tissues (right). Significant FC values are marked with * (FDR < 0.15) and ** (FDR < 0.05). Pathways are color-coded for each protein.

3.3. Comparing RNA and protein level alterations

Protein overexpression can stem from genomic alterations, such as copy-number amplifications, or post-transcriptional mechanisms not detectable at the DNA or RNA levels (Elmas et al., 2021). To disentangle these factors, we systematically compared the prevalence of protein overexpression with transcriptomic aberrations in the BRCA cohort, focusing on proteins involved in oncogenic signaling pathways (Sanchez-Vega et al., 2018). We aim to reveal markers of novel therapeutic potential by distinguishing those with concordent or discordant overexpression patterns in different molecular layers.

We identified 17 concordant targets with significant overexpression (≥10, FDR < 0.05) at both mRNA and protein levels, including CCND1 (mRNA overexpression rate [RNA] = 24%, PRO = 18%) and CDK6 (RNA = 15%, PRO = 13%) from Cell Cycle pathway, FZD7 (RNA = 23%, PRO = 18%), WNT5A (RNA = 23%, PRO = 24%), and SFRP4 (RNA = 15%, PRO = 23%) from WNT pathway, ERBB4 (RNA = 17%, PRO = 28%), IRS2 (RNA = 19%, PRO = 21%), ERBB2 (RNA = 16%, PRO = 18%), EGFR (RNA = 15%, PRO = 16%), and IGF1R (RNA = 14%, PRO = 15%) from RTK/RAS pathway, and TP53 (RNA = 17%, PRO = 19%) from TP53 pathway (Figure 3) (Table S3). Conversely, five discordant targets exhibited significant protein overexpression (PRO ≥ 10%, FDR < 0.05) with minimal RNA alterations (RNA < PRO/2), such as FHL1 (RNA = 8%, PRO = 18%) from NOTCH pathway, RASGRP2 (RNA = 6%, PRO = 17%) form RTK/RAS pathway, TEAD1 (RNA = 5%, PRO = 16%), FAT4 (RNA = 3%, PRO = 17%), and WWTR1 (RNA = 6%, PRO = 14%) from HIPPO pathway (Figure 3) (Table S3). These findings highlight potential therapeutic targets that may be overlooked by transcriptomic analyses alone.

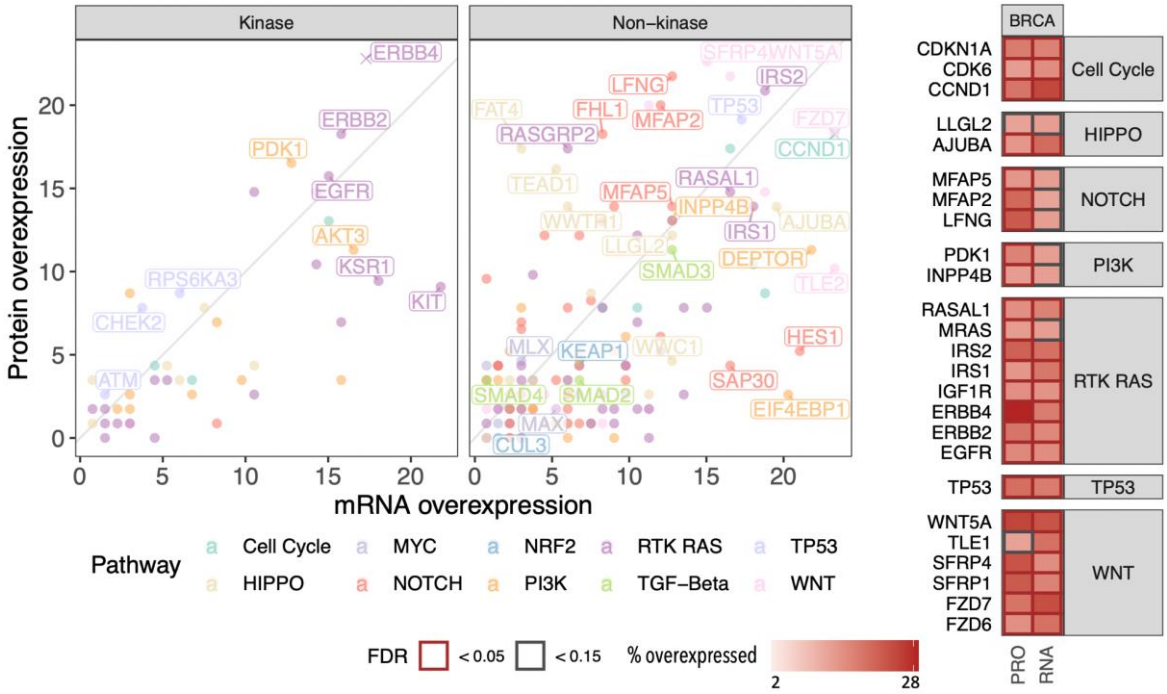


Figure 3. Concordant and discordant overexpressed targets in BRCA. Scatter plots (left) depict the relationship between mRNA and protein overexpression rates in BRCA cohort for kinase and non-kinase proteins. Overexpression rates were calculated using the OPPTI method, and significant targets were determined via permutation analysis with FDR correction (FDR < 0.15; FDR < 0.05). Concordant proteins (high mRNA and protein overexpression) align near the diagonal, while discordant proteins (high protein overexpression with minimal mRNA change) deviate significantly. Highly deviating values (e.g., ERBB4, PRO = 28%) are truncated for better visualization. Heatmaps (right) show pathway enrichment for prioritized targets across key oncogenic pathways, highlighting their potential role in BRCA tumorigenesis.

3.4. Expression-driven dependency

To explore functional gene and protein dependencies in breast cancer, we integrated transcriptomic, proteomic, and genetic dependency datasets from the Cancer Cell Line Encyclopedia (CCLE) and the Cancer Dependency Map (DepMap) (Tsherniak et al., 2017). Our goal was to evaluate the relationship between the expression levels of candidate genes and their knockout sensitivity across breast cancer cell lines, identifying potential vulnerabilities for therapeutic intervention (Methods). Given the limitations of available sensitivity data, only 23 breast cancer cell lines have corresponding mRNA-level expression and 44 with protein-level expression. To ensure a robust correlation measure despite these constraints, we employed BEACON method (Elmas et al., 2024)—a Bayesian correlation approach that incorporates prior distributions to model both expression and dependency data, effectively addressing outliers in the analysis.

Using BEACON, we identified 187 genes showing significant mRNA-level expression-driven dependency (GED) (correlation coefficient $\rho < -0.25$, FDR < 0.05) in breast cancer cell lines, notably ESR1 ($\rho = -0.89$), PROX1 ($\rho = -0.83$), GATA3 ($\rho = -0.81$), SPDEF ($\rho = -0.79$), and FOXA1 ($\rho = -0.75$) (Figure 4A) (Table S4). Among them, 12 were acting in oncogenic signaling pathways (predominantly from RTK/RAS), namely ERBB2 ($\rho = -0.67$), PDGFRB ($\rho = -0.55$), FGFR2 ($\rho = -0.53$), IRS2 ($\rho = -0.48$), and FGFR1 ($\rho = -0.46$). At the protein-level, we identified 64 significant ($\rho < -0.25$, FDR < 0.05) protein expression-driven dependencies (PED), including FOXP4 ($\rho = -0.8$), WDR47 ($\rho = -0.74$), E2F3 ($\rho = -0.76$), CCND1 ($\rho = -0.74$), and NPEPL1 ($\rho = -0.73$), of which four PEDs involved in oncosignaling pathways, i.e., E2F3 ($\rho = -0.76$) and CCND1 ($\rho = -0.74$) from Cell Cycle, and FGFR1 ($\rho = -0.58$) and ARHGAP35 ($\rho = -0.57$) from RTK/RAS pathway (Figure 4A) (Table S4). Furthermore, 11 genes showed consistent significant ED (FDR < 0.05) at both molecular layers, including, FOXA1 ($\rho < -0.66$), TRPS1 ($\rho < -0.63$), CCND1 ($\rho < -0.48$), SOX17 ($\rho < -0.62$), and CDH11 ($\rho < -0.41$). Notably, 53 proteins showed significant protein-specific ED (PED without GED; $\rho_{PRO} < -0.25$, $FDR_{PRO} < 0.05$, $FDR_{RNA} > 0.05$), including FOXP4 ($\rho_{PRO} = -0.8$, $\rho_{RNA} = -0.34$, $FDR_{RNA} = 0.15$), WDR47 ($\rho_{PRO} = -0.74$, $\rho_{RNA} = -0.26$, $FDR_{RNA} = 0.3$), E2F3 ($\rho_{PRO} = -0.76$, $\rho_{RNA} = -0.3$, $FDR_{RNA} = 0.23$), and NPEPL1 ($\rho_{PRO} = -0.73$, $\rho_{RNA} = -0.21$, $FDR_{RNA} = 0.37$).

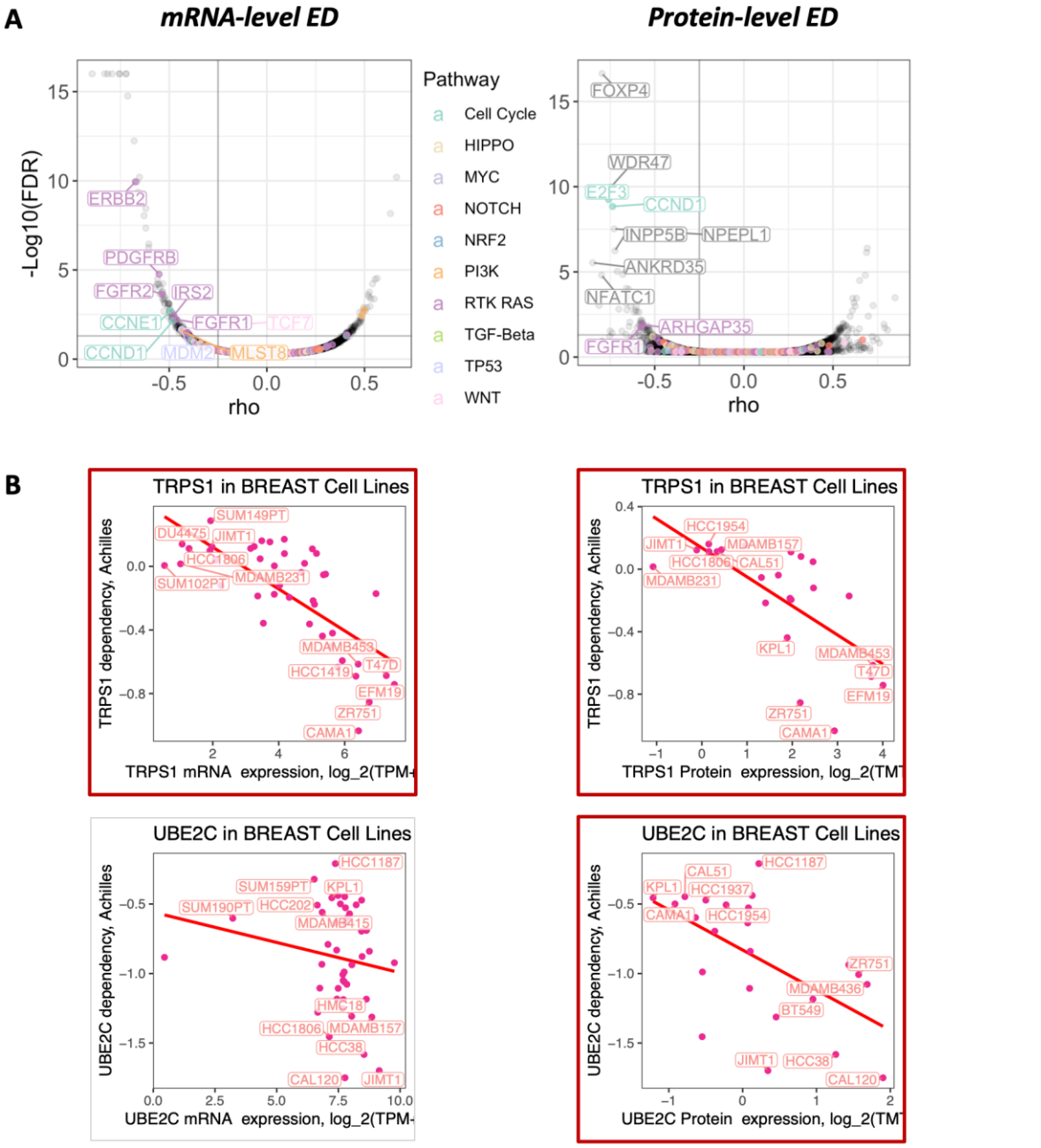


Figure 4. Identification of expression-driven dependencies (ED) in breast cancer cell lines using the BEACON method. (A) Volcano plots showing significant gene dependencies at the mRNA (left) and protein (right) levels, quantified by Bayesian correlation coefficients (ρ). Genes involved in oncogenic signaling pathways are highlighted and annotated, with significant expression-driven dependencies (GED or PED) defined as ρ < -0.25 and FDR < 0.05 (indicated by vertical and horizontal lines, respectively). (B) Correlation between gene/protein expression levels and knockout sensitivity for TRPS1 (top row) and UBE2C (bottom row) in breast cancer cell lines. Left panels depict mRNA expression-driven dependency (GED), while right panels show protein expression-driven dependency (PED). TRPS1 exhibits concordant GED and PED, while UBE2C shows PED without GED, emphasizing the value of protein-level analysis in identifying unique dependencies.

Among the 172 candidate targets we prioritized through significant results in both inter-tumor and tumor-normal analyses (Tables S1, S2; indicated by "**"), BEACON identified four candidates with significant GED at the mRNA level across breast cancer cell lines: TRPS1 (ρ = -0.71, FDR = 2e-15), DPM3 (ρ = -0.58, FDR = 2e-6), AGTRAP (ρ = -0.44, FDR = 0.02), and GIMAP6 (ρ = -0.42, FDR = 0.04) (Figure 4B) (Table S4). The negative correlation indicates that cell lines with higher TRPS1 expression exhibit greater sensitivity to TRPS1 knockout, suggesting its critical role in breast cancer cell survival. At the protein level, two proteins demonstrated significant PED: TRPS1 (ρ = -0.63, FDR = 0.001) and UBE2C (ρ = -0.53, FDR = 0.018) (Figure 4B) (Table S4). Notably, TRPS1 exhibited both GED and PED, indicating mRNA-protein concordance,

whereas UBE2C showed PED without corresponding GED, highlighting the importance of protein-level analyses in uncovering unique cancer cell vulnerabilities not readily observed by the transcriptomic data alone.

4. Discussion and conclusions

In this study, we leveraged a robust multi-omics approach to systematically identify tumor-specific protein markers and dependencies in breast cancer, revealing insights into potential therapeutic vulnerabilities. By integrating proteomic, transcriptomic, and functional dependency data, our analyses identified several previously unrecognized protein candidates, demonstrating the importance of considering both mRNA and protein-level overexpression in target prioritization, offering an additional perspective beyond conventional mutation-centered methods (Ellis et al., 2013; Krug et al., 2020).

Our integrative analysis identified hundreds of differentially expressed and overexpressed proteins in breast cancer tumors. By systematically analyzing both kinase and non-kinase proteins, we identified 172 prioritized candidates based on their tumor-specific overexpression (Figures 1, 2). Many of these proteins are implicated in key oncogenic signaling pathways, such as Cell Cycle, RTK/RAS, and WNT. Notably, we identified several concordant targets, such as CCND1, ERBB2, and EGFR, which exhibited significant overexpression at both mRNA and protein levels (Figure 3). These markers represent well-characterized drivers of breast cancer, reaffirming the validity of our approach. Importantly, our study also identified discordant targets, including FHL1, TEAD1, and FAT4, which exhibited significant protein overexpression with minimal RNA-level alterations (Figure 3). Such discrepancies can arise due to post-transcriptional regulation, protein stabilization, or translational control mechanisms that are not captured at the mRNA level (Lapek et al., 2017; Mertins et al., 2016; Elmas et al., 2021). For example, microRNA-mediated repression, altered protein degradation rates, or differential subcellular localization may drive protein accumulation independently of transcript abundance. Consequently, relying solely on transcriptomic analyses may miss biologically and clinically relevant protein-level changes that impact tumor behavior and therapeutic response. By focusing on protein-specific alterations, we were able to uncover novel potential therapeutic targets, such as UBE2C and FOXP4, that might otherwise be overlooked.

To assess the functional significance of the prioritized targets, we analyzed their (CRISPR) knockout sensitivity in breast cancer cell lines using genetic dependency data from the Cancer Dependency Map (DepMap), by focusing on genes that play a critical role in cancer cell survival due to their elevated expression levels. This analysis by BEACON approach identified both mRNA-level (GED) and protein-level (PED) expression-driven dependencies, emphasizing the importance of expression in determining cellular vulnerabilities (Figure 4). Notably, TRPS1 and UBE2C demonstrated high sensitivity to gene depletion, with breast cancer cell lines showing a strong negative correlation between their expression levels and knockout viability. Furthermore, concordant dependencies, such as TRPS1 and CCND1, highlight targets with consistent functional importance across molecular layers, cross-validating their vulnerability potential. Meanwhile, protein-specific dependencies, such as, UBE2C, E2F3, NPEPL1 and WDR47, illustrate the unique insights provided by proteomic analyses and can uncover novel vulnerabilities.

Notably, TRPS1 emerged as a high-priority target, exhibiting significant GED and PED correlations in breast cancer cells, as well as tumor-specific overexpression in the BRCA cohort. TRPS1 is a transcriptional cofactor recruited by the progesterone receptor and plays a critical role in modulating RANKL expression through epigenetic regulation in endometrial and breast cancers (Yang et al., 2023). TRPS1's context-dependent behavior, acting as a repressor in endometrial cancer and an activator in breast cancer, highlights its potential as a therapeutic target to enhance the anti-tumor effects of *Medroxyprogesterone* in endometrial cancer while mitigating its carcinogenic effects in breast cancer (Yang et al., 2023). Furhermore, TRPS1 has emerged as a promising diagnostic marker for breast cancer, as it demonstrates exceptional sensitivity and specificity across all breast cancer subtypes, especially for triple-negative breast cancer, outperforming the commonly used GATA3 marker (D. Ai et al., 2021).

We identified UBE2C as a therapeutic target through our overexpression and expression-driven dependency analysis, which revealed a unique protein-level vulnerability (PED) not observed at the mRNA level (GED). As a key regulator of the cell cycle within the ubiquitin-proteasome system, UBE2C plays a critical role in breast cancer progression. While elevated mRNA expression of UBE2C has been linked to poor disease-free and overall survival (Psyrri et al., 2012), our findings emphasize the importance of proteomic analyses in

uncovering functional dependencies that are undetectable via transcriptomic data alone. Given its strong association with aggressive tumor behavior and adverse prognosis, UBE2C holds promise as a therapeutic target. Its potential applications include patient stratification for aggressive chemotherapy regimens and targeted therapies, such as proteasome inhibitors like *bortezomib*, particularly when combined with HER2-targeting agents like *trastuzumab* (Cusack, 2003). These findings call for further investigation into the mechanistic and therapeutic implications of UBE2C in breast cancer.

Our findings offer significant implications for drug development. Several of the identified targets, such as ERBB2, EGFR, and CCND1 are already implicated in breast cancer therapies (Ali & Wendt, 2017; Yoon & Oh, 2024; B. Ai et al., 2019), demonstrating the relevance of our approach. Meanwhile, the novel targets identified in this study, including TRPS1, UBE2C, FOXP4, and E2F3, warrant further investigation to evaluate their therapeutic potential. For instance, E2F3 presents a promising therapeutic target in breast cancer, as siRNA-mediated silencing of its overexpression effectively suppresses tumor cell growth, highlighting its potential for both diagnostic and treatment strategies (Vimala et al., 2012). Comprehensive functional validation in preclinical models and drug-screening studies will be critical for translating these findings into clinical practice.

Despite the strengths of this study, several limitations must be acknowledged. First, the original dataset used in this study (Krug et al., 2020) consists of breast cancer patients distributed relatively evenly across the four major molecular subtypes: Basal, HER2, Luminal A, and Luminal B. Our analyses were performed across these subtypes, supporting the generalizability of our findings. Given this balanced representation, no additional external validation dataset was included in this study. However, the relatively small cohort size, particularly the limited availability of matched normal tissues, may affect the generalizability of our findings. Validation in larger and more diverse cohorts will be necessary to confirm the relevance of the identified targets across different breast cancer subtypes. Second, bulk proteomic analyses were used to identify tumor-specific overexpressed proteins. However, bulk proteomic data may not fully capture intratumoral heterogeneity and could mask subclonal variations. As single-cell proteomic technologies continue to advance, future studies will enable a more detailed investigation of intratumoral heterogeneity. Nevertheless, because our primary objective is to identify biomarkers that are consistently present across tumor subtypes and broadly generalizable, bulk analysis remains a powerful and appropriate approach. Additionally, although the BEACON method effectively handles multi-omics data with small sample sizes, the limited availability of proteomic dependency data may restrict the scope of PED analyses. Expanding proteomic datasets in future studies will enable a more comprehensive evaluation of protein-specific vulnerabilities. Finally, while this study establishes a robust framework for target discovery, comprehensive functional validation of the identified markers is a critical next step. Further experimental studies, including gene knockdown and drug-sensitivity assays in cell lines, such as (Elmas et al., 2022), and patient-derived models, e.g., (Huang et al., 2017), will be essential to assess the therapeutic potential of these targets.

In conclusion, this study demonstrates the utility of integrating proteomic, transcriptomic, and functional dependency data to identify tumor-specific markers and vulnerabilities in breast cancer. By uncovering both concordant and protein-specific targets, we present a prioritized list of novel actionable candidates for therapeutic development (Table S4). These findings advance our understanding of breast cancer biology and open new avenues for precision oncology strategies aimed at improving patient outcomes. The integration of these targets into clinical research could lead to the development of more personalized therapeutic interventions, enabling tailored treatments based on individual tumor profiles. Such strategies have the potential to improve early detection, enhance treatment efficacy, and ultimately contribute to better patient prognoses, moving us closer to more precise and effective cancer care.

Data and Software access

The supplementary tables referenced in this study (Tables S1-S4) are available at: https://www.columbia.edu/~ae2321/workspace/BRCA/SupplementaryTables.xlsx. The BRCA cohort data (Krug et al., 2020) is accessible through the Clinical Proteomic Tumor Analysis Consortium (CPTAC) resources provided by The National Cancer Institute. The data can be found at the following links: https://proteomic.datacommons.cancer.gov/pdc/study/PDC000116 and https://pdc.cancer.gov/pdc/. The BEACON and OPPTI softwares utilized in this work are available on GitHub: https://github.com/Huang-

lab/BEACON and https://github.com/Huang-lab/Oppti, respectively. All analyses were conducted using R programming language (version 3.6.2) through custom-written scripts.

Acknowledgement

The author extends gratitude to the BRCA cohort, along with the patients and families involved, whose generous contribution of data was essential to this work. The author also expresses gratitude to the members of the Huang lab (https://labs.icahn.mssm.edu/kuanhuanglab/members/) for their insightful discussions that significantly contributed to the development of this research. The author would like to thank the editor and the referees for their valuable contributions during the review and evaluation of this manuscript.

Declaration of ethical code

This research utilized publicly available data from previously published sources. The dataset is open access and can be freely obtained from the CPTAC Data Portal (https://pdc.cancer.gov/pdc/). As such, no separate ethics committee approval and/or legal-special permission were required for this study.

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest to disclose.

References

Ai, B., Kong, X., Wang, X., Zhang, K., Yang, X., Zhai, J., Gao, R., Qi, Y., Wang, J., Wang, Z., & Fang, Y. (2019). LINC01355 suppresses breast cancer growth through FOXO3-mediated transcriptional repression of CCND1. *Cell Death & Disease*, *10*(7), 502. https://doi.org/10.1038/s41419-019-1741-8

Ai, D., Yao, J., Yang, F., Huo, L., Chen, H., Lu, W., Soto, L. M. S., Jiang, M., Raso, M. G., Wang, S., Bell, D., Liu, J., Wang, H., Tan, D., Torres-Cabala, C., Gan, Q., Wu, Y., Albarracin, C., Hung, M.-C., … Ding, Q. (2021). TRPS1: a highly sensitive and specific marker for breast carcinoma, especially for triple-negative breast cancer. *Modern Pathology*, *34*(4), 710–719. https://doi.org/10.1038/s41379-020-00692-8

Ali, R., & Wendt, M. K. (2017). The paradoxical functions of EGFR during breast cancer progression. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, *2*(1), 16042. https://doi.org/10.1038/sigtrans.2016.42

Barretina, J., Caponigro, G., Stransky, N., Venkatesan, K., Margolin, A. A., Kim, S., Wilson, C. J., Lehár, J., Kryukov, G. V, Sonkin, D., Reddy, A., Liu, M., Murray, L., Berger, M. F., Monahan, J. E., Morais, P., Meltzer, J., Korejwa, A., Jané-Valbuena, J., … Garraway, L. A. (2012). The Cancer Cell Line Encyclopedia enables predictive modelling of anticancer drug sensitivity. *Nature*, *483*(7391), 603–607. https://doi.org/10.1038/nature11003

Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, *57*(1), 289–300. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x

Cotto, K. C., Wagner, A. H., Feng, Y.-Y., Kiwala, S., Coffman, A. C., Spies, G., Wollam, A., Spies, N. C., Griffith, O. L., & Griffith, M. (2018). DGIdb 3.0: a redesign and expansion of the drug-gene interaction database. *Nucleic Acids Research*, *46*(D1), D1068–D1073. https://doi.org/10.1093/nar/gkx1143

Cusack, J. (2003). Rationale for the treatment of solid tumors with the proteasome inhibitor bortezomib. *Cancer Treatment Reviews*, *29*, 21–31. https://doi.org/10.1016/S0305-7372(03)00079-3

Dempster, J. M., Boyle, I., Vazquez, F., Root, D. E., Boehm, J. S., Hahn, W. C., Tsherniak, A., & McFarland, J. M. (2021). Chronos: a cell population dynamics model of CRISPR experiments that improves inference of gene fitness effects. *Genome Biology*, *22*(1), 343. https://doi.org/10.1186/s13059-021-02540-7

Ellis, M. J., Gillette, M., Carr, S. A., Paulovich, A. G., Smith, R. D., Rodland, K. K., Townsend, R. R., Kinsinger, C., Mesri, M., Rodriguez, H., & Liebler, D. C. (2013). Connecting genomic alterations to cancer biology with proteomics: The NCI clinical proteomic tumor analysis consortium. *Cancer Discovery*, *3*(10), 1108–1112. https://doi.org/10.1158/2159-8290.CD-13-0219

Elmas, A. (2024). Proteomic landscape of breast cancer tumors identifies novel therapeutic targets. In Altınok Bahar (Ed.), *3. Bilsel International Aspendos Scientific Researches Congress* (pp. 82–91). Astana.

Elmas, A., & Huang, K. (n.d.). *https://github.com/Huang-lab/BEACON*.

Elmas, A., Layden, H. M., Ellis, J. D., Bartlett, L. N., Zhao, X., Kawabata-Iwakawa, R., Obinata, H., Hiebert, S. W., & Huang, K. (2024). Expression-driven genetic dependency reveals targets for precision medicine. In *bioRxiv*. https://doi.org/10.1101/2024.10.17.618926

Elmas, A., Lujambio, A., & Huang, K.-L. (2022). Proteomic analyses identify therapeutic targets in hepatocellular carcinoma. *Frontiers in Oncology*, *12*, 814120. https://doi.org/10.3389/fonc.2022.814120

Elmas, A., Tharakan, S., Jaladanki, S., Galsky, M. D., Liu, T., & Huang, K.-L. (2021). Pan-cancer proteogenomic investigations identify post-transcriptional kinase targets. *Communications Biology*, *4*(1), 1112. https://doi.org/10.1038/s42003-021-02636-7

Engel, R. H., & Kaklamani, V. G. (2007). HER2-positive breast cancer: current and future treatment strategies. *Drugs*, *67*(9), 1329–1341. https://doi.org/10.2165/00003495-200767090-00006

Ghandi, M., Huang, F. W., Jané-Valbuena, J., Kryukov, G. V., Lo, C. C., McDonald, E. R., Barretina, J., Gelfand, E. T., Bielski, C. M., Li, H., Hu, K., Andreev-Drakhlin, A. Y., Kim, J., Hess, J. M., Haas, B. J., Aguet, F., Weir, B. A., Rothberg, M. V., Paolella, B. R., … Sellers, W. R. (2019). Next-generation characterization of the Cancer Cell Line Encyclopedia. *Nature*, *569*(7757), 503–508. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1186-3

Giaquinto, A. N., Sung, H., Newman, L. A., Freedman, R. A., Smith, R. A., Star, J., Jemal, A., & Siegel, R. L. (2024). Breast cancer statistics 2024. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. https://doi.org/10.3322/caac.21863

Huang, K.-L., Li, S., Mertins, P., Cao, S., Gunawardena, H. P., Ruggles, K. V, Mani, D. R., Clauser, K. R., Tanioka, M., Usary, J., Kavuri, S. M., Xie, L., Yoon, C., Qiao, J. W., Wrobel, J., Wyczalkowski, M. A., Erdmann-Gilmore, P., Snider, J. E., Hoog, J., … Ding, L. (2017). Proteogenomic integration reveals therapeutic targets in breast cancer xenografts. *Nature Communications*, *8*, 14864. https://doi.org/10.1038/ncomms14864

Krug, K., Jaehnig, E. J., Satpathy, S., Blumenberg, L., Karpova, A., Anurag, M., Miles, G., Mertins, P., Geffen, Y., Tang, L. C., Heiman, D. I., Cao, S., Maruvka, Y. E., Lei, J. T., Huang, C., Kothadia, R. B., Colaprico, A., Birger, C., Wang, J., … Clinical Proteomic Tumor Analysis Consortium. (2020). Proteogenomic landscape of breast cancer tumorigenesis and targeted therapy. *Cell*, *183*(5), 1436-1456.e31. https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.10.036

Lang, G.-T., Jiang, Y.-Z., Shi, J.-X., Yang, F., Li, X.-G., Pei, Y.-C., Zhang, C.-H., Ma, D., Xiao, Y., Hu, P.-C., Wang, H., Yang, Y.-S., Guo, L.-W., Lu, X.-X., Xue, M.-Z., Wang, P., Cao, A.-Y., Ling, H., Wang, Z.-H., … Shao, Z.-M. (2020). Characterization of the genomic landscape and actionable mutations in Chinese breast cancers by clinical sequencing. *Nature Communications*, *11*(1), 5679. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19342-3

Lapek, J. D., Greninger, P., Morris, R., Amzallag, A., Pruteanu-Malinici, I., Benes, C. H., & Haas, W. (2017). Detection of dysregulated protein-association networks by high-throughput proteomics predicts cancer vulnerabilities. *Nature Biotechnology*. https://doi.org/10.1038/nbt.3955

Manning, G., Whyte, D. B., Martinez, R., Hunter, T., & Sudarsanam, S. (2002). The protein kinase complement of the human genome. *Science (New York, N.Y.)*, *298*(5600), 1912–1934. https://doi.org/10.1126/science.1075762

Mertins, P., Mani, D. R., Ruggles, K. V, Gillette, M. A., Clauser, K. R., Wang, P., Wang, X., Qiao, J. W., Cao, S., Petralia, F., Kawaler, E., Mundt, F., Krug, K., Tu, Z., Lei, J. T., Gatza, M. L., Wilkerson, M., Perou, C. M., Yellapantula, V., … NCI CPTAC. (2016). Proteogenomics connects somatic mutations to signalling in breast cancer. *Nature*, *534*(7605), 55–62. https://doi.org/10.1038/nature18003

Meyers, R. M., Bryan, J. G., McFarland, J. M., Weir, B. A., Sizemore, A. E., Xu, H., Dharia, N. V, Montgomery, P. G., Cowley, G. S., Pantel, S., Goodale, A., Lee, Y., Ali, L. D., Jiang, G., Lubonja, R., Harrington, W. F., Strickland, M., Wu, T., Hawes, D. C., … Tsherniak, A. (2017). Computational correction of copy number effect improves specificity of CRISPR–Cas9 essentiality screens in cancer cells. *Nature Genetics*, *49*(12), 1779–1784. https://doi.org/10.1038/ng.3984

Nusinow, D. P., Szpyt, J., Ghandi, M., Rose, C. M., McDonald, E. R., Kalocsay, M., Jané-Valbuena, J., Gelfand, E., Schweppe, D. K., Jedrychowski, M., Golji, J., Porter, D. A., Rejtar, T., Wang, Y. K., Kryukov, G. V., Stegmeier,

F., Erickson, B. K., Garraway, L. A., Sellers, W. R., & Gygi, S. P. (2020). Quantitative proteomics of the Cancer Cell Line Encyclopedia. *Cell*, *180*(2), 387-402.e16. https://doi.org/10.1016/j.cell.2019.12.023

Pacini, C., Dempster, J. M., Boyle, I., Gonçalves, E., Najgebauer, H., Karakoc, E., van der Meer, D., Barthorpe, A., Lightfoot, H., Jaaks, P., McFarland, J. M., Garnett, M. J., Tsherniak, A., & Iorio, F. (2021). Integrated cross-study datasets of genetic dependencies in cancer. *Nature Communications*, *12*(1), 1661. https://doi.org/10.1038/s41467-021-21898-7

Psyrri, A., Kalogeras, K. T., Kronenwett, R., Wirtz, R. M., Batistatou, A., Bournakis, E., Timotheadou, E., Gogas, H., Aravantinos, G., Christodoulou, C., Makatsoris, T., Linardou, H., Pectasides, D., Pavlidis, N., Economopoulos, T., & Fountzilas, G. (2012). Prognostic significance of UBE2C mRNA expression in high-risk early breast cancer. A hellenic cooperative oncology group (HECOG) study. *Annals of Oncology*, *23*(6), 1422–1427. https://doi.org/10.1093/annonc/mdr527

Sanchez-Vega, F., Mina, M., Armenia, J., Chatila, W. K., Luna, A., La, K. C., Dimitriadoy, S., Liu, D. L., Kantheti, H. S., Saghafinia, S., Chakravarty, D., Daian, F., Gao, Q., Bailey, M. H., Liang, W.-W., Foltz, S. M., Shmulevich, I., Ding, L., Heins, Z., … Schultz, N. (2018). Oncogenic signaling pathways in The Cancer Genome Atlas. *Cell*, *173*(2), 321-337.e10. https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.03.035

Tsherniak, A., Vazquez, F., Montgomery, P. G., Weir, B. A., Kryukov, G., Cowley, G. S., Gill, S., Harrington, W. F., Pantel, S., Krill-Burger, J. M., Meyers, R. M., Ali, L., Goodale, A., Lee, Y., Jiang, G., Hsiao, J., Gerath, W. F. J., Howell, S., Merkel, E., … Hahn, W. C. (2017). Defining a cancer dependency map. *Cell*, *170*(3), 564-576.e16. https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.06.010

Vogel, C., & Marcotte, E. M. (2012). Insights into the regulation of protein abundance from proteomic and transcriptomic analyses. Nature Reviews Genetics, 13(4), 227-232. https://doi.org/10.1038/nrg3185

Vimala, K., Sundarraj, S., Sujitha, M. V., & Kannan, S. (2012). Curtailing overexpression of E2F3 in breast cancer using siRNA (E2F3)-based gene silencing. *Archives of Medical Research*, *43*(6), 415–422. https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2012.08.009

Yang, L., Fan, Q., Wang, J., Yang, X., Yuan, J., Li, Y., Sun, X., & Wang, Y. (2023). TRPS1 regulates the opposite effect of progesterone via RANKL in endometrial carcinoma and breast carcinoma. *Cell Death Discovery*, *9*(1), 185. https://doi.org/10.1038/s41420-023-01484-0

Yoon, J., & Oh, D.-Y. (2024). HER2-targeted therapies beyond breast cancer — an update. *Nature Reviews Clinical Oncology*, *21*(9), 675–700. https://doi.org/10.1038/s41571-024-00924-9

Supplementary Figures

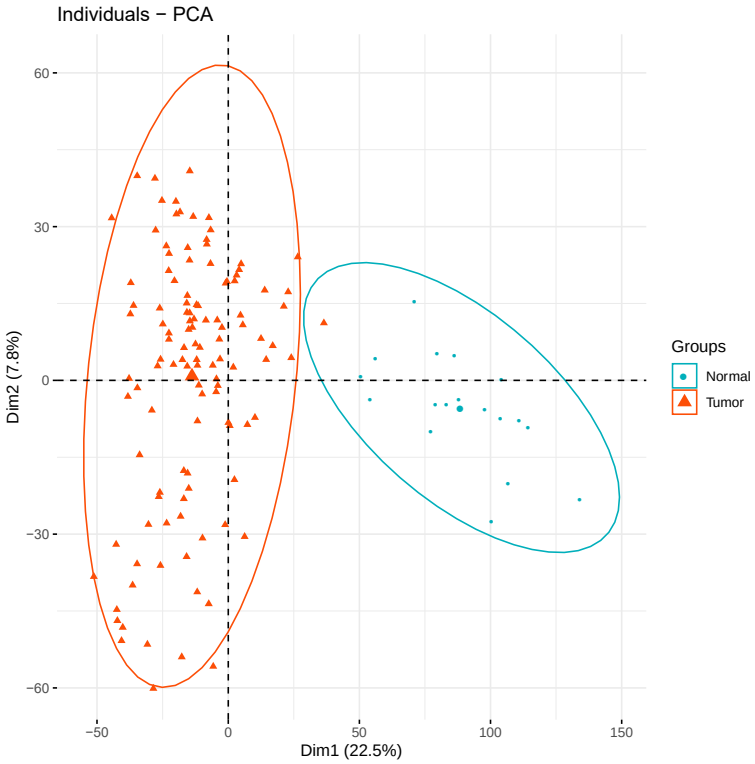


Figure S1. Principal Component Analysis (PCA) of normal and tumor samples. PCA was conducted to explore the primary sources of variation in the dataset. The analysis reveals clear separation between normal (blue) and tumor (red) samples, indicating that clustering is primarily driven by biological differences rather than technical artifacts.

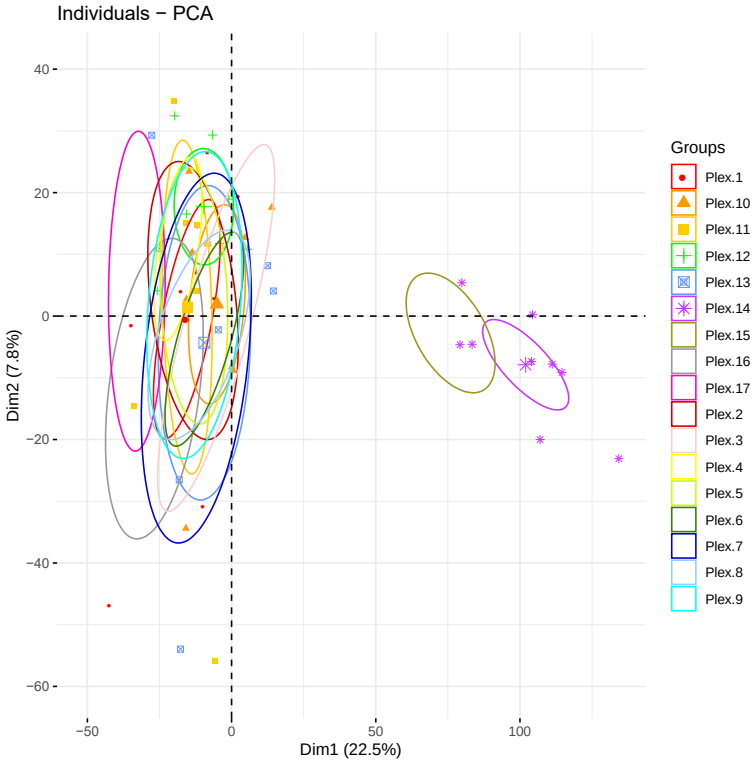


Figure S2. Principal Component Analysis (PCA) colored by sample batch. PCA was performed to evaluate potential batch effects. The absence of distinct clustering based on batch grouping suggests that batch effects are minimal, further supporting the robustness of the dataset.

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 274-285 doi: 10.17714/gumusfenbil.1568128 Research Article

The novel numerical solutions of conformable fractional Cahn-Hilliard equation in the presence of advection and reaction terms via the novel hybrid method

Adveksiyon ve reaksiyon terimlerinin varlığında uyumlu kesirli Cahn-Hilliard denkleminin yeni hibrit yöntemle yeni sayısal çözümleri

Aslı ALKAN*[1], Hasan BULUT[2], Tolga AKTÜRK[3]

[1,2]*Fırat University, Faculty of Science, Department of Mathematics, 23200, Elazığ*

[3]*Ordu University, Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, 52200, Ordu*

• Received: 15.10.2024 • Accepted: 06.03.2025

Abstract

In this paper, the novel numerical method is used to analyze the conformable fractional Cahn-Hilliard equation. The Cahn-Hilliard equation is a mathematical model employed as a crucial tool in mathematical physics, specifically for understanding phase separation phenomena such as spinodal decomposition in systems with multiple phases. This study investigates the convergence and error of the proposed future scheme. The proposed technique produces h-curves that show the series solution's convergence interval. To ascertain the efficacy and appropriateness of this technique, the error analysis has been conducted. Also, 2D and 3D graphs of the solutions were drawn. Additionally, the behavior of the graphs was commented. This technique has been shown to be simple, effective and fast.

Keywords: Cahn-Hilliard equation, Shehu transform, Error analysis

Öz

Bu makalede, uyumlu kesirli Cahn-Hilliard denklemini analiz etmek için yeni sayısal yöntem kullanılmıştır. Cahn-Hilliard denklemi, matematiksel fizikte, özellikle çoklu fazlı sistemlerde spinodal ayrışma gibi faz ayırma olaylarını anlamak için önemli bir araç olarak kullanılan matematiksel bir modeldir. Bu çalışma, önerilen gelecekteki şemanın yakınsaklığını ve hatasını araştırmaktadır. Önerilen teknik, seri çözümünün yakınsama aralığını gösteren h-eğrileri üretir. Bu tekniğin etkinliğini ve uygunluğunu belirlemek için hata analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çözümlerin 2B ve 3B grafikleri çizilmiştir. Ek olarak, grafiklerin davranışı yorumlanmıştır. Bu tekniğin basit, etkili ve hızlı olduğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: *Cahn-Hilliard denklemi, Shehu dönüşümü, Hata analizi*

*Aslı ALKAN; alkanasli47@gmail.com

1. Introduction

Fractional calculus (FC) is a mathematical framework that expands the traditional calculus, which deals with integer order derivatives and integrals, to include derivatives and integrals of arbitrary order. Scientists have recently started to explore FC due to its capacity to offer precise descriptions for different types of nonlinear phenomena. Fractional differential equations (FDEs) exhibit nonlocal and hereditary material property effects. Several distinguished scholars conducted thorough research and developed specific definitions for FC, proposing innovative ideas that laid the groundwork for the discipline of FC. Nowadays, FC are widely employed in the development of nonlinear modelling. Various phenomena, such as chaotic processes, noisy environments. economic models, a noisy environment, physics, and others, have been linked to the theory of fractional-order calculus. The solutions of FDEs play a vital role in characterizing the properties of natural nonlinear systems. The scientists utilize several analytical and numerical methods to derive exact solutions for FDEs that describe nonlinear events (Miller & Ross, 1993; Baleanu et al., 2012; Baleanu et al., 2017; Esen et al., 2018; Veeresha et al., 2019).

The conformable fractional derivative (CFD) is a main and efficient concept. The CFD is an effective tool for tackling complex issues. Numerical solutions for differential equations that have CFD are comparatively simpler than those involving Caputo fractional derivative. This enables the application of the CFD, which is valuable to model various physical phenomena. Various fractional models are employed in natural sciences. A multitude of scholars have already employed CFD in a diverse array of disciplines. The CFD circumvents certain limitations associated with the current fractional operators (Khalil et al., 2014; Abdeljawad, 2015; Gao and Chi, 2020).

The Cahn–Hilliard equation (CHE) was formulated by Cahn and Hilliard. The mathematical model in question is a crucial tool in mathematical physics, specifically for understanding phase separation phenomena such as spinodal decomposition in systems with multiple phases. The nonlinearity inherent in the CHE poses challenges in determining its exact solution. The complexity increases when it involves diffusion, advection, interface thickness parameters, and reaction terms. A crucial and significant feature of CHE is the finite thickness of the interface between two phases. Researchers and scientists in the literature investigate and analyze many variations of CHE, along with its applications in various engineering and scientific domains. Homotopy perturbation method (HPM) has been utilized to examine fractional CHE. The resolution of the time-fractional CHE with a reaction term by employing the homotopy analysis method has been analyzed. Homotopy analysis method (HAM) has been employed to analyze the resolution of the time-fractional CHE with a reaction term. Zhu et al. presented the resolution of the CHE by incorporating variable mobility. The solution behavior of the CHE using degenerate mobility has been examined. The generalized CHE, which incorporates temperature and mixing influences has been analyzed. The adaptive neural networks methodology has been employed to numerically solve CHEs. The viscous CHE has been solved via the variational iteration method. CHE has been resolved utilizing HPM and variational iteration method. Obtaining an exact analytical solution of the CHE is challenging because of the narrow interface width and abrupt change at the contact. The literature analysis indicates that CHE, which involves parameters of physical significance, has not been substantially investigated due to its intricate nature (Cahn & Hilliard, 1958; Kim et al., 2016; Bouhassoun & Hamdi Cherif, 2015; Tripathi et al., 2017; Shah & Siddiqui, 2012; Ugurlu & Kaya, 2008; Hussain et al., 2022).

Due to the presence of an integral in the description of the fractional operator in the nonlinear equations, solving these challenges often becomes more complex. The precise and quantitative solutions to the fractional equations are explored utilizing various computational methods that have been developed. The methods used include Adomian decomposition method (ADM) (Ray & Bera, 2006; Wazwaz & Gorguis, 2004), variational iteration method (VIM)) (Das, 2009), homotopy analysis method (HAM)) (Liao, 2004; Alkan, 2022, 2024), differential transform method (DTM) (Merdan et al., 2019), homotopy perturbation method (HPM) (He, 1998, 1999, 2003), residual power series method (RPSM) (Kurt et al., 2019), q-homotopy analysis transform method (q-HATM) (Şenol et al., 2019; Akınyemi et al., 2020), fractional reduced differential transform method (FRDTM) (Akınyemi, 2020), fractional natural transform decomposition method (FNTDM) (Alkan & Anaç, 2024), conformable Elzaki Adomian decomposition method (CEADM) (Avit & Anaç, 2024).

The innovation of this study is to get the novel numerical solutions of the conformable fractional nonlinear Cahn-Hilliard equation via the conformable q-Shehu analysis transform method (Cq-SHATM).

This paper is constructed as follows. Part 2 presents the fundamental of the CFD, its fundamental definitions and significant features. Part 3 introduces the Cq-SHATM. The offered method is utilized to solve the conformable fractional Cahn-Hilliard equation in Part 4. The outcomes are presented in part 5. The conclusion is presented in Section 6.

2. The fundamental definitions and theorems

In the Part, the fundamental definitions and theorems are given.

Definition 2.1. Assume that the function $h: [0, \infty) \to \mathbb{R}$. Thus, CFD for h of order μ is defined as (Khalil et al., 2014; Abdeljawad, 2015).

$$D_\mu(h)(x) = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{h(x + \varepsilon x^{1-\mu}) - h(x)}{\varepsilon}, \tag{1}$$

for $\forall x > 0, 0 < \mu \leq 1$.

Theorem 2.1. Assume that $0 < \mu \leq 1, \rho, \sigma$ are $\mu -$differentiable at the point $x \in (0, \infty)$. Thus, the following properties exist (Khalil et al., 2014; Abdeljawad, 2015).

(i) $D_\mu(c_1\rho + c_2\sigma) = c_1 D_\mu(\rho) + c_2 D_\mu(\sigma)$, for $\forall\, c_1, c_2 \in \mathbb{R}$, (2)

(ii) $D_\mu(x^p) = px^{p-1}$, for $\forall p \in \mathbb{R}$, (3)

(iii) $D_\mu(c) = 0$, for $\forall \rho(t) = c$, (4)

(iv) $D_\mu(\rho\sigma) = \rho D_\mu(\sigma) + \sigma D_\mu(\rho)$, (5)

(v) $D_\mu\left(\frac{\rho}{\sigma}\right) = \frac{\sigma D_\mu(\rho) - \rho D_\mu(\sigma)}{\sigma^2}$. (6)

Definition 2.2. Assume that the function $h: [0, \infty) \to \mathbb{R}$. Thus, conformable Shehu transform (CST) of h order α is defined as (Khalil et al., 2014; Abdeljawad, 2015).

$$^{C}\mathcal{S}_\alpha[h(t)] = V_\alpha(s; u) = \int_0^\infty exp\left(\frac{-st^\alpha}{u\alpha}\right) h(t) t^{\alpha-1} dt. \tag{7}$$

Definition 2.3. Assume that $\mu \in (0, 1]$, $h: [0, \infty) \to \mathbb{R}$ is the function. The CST for the CFD of $h(t)$ is identified as (Benattia & Belghaba, 2021).

$$V_\mu\left[D_\mu h(t)\right](v) = \frac{s}{u} V_\mu(s; u) - h(0). \tag{8}$$

3. The numerical method

Examine the conformable time-fractional partial differential equations (CTFPDEs) (Erol et al., 2023).

$$D_t^\alpha w(x, t) + Aw(x, t) + Hw(x, t) = \xi(x, t), t > 0, n - 1 < \alpha \leq n, \tag{9}$$

where A and H are respectively linear and nonlinear operators, $\xi(x, t)$ is a source term and D_t^α is the CFD operator.

Applying the CST to this equation with the initial condition (IC), then, it is acquired as

$$\frac{s}{u}\, ^{C}\mathcal{S}_\alpha[\varpi(x, t)] - \varpi(x, 0) + \, ^{C}\mathcal{S}_\alpha[A\varpi(x, t)] + \, ^{C}\mathcal{S}_\alpha[H\varpi(x, t)] = \, ^{C}\mathcal{S}_\alpha[\xi(x, t)]. \tag{10}$$

Simplifying the equation (10), equation (20) is derived as

$$^{C}\mathcal{S}_\alpha[\varpi(x, t)] - \frac{u}{s}\varpi(x, 0) + \frac{u}{s}\, ^{C}\mathcal{S}_\alpha[A\varpi(x, t)] + \frac{u}{s}\, ^{C}\mathcal{S}_\alpha[H\varpi(x, t)] - \frac{u}{s}\, ^{C}\mathcal{S}_\alpha[\xi(x, t)] = 0. \tag{11}$$

Using the homotopy analysis method, the nonlinear operator to $\rho(x,t;q)$ is described by

$$N[\rho(x,t;q)\,] = {}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[\rho(x,t;q)\,] - \frac{u}{s}\rho(x,t;q)\,(0^{+}) + \frac{u}{s}({}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[A\rho(x,t;q)] + {}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[H\rho(x,t;q)] - {}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[\xi(x,t)]), \tag{12}$$

where $q\epsilon\left[0,\frac{1}{n}\right]$.
A homotopy is produced by

$$(1-nq)\,{}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[\rho(x,t;q) - \varpi_0(x,t)] = hqH^{1,*}(x,t)H[\rho(x,t;q)], \tag{13}$$

where, $h \neq 0$ is the auxiliary parameter. For $q = 0$ and $q = \frac{1}{n}$, the outcomes of this equation are obtained in the following

$$\rho(x,t;0) = \varpi_0(x,t), \rho\left(x,t;\frac{1}{n}\right) = \varpi(x,t). \tag{14}$$

Therefore, while increasing the value of q from 0 to $1/n$, the solution $\rho(x,t;q)$ approaches the solution $\varpi(x,t)$ by beginning at $\varpi_0(x,t)$. By using the Taylor theorem around q and thereafter expanding $\rho(x,t;q)$, the resulting expression is produced as

$$\rho(x,t;q) = \varpi_0(x,t) + \sum_{i=1}^{\infty}\varpi_m(x,t)q^m, \tag{15}$$

where,

$$\varpi_m(x,t) = \frac{1}{m!}\frac{\partial^m\rho(x,t;q)}{\partial q^m}|_{q=0}. \tag{16}$$

Eq. (15) approaches at $q = \frac{1}{n}$ for the convenient $\varpi_0(x,t)$, n and h. Subsequently, we obtain the solution for the Eq. (9) in the specified format

$$\varpi(x,t) = \varpi_0(x,t) + \sum_{m=1}^{\infty}\varpi_m(x,t)\left(\frac{1}{n}\right)^m. \tag{17}$$

By taking the $m-th$ derivative of Eq. (13) with respect to q and dividing by the factorial of m, when $q = 0$, we obtain

$${}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[\varpi_m(x,t) - k_m\varpi_{m-1}(x,t)] = hH^{1,*}(x,t)\mathcal{R}_{*}(\vec{\varpi}_{m-1}), \tag{18}$$

where the vectors are given by

$$\vec{\varpi}_m = \{\varpi_0(x,t), \varpi_1(x,t), \dots, \varpi_m(x,t)\}. \tag{19}$$

Inverse CST is applied to Eq. (18), we get

$$\varpi_m(x,t) = \chi_m\varpi_{m-1}(x,t) + h\left({}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}\right)^{-1}\left[H^{1,*}(x,t)\mathcal{R}_{1,m}(\vec{\varpi}_{m-1})\right], \tag{20}$$

where

$$\mathcal{R}_{1,m}(\vec{\varpi}_{m-1}) = {}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[\varpi_{m-1}(x,t)] - \left(1-\frac{\chi_m}{n}\right)\frac{u}{s}\varpi_0(x,t) + \frac{\mathrm{u}}{s}\,{}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[A\varpi_{m-1}(x,t) + H^{1,*}{}_{m-1}(x,t) - \xi(x,t)], \tag{21}$$

and

$$\chi_m = \begin{cases} 0, & m \leq 1, \\ n, & m > 1. \end{cases} \tag{22}$$

Also, $H_m^{1,*}$ is homotopy polynomial and introduced by

$$H_m^{1,*} = \frac{1}{m!}\frac{\partial^m \psi(x,t;q)}{\partial q^m}|_{q=0} \quad \text{and } \psi(x,t;q) = \psi_0 + q\psi_1 + q^2\psi_2 + \cdots. \tag{23}$$

Utilizing Eqs. (20)-(21), one gets

$$\begin{aligned} &\varpi_m(x,t) = (\chi_m + h)\varpi_{m-1}(x,t) - \left(1 - \frac{\chi_m}{n}\right)\frac{u}{s}\varpi_0(x,t) \\ &+h\left({}^{C}\mathcal{S}_\alpha\right)^{-1}\left[\left(\frac{\mathrm{u}}{s}\,{}^{C}\mathcal{S}_\alpha[A\varpi_{m-1}(x,t) + H^{1,*}{}_{m-1}(x,t) - \xi(x,t)\right]\right)\Big]. \end{aligned} \tag{24}$$

Via Cq-SHATM, then we have

$$\varpi(x,t) = \sum_{m=0}^{\infty} \varpi_m(x,t). \tag{25}$$

4. Application

Let us analyze the conformable fractional nonlinear CH equation (CFNCHE) (Ugurlu & Kaya, 2008; Hussain et al., 2022)

$$\begin{aligned} &D_t^\alpha w(x,t) - 6w(x,t)\left(\frac{\partial w(x,t)}{\partial x}\right)^2 - 3w^2(x,t)\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} \\ &- \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} = 0, 0 < \alpha \leq 1, \end{aligned} \tag{26}$$

with IC

$$w(x,0) = \tanh\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right). \tag{27}$$

Applying the CST to Eq. (26) and using the IC, we have

$$\begin{aligned} &\frac{s}{u}\,{}^{C}\mathcal{S}_\alpha[w(x,t)] - w(x,0) + {}^{C}\mathcal{S}_\alpha\left[-6w(x,t)\left(\frac{\partial w(x,t)}{\partial x}\right)^2 - 3w^2(x,t)\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}\right. \\ &\left. + \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} - \frac{\partial w(x,t)}{\partial x}\right] = 0. \end{aligned} \tag{28}$$

By simplifying the Eq. (28), we get

$$\begin{aligned} &{}^{C}\mathcal{S}_\alpha[w(x,t)] - \frac{u}{s}w(x,0) + \frac{u}{s}\,{}^{C}\mathcal{S}_\alpha\left[-6w(x,t)\left(\frac{\partial w(x,t)}{\partial x}\right)^2 - 3w^2(x,t)\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}\right. \\ &\left. + \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} - \frac{\partial w(x,t)}{\partial x}\right] = 0. \end{aligned} \tag{29}$$

Using the homotopy analysis method, the nonlinear operator to the function $\rho(x,t;q)$ is described by

$$N[\rho(x,t;q)\,] = {}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[\rho(x,t;q)\,] - \frac{u}{s}\rho(x,t;q)\,(0^{+}) + \frac{u}{s}\,{}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[-6\rho(x,t;q) \times \left(\frac{\partial\rho(x,t;q)}{\partial x}\right)^{2} - 3\rho^{2}(x,t)\frac{\partial^{2}\rho(x,t;q)}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}\rho(x,t;q)}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{4}\rho(x,t;q)}{\partial x^{4}} - \frac{\partial\rho(x,t;q)}{\partial x}\Big], \tag{30}$$

where $q\epsilon\left[0,\frac{1}{n}\right]$.

The application of the proposed algorithm yields the definition of the m order deformation equation as

$${}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[w_{m}(x,t) - \chi_{m}w_{m-1}(x,t)] = h\mathcal{R}_{1,m}(\vec{w}_{m-1}), \tag{31}$$

where

$$\mathcal{R}_{1,m}(\vec{w}_{m-1}) = {}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}[w_{m-1}(x,t)] - \left(1 - \frac{\chi_{m}}{n}\right)\frac{u}{s}w_{0}(x,t) + \frac{\mathrm{u}}{s}\,{}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}\left[-6\sum_{r=0}^{m-1}\left(\sum_{j=0}^{r}w_{j}\frac{\partial w_{r-j}}{\partial x}\right)\frac{\partial w_{m-1-r}}{\partial x} - 3\sum_{r=0}^{m-1}\left(\sum_{j=0}^{r}w_{j}w_{r-j}\right)\frac{\partial^{2}w_{m-1-r}}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}w_{m-1}(x,t)}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{4}w_{m-1}(x,t)}{\partial x^{4}} - \frac{\partial w_{m-1}(x,t)}{\partial x}\right]. \tag{32}$$

Inverse CST is applied to Eq. (31), it is obtained as

$$w_{m}(x,t) = \chi_{m}w_{m-1}(x,t) + h\left({}^{C}\mathcal{S}_{\alpha}\right)^{-1}[\mathcal{R}_{m}(\vec{w}_{m-1})]. \tag{33}$$

Using the IC, then we get

$$w_{0}(x,t) = \tanh\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right). \tag{34}$$

For $m = 1, m = 2$ in the Eq. (33) respectively, we obtain

$$w_{1}(x,t) = -\frac{h\sqrt{2}t^{\alpha}}{2\alpha}\operatorname{sech}^{2}\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right), \tag{35}$$

$$w_{2}(x,t) = (n+h)\left(\frac{-h\sqrt{2}t^{\alpha}}{2\alpha}\operatorname{sech}^{2}\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right)\right) + h\left(-\frac{3}{\alpha}\operatorname{sech}^{2}\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right)\tanh\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right)\right)\left[-\tanh^{2}\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right)t^{\alpha} + \frac{ht^{2\alpha}\sqrt{2}}{2}\left(\cosh^{2}\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right) - \frac{3}{2}\right) \times \tanh\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right) + \frac{ht^{2\alpha}}{6}\right]. \tag{36}$$

The truncated series is used to approximate the analytical solution of $w(x,t)$:

$$w(x,t) = \lim_{\delta\to\infty}\mu_{\delta}(x,t), \tag{37}$$

where

$$\mu_{\delta}(x,t) = \sum_{m=1}^{\delta-1}w_{m}(x,t). \tag{38}$$

Therefore, the Cq-SHATM solution of Eq. (26) is obtained as

$$w(x,t) = w_0(x,t) + \sum_{m=1}^{\infty} w_m(x,t)\left(\frac{1}{n}\right)^m = \tanh\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) - \frac{h\sqrt{2}t^{\alpha}}{2\alpha}\operatorname{sech}^2\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right)$$
$$+(n+h)\left(\frac{-h\sqrt{2}t^{\alpha}}{2\alpha}\operatorname{sech}^2\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right)\right) + h\left(-\frac{3}{\alpha}\operatorname{sech}^2\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right)\tanh\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right)\right)$$
$$\times\left[-\tanh^2\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right)t^{\alpha} + \frac{ht^{2\alpha}\sqrt{2}}{2}\left(\cosh^2\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right) - \frac{3}{2}\right)\tanh\left(\frac{x\sqrt{2}}{2}\right) + \frac{ht^{2\alpha}}{6}\right]. \quad (39)$$

Figs. 1-5 demonstrates 3D graphics representing the Cq-SHATM solution, with the distinct values of α at $n = 1$ and $h = -1$.

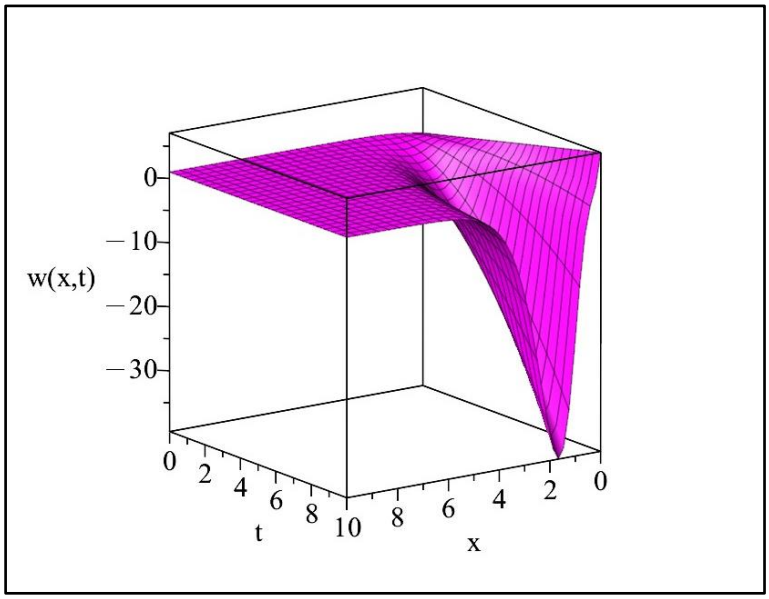


Figure 1. For $\alpha = 1$ Cq-SHATM solution

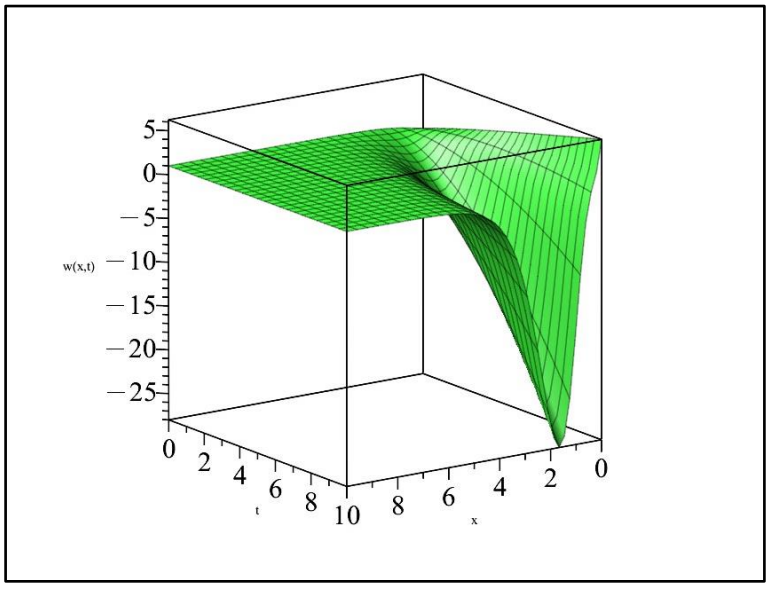


Figure 2. For $\alpha = 0.9$ Cq-SHATM solution

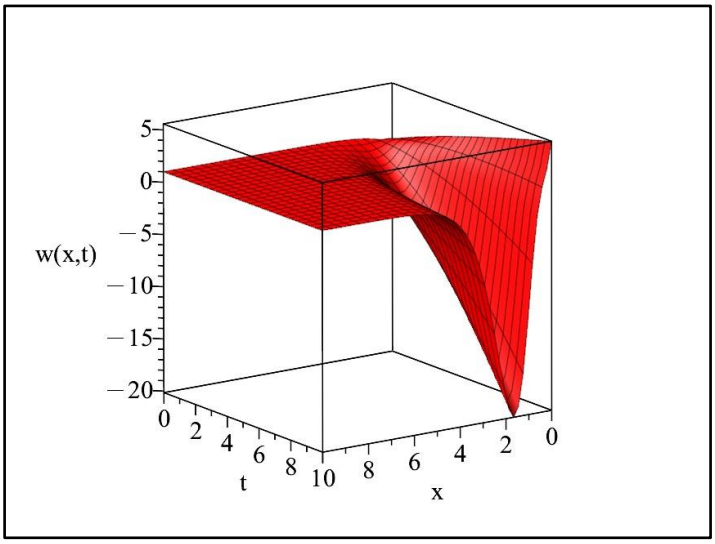


Figure 3. For $\alpha = 0.8$, Cq-SHATM solution

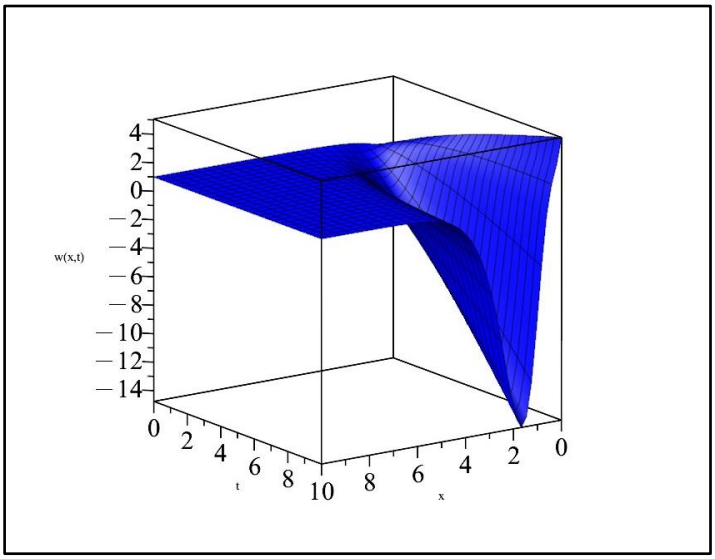


Figure 4. For $\alpha = 0.7$, Cq-SHATM solution

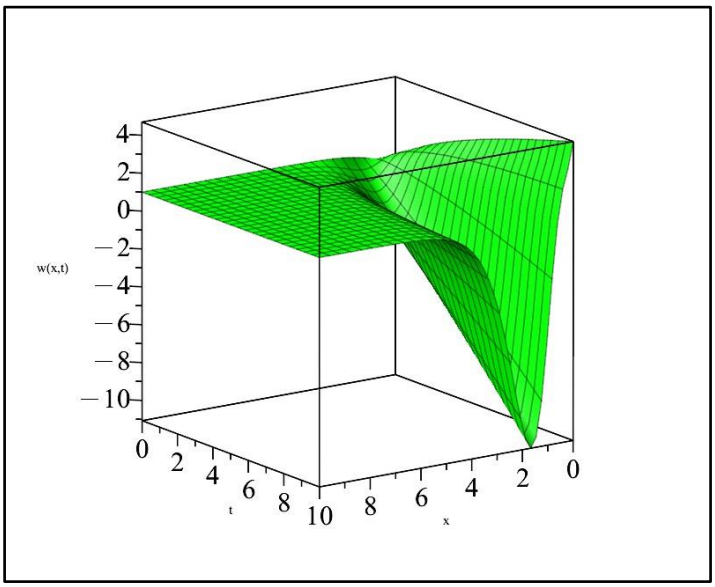


Figure 5. For $\alpha = 0.6$, Cq-SHATM solution

Figure 6 illustrates the two dimensional plots for Cq-SHATM solutions, each represented by various α values.

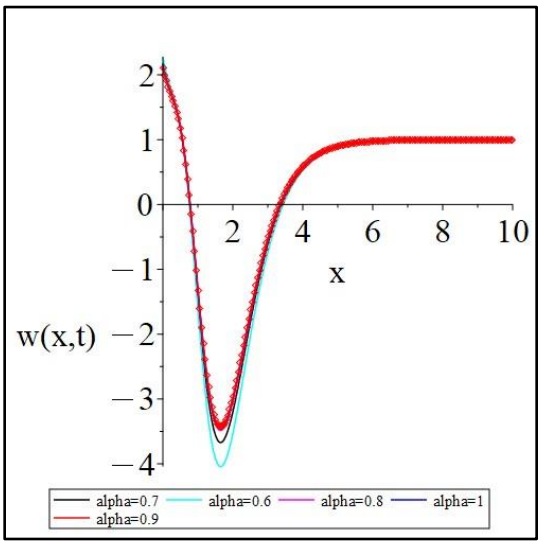


Figure 6. The two dimensional plot of the Cq-SHATM solutions for Eq. (26) at $t = 3,\ \mathrm{h} = -1, \mathrm{n} = 1$ via different values of α.

Table 1 demonstrates the absolute error (AE) between the exact solution and the numerical solution acquired by Cq-SHATM.

Table 1. AE between exact solution and approximate solution by Cq-SHATM for $n = 10$ and $h = -10.223$.

x/t	**0.01**	**0.02**	**0.03**	**0.04**	**0.05**
0.1	9.8×10^{-6}	1.8×10^{-5}	2.3×10^{-5}	2.6×10^{-5}	2.5×10^{-5}
0.2	7.9×10^{-5}	1.5×10^{-4}	2.2×10^{-4}	2.8×10^{-4}	3.4×10^{-4}
0.3	2.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}	7.4×10^{-4}	9.7×10^{-4}	1.2×10^{-3}
0.4	5.7×10^{-4}	1.1×10^{-3}	1.6×10^{-3}	2.2×10^{-3}	2.7×10^{-3}
0.5	1.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	3.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}

5. Results and discussion

The numerical solutions of the CFNCHE has been presented. The simulations were evaluated for various values of x, t and the conformable fractional order α. Figures 1-5 illustrates the three-dimensional graphs of the $w(x,t)$ solution obtained by Cq-SHATM for various α values for CFNCHE. Figure 6 depicts the behaviour of Cq-SHATM solution for CFNCHE, shown by 2D graphs, with different values of α. In Figure 6, the Cq-SAHAM solution of CFNCHE is seen to diverge from the analytical solution as α moves away from 1.Table 1 presents AE between the exact solution and Cq-SHATM solution for $\alpha = 1$ for Eq. (39). Table 1 shows that the absolute error is quite small. The numerical result obtained with Cq-SHATM is the same as the one obtained with the q-homotopy analysis method (Hussain et al., 2022) and better than the homotopy perturbation method in (Bouhassoun & Hamdi Cherif, 2015). Fractional derivatives facilitated the observation of memory effects during the phase separation procedure. The q-Shehu homotopy analysis transform method is highly successful for fractional derivative systems and demonstrates rapid convergence. The temporal and geographic evolution of phase structures varied according to the order of the fractional derivative. The fractional Cahn-Hilliard equation offers a notable benefit for modeling long-range interactions and anomalous diffusion phenomena. Three-dimensional graphics distinctly demonstrated the influence of fractional order on the morphological development of the system.

6. Conclusion

This paper presents the novel numerical solutions of CFNCHE using the Cq-SHATM. Moreover, the MAPLE software has constructed 2D and 3D graphics that indicate the solutions to CFNCHE for different values of α. In 2D graphics, it can be seen that it remains constant and overlaps after $x = 4$ for different α values. Table 1

demonstrates that the absolute inaccuracy is relatively insignificant. The conformable fractional Cahn-Hilliard equation provides a more accurate and flexible framework for modeling phase separation, diffusion, and complex dynamic systems. Its numerical solutions offer insights into real-world applications, from material science to biomedical engineering and climate modeling. Cq-SHATM offers that notable computational accuracy and simplicity when addressing and resolving complex occurrence for CTFPDEs, which play a vital role in numerous scientific and technological fields.

Acknowledgement

Thanks to the referees for their valuable suggestions.

Author contribution

AA: Conceptualization, Formal Analysis, Methodology, Software, Resources, Writing–original draft; TA: Investigation, Supervision, Validation, Visualization, Writing–review & editing. HB: Methodology, Writing–review & editing.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

Abdeljawad, T. (2015). On conformable fractional calculus. *Journal of computational and Applied Mathematics, 279*, 57-66. https://doi.org/10.1016/j.cam.2014.10.016

Akinyemi, L. (2020). A fractional analysis of Noyes–Field model for the nonlinear Belousov–Zhabotinsky reaction. *Computational and Applied Mathematics*, *39*(3), 175. https://doi.org/10.1007/s40314-020-01212-9

Akinyemi, L., Iyiola, O. S., & Akpan, U. (2020). Iterative methods for solving fourth-and sixth-order time-fractional Cahn-Hillard equation. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, *43*(7), 4050-4074. https://doi.org/10.1002/mma.6173

Alkan, A. (2022). Improving homotopy analysis method with an optimal parameter for time-fractional Burgers equation. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, *4*(2), 117-134. https://doi.org/10.55213/kmujens.1206517

Alkan, A. (2024). Analysis of Fractional Advection Equation with Improved Homotopy Analysis Method. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *7*(3), 1215-1229. https://doi.org/10.47495/okufbed.1387630

Alkan, A., & Anaç, H. (2024). The novel numerical solutions for time-fractional Fornberg-Whitham equation by using fractional natural transform decomposition method. *AIMS Mathematics*, *9*(9), 25333-25359. https://doi.org/10.3934/math.20241237

Avit, Ö., & Anaç, H. (2024). The Novel Conformable Methods to Solve Conformable Time-Fractional Coupled Jaulent-Miodek System. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 25(1), 123-140. https://doi.org/10.18038/estubtda.1380255

Baleanu, D., Wu, G. C., & Zeng, S. D. (2017). Chaos analysis and asymptotic stability of generalized Caputo fractional differential equations. *Chaos, Solitons & Fractals*, *102*, 99-105. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.02.007

Baleanu, D., Diethelm, K., Scalas, E. & Trujillo, J. J. (2012*). Fractional Calculus: Models and Numerical Methods.* World Scientific.

Benattıa, M. E., & Belghaba, K. (2021). Shehu conformable fractional transform, theories and applications. *Cankaya University Journal of Science and Engineering*, *18*(1), 24-32.

Bouhassoun, A., & Hamdi Cherif, M. (2015). Homotopy perturbation method for solving the fractional Cahn-Hilliard equation. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, *18*(5), 513-524. https://doi.org/10.1080/10288457.2013.867627

Cahn, J. W., & Hilliard, J. E. (1958). Free energy of a nonuniform system. I. Interfacial free energy. *The Journal of chemical physics*, *28*(2), 258-267. https://doi.org/10.1063/1.1744102

Das, S. (2009). Analytical solution of a fractional diffusion equation by variational iteration method. *Computers & Mathematics with Applications*, *57*(3), 483-487. https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.09.045

Erol, A. S., Anaç, H., & Olgun, A. (2023). Numerical solutions of conformable time-fractional Swift-Hohenberg equation with proportional delay by the novel methods. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, *5*(1), 1-24. https://doi.org/10.55213/kmujens.1221889

Esen, A., Sulaiman, T. A., Bulut, H., & Baskonus, H. M. (2018). Optical solitons to the space-time fractional (1+1)-dimensional coupled nonlinear Schrödinger equation. *Optik*, *167*, 150-156. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.04.015

Gao, F., & Chi, C. (2020). Improvement on conformable fractional derivative and its applications in fractional differential equations. *Journal of Function Spaces*, *2020*(1), 5852414. https://doi.org/10.1155/2020/5852414

He, J. H. (1998). Approximate analytical solution for seepage flow with fractional derivatives in porous media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *167*(1-2), 57-68. https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)00108-X

He, J. H. (1999). Homotopy perturbation technique. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, *178*(3-4), 257-262. https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00018-3

He, J. H. (2003). Homotopy perturbation method: a new nonlinear analytical technique. *Applied and Mathematics Computation*, *135*(1), 73-79. https://doi.org/10.1016/S0096-3003(01)00312-5

Hussain, S., Shah, A., Ullah, A., & Haq, F. (2022). The q-homotopy analysis method for a solution of the Cahn–Hilliard equation in the presence of advection and reaction terms. *Journal of Taibah University for Science*, *16*(1), 813-819. https://doi.org/10.1080/16583655.2022.2119746

Khalil, R., Al Horani, M., Yousef, A., & Sababheh, M. (2014). A new definition of fractional derivative. *Journal of computational and applied mathematics*, *264*, 65-70. https://doi.org/10.1016/j.cam.2014.01.002

Kurt, A., Rezazadeh, H., Senol, M., Neirameh, A., Tasbozan, O., Eslami, M., & Mirzazadeh, M. (2019). Two effective approaches for solving fractional generalized Hirota-Satsuma coupled KdV system arising in interaction of long waves. *Journal of Ocean Engineering and Science*, *4*(1), 24-32. https://doi.org/10.1016/j.joes.2018.12.004

Liao, S. (2004). On the homotopy analysis method for nonlinear problems. *Applied mathematics and computation*, *147*(2), 499-513. https://doi.org/10.1016/S0096-3003(02)00790-7

Merdan, M., Anaç, H., Bekiryazıcı, Z., & Kesemen, T. (2019). Solving of Some Random Partial Differential Equations by Using Differential Transformation Method and Laplace-Padé Method. *Gümüshane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *9*(1), 108-118. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.404332

Miller, K. S., & Ross, B. (1993). *An Introduction to Fractional Calculus and Fractional Differential Equations*. John Willey & Sons.

Ray, S. S., & Bera, R. K. (2006). Analytical solution of a fractional diffusion equation by Adomian decomposition method. *Applied Mathematics and Computation*, *174*(1), 329-336. https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.04.082

Shah, A., & Siddiqui, A. A. (2012). Variational iteration method for the solution of viscous Cahn-Hilliard equation. *World Applied Sciences Journal*, *16*(11), 1589-1592.

Şenol, M., Iyiola, O. S., Daei Kasmaei, H., & Akinyemi, L. (2019). Efficient analytical techniques for solving time-fractional nonlinear coupled Jaulent–Miodek system with energy-dependent Schrödinger potential. *Advances in Difference Equations*, *2019*(1), 1-21. https://doi.org/10.1186/s13662-019-2397-5

Tripathi, N. K., Das, S., Ong, S. H., Jafari, H., & Al Qurashi, M. M. (2017). Solution of time-fractional Cahn–Hilliard equation with reaction term using homotopy analysis method. *Advances in Mechanical Engineering*, *9*(12), 1687814017740773. https://doi.org/10.1177/1687814017740773

Ugurlu, Y., & Kaya, D. (2008). Solutions of the Cahn–Hilliard equation. *Computers & Mathematics with Applications*, *56*(12), 3038-3045. https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.07.007

Veeresha, P., Prakasha, D. G., & Baskonus, H. M. (2019). Novel simulations to the time-fractional Fisher's equation. *Mathematical Sciences*, *13*(1), 33-42. https://doi.org/10.1007/s40096-019-0276-6

Wazwaz, A. M., & Gorguis, A. (2004). An analytic study of Fisher's equation by using Adomian decomposition method. *Applied Mathematics and Computation*, *154*(3), 609-620. https://doi.org/10.1016/S0096-3003(03)00738-0

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 286-297 doi: 10.17714/gumusfenbil.1616542 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Samsun otomotiv sektöründe çalışanların İSG farkındalığı: kesitsel bir araştırma

OHS awareness of employees in Samsun automotive sector: A cross-sectional study

Emine KAPLAN[1], İbrahim ÇAVUŞOĞLU*[1,2], Yasemin TATLI[3]

[1] *Gümüşhane Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, 29100, Gümüşhane*

[2] *Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane*

[3] *Gümüşhane Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Acil Yardım ve Afet Yönetim Bölümü, 29100, Gümüşhane*

• Geliş tarihi / *Received*: 09.01.2025 • Kabul tarihi / *Accepted*: 07.03.2025

Öz

Bu çalışma, Samsun ilindeki otomotiv sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) farkındalığını incelemeyi amaçlamaktadır. Özellikle sanayileşmiş bölgelerde iş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesi, iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının etkinliğine bağlıdır. Bu bağlamda, Samsun'daki otomotiv sektöründe çalışan bireylerin İSG konusundaki bilgi düzeyleri ve farkındalıkları, tanımlayıcı ve kesitsel bir araştırma yöntemi kullanılarak değerlendirildi. Araştırma süreci, COVID-19 pandemisinin getirdiği kısıtlamalar nedeniyle 100 kişilik bir örneklem grubuyla sınırlandırıldı. Anket yöntemiyle toplanan veriler, yönetimin İSG üzerindeki etkisi, güvenlik kurallarına uyum, çalışanların güvenlik konusunda inisiyatif alması ve bilgi edinme süreçleri gibi faktörlerin İSG farkındalığını nasıl şekillendirdiğini ortaya koydu. Bulgular, kapsamlı İSG eğitimi almış çalışanların, iş sağlığı ve güvenliği konusunda daha yüksek farkındalığa sahip olduklarını gösterdi. Ayrıca, meslek hastalıklarına dair bilgi sahibi olan çalışanların da İSG farkındalığının daha yüksek olduğu belirlendi. Sonuç olarak, otomotiv sektöründe İSG farkındalığının artırılmasının, iş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesi açısından kritik öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, yönetim desteği ve sürekli eğitim programları, çalışanların İSG konusundaki bilinç düzeylerini artırmada önemli bir rol oynamaktadır.

Anahtar kelimeler: Güvenlik farkındalığı, İş sağlığı ve güvenliği, Otomotiv sanayi

Abstract

This study examines occupational health and safety (OHS) awareness in the automotive sector within Samsun province. Preventing workplace accidents and occupational diseases, particularly in industrialized regions, is closely linked to the effectiveness of occupational health and safety practices. In this context, the knowledge and awareness levels of individuals working in Samsun's automotive sector regarding OHS were assessed using a descriptive and cross-sectional research method. Due to restrictions imposed by the COVID-19 pandemic, the study was limited to a sample group of 100 participants. The survey data revealed how factors such as management's influence on OHS, adherence to safety rules, employee initiative in safety matters, and information acquisition processes shape OHS awareness. The findings demonstrated that employees who have received comprehensive OHS training possess higher levels of awareness regarding occupational health and safety. Additionally, those with knowledge of occupational diseases also showed greater OHS awareness. In conclusion, enhancing OHS awareness in the automotive sector is crucial for preventing workplace accidents and occupational diseases. In this regard, management support and continuous training programs are vital in elevating employees' awareness of OHS issues.

Keywords*: Security awareness, Occupational health and safety, Automotive industry*

*İbrahim ÇAVUŞOĞLU; cavusogluibrahim@hotmail.com

1. Giriş
1. Introduction

Sanayi devrimiyle başlayan teknolojik ilerleme ve sanayileşme süreci, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) konularını giderek daha önemli hale getirmiştir. Çalışanların güvenliğini sağlamak, yalnızca etik bir sorumluluk değil, aynı zamanda üretim süreçlerinin verimliliğini artırmak, maliyetleri azaltmak ve sürdürülebilir büyümeyi desteklemek için stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Endüstrilerde İSG uygulamalarının başarısı hem bireysel hem de toplumsal refah açısından kritik öneme sahiptir. Ancak birçok sektörde olduğu gibi, otomotiv sektöründe de İSG uygulamalarında farkındalık eksikliği ve uygulama yetersizlikleri dikkat çekmektedir (Saizarbitoria vd., 2019; Liu vd., 2021).

Otomotiv sektörü, demir-çelik, petrokimya, cam, kauçuk, tekstil ve elektronik gibi sanayileşmiş ülkelerin endüstrilerinde ve ekonomilerinde önemli bir domino etkisi yarattığı için "lokomotif sektör" olarak anılmaktadır. Bu sektör, otomobil üreticileri, bayiler, orijinal ekipman üreticileri ve araç bakım şirketlerinin finansal performansını ve ekonomik değişkenlerini kapsamlı bir şekilde temsil eden bir çerçevede değerlendirilir (Gabaçlı, 2018).

Türkiye'de otomotiv sektörü, sadece ana ve yan sanayileri ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda tekstil, plastik ve metal işleme gibi diğer sanayilerle de güçlü bir ilişki içindedir. Bununla birlikte, hammadde ve yan ürünlerin yanı sıra otomotiv ürünlerinin nihai tüketiciye ulaşmasını sağlayan pazarlama, bayi hizmetleri, akaryakıt, finans ve sigorta sektörleri de bu sektörün önemli bileşenlerindendir. Bu hizmetler, büyük miktarda iş yaratmakta ve ülke ekonomisine ciddi katkılar sağlamaktadır (Elmas, 2011).

Türkiye'de otomotiv sektörü geniş bir istihdam kapasitesine sahiptir ve farklı segmentlerde yüz binlerce insana iş imkânı sunmaktadır. Sektörün en büyük istihdam alanı, otomobil tamir ve bakım hizmetleriyle uğraşan segmenttir. Ülke genelinde trafiğe kayıtlı araç sayısı yaklaşık 30 milyona (Tuik, 2024) yaklaştığı göz önüne alındığında, araç bakım ve onarım hizmetlerinin önemi daha da belirgin hale gelmektedir. Çeşitli bölgelerde faaliyet gösteren ve otomotiv sektörü ile doğrudan bağlantılı olan iş kollarında yaklaşık 1.250.000 kişi istihdam edilmektedir (UİB, 2021). Bu işletmeler arasında, boya, kaporta, motor ve lastik tamiri, egzoz ve radyatör tamiri, otogaz dönüşümü gibi çeşitli hizmetler yer almaktadır. Ana otomotiv sanayisinin yanı sıra, bu bakım ve onarım faaliyetlerinin de hem istihdam yaratmada hem de ekonomiye katkı sağlamada büyük bir rolü vardır.

Otomotiv sektörü, küresel ekonomik büyümenin ve teknolojik ilerlemenin temel taşlarından biridir. Bu sektör; otomobil tasarımı, üretimi, montajı, bakım-onarımı ve geri dönüşüm süreçlerini içeren karmaşık bir yapıya sahiptir. Sektördeki faaliyetler, büyük ölçekli üretim tesislerinin yanı sıra yan sanayi, tedarik zinciri, satış sonrası hizmetler ve atık yönetimi gibi çeşitli alt sektörleri de kapsamaktadır (Yamankaradeniz vd., 2015; Akpınar ve Meral, 2020). Bu geniş ekosistem, İSG açısından önemli riskler barındırmaktadır. Yüksek teknoloji kullanımı, karmaşık üretim süreçleri ve geniş tedarik zinciri nedeniyle otomotiv sektörü, sanayinin en dinamik ve riskli alanlarından biri olarak kabul edilmektedir (Şişman, 2017; Ürüt, 2017). Üretim tesislerinde kullanılan ağır makineler, yüksek ısı ve kimyasallar, çalışanlar için ciddi fiziksel ve kimyasal riskler oluştururken; montaj ve bakım süreçleri ergonomik problemleri de beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, otomotiv sektöründe çalışanların güvenliğini sağlamak için etkili İSG politikaları, mühendislik kontrolleri ve düzenli eğitim programları büyük önem taşımaktadır (Domingez vd., 2021). Ancak bu sektörde iş sağlığı ve güvenliği bilinci ve farkındalığı, diğer endüstrilere kıyasla istenilen düzeyde değildir. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerde (KOBİ) güvenlik kültürünün yeterince yerleşmemiş olması, sektörde meydana gelen iş kazalarının ve meslek hastalıklarının ana nedenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Farkındalık eksiklikleri, çalışanların yeterince eğitilmemesi, uygun güvenlik önlemlerinin alınmaması ve yönetim seviyesinde İSG'ye verilen önemin düşük olması gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır (Kaya & Erbaş, 2022). Özellikle, tedarik zincirinde çalışan işçiler ve yan sanayi işletmeleri, iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarında yetersizliklerle karşılaşabilmektedir. Sektörün bu karmaşık yapısı, farklı iş kollarında özgün İSG stratejileri geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen olumsuzlukların giderilmesi için, akademik araştırmalar ve uygulamalı çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Literatürde, otomotiv sektörü ve diğer endüstrilerde İSG'nin artırılmasına yönelik birçok yöntem ve araç geliştirilmiş olup, bu çalışmalar genellikle iş kazalarının önlenmesi, risk değerlendirme metotlarının uygulanması ve güvenlik kültürünün oluşturulması üzerine yoğunlaşmaktadır. Örneğin; Ali vd. (2021), İran otomotiv endüstrisindeki karmaşık ve birbirine bağlı sorunları incelemiş ve otomobil üreticilerinin

motivasyonunu artırmak için yerli ürün tasarım ve geliştirme çözümleri önermiştir. Jeffry vd. (2021), Güney Afrika'daki bir otomotiv montaj organizasyonunda iş sağlığı ve güvenliği sisteminin etkinliğini değerlendirmiş ve çoğu sanayileşmiş ülkenin güvenlik kültürünün ekonomik faydalar ve sosyal adalet açısından güvenli ve sağlıklı bir çalışmanın pozitif değerine ilişkin bir güvenlik kültürünün ve farkındalığını düşük olduğunu tespit etmiştir. Kelleci ve Civcivoğlu (2024) çalışmalarında yetişkin öğrenmesi ve oyunlaştırma yöntemlerinin otomotiv sektörü gibi dinamik ve yüksek riskli bir alanda uygulanabilirliği üzerine çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarında bu yöntemle çalışanların tehlike ve risk tanıma becerilerini geliştirerek iş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesine katkıda bulunmayı hedeflemişlerdir. Akpınar (2019) çalışmasında otomotiv sektöründe çalışanlara verilen İSG eğitimlerinin iş kazalarını önleme üzerindeki etkisini incelemiştir. Sanne vd. (2019), otomotiv sanayi tesislerinde iş kazaları ve yaralanmaları incelemiş ve kazaların çalışan davranışları ve çalışma ortamı ile ilişkili olduğunu tespit etmiştir. Ricci (2016), otomotiv sektöründe toplam üretken bakımın uygulanmasını ve risk değerlendirme sürecinin önemini vurgulamıştır. Jaffar vd. (2011), otomotiv sektöründe güvenlik risk yönetimi uygulamalarını incelemiş ve güvenlik gereksinimlerinin sistem düzeyinde formüle edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Tatlı (2021) çalışmasında çalışanların iş ve özel yaşamları arasında denge kurma çabası, iş yükünün artması ve zaman baskısı gibi sebeplerle giderek zorlaştığını, artan bu baskıların, kısa vadede kas ağrıları ve yorgunluk gibi belirtilerle ortaya çıksa da uzun vadede iş kazaları, meslek hastalıkları ve hatta sakatlıklarla sonuçlanabildiğini ortaya koymuştur. Görüldüğü üzere çalışmaların büyük bir kısmı genel sanayi uygulamalarına odaklanmakta olup, otomotiv sektörüne özgü riskler ve bu risklerin yönetimi konusunda daha fazla bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, otomotiv sektörü ve diğer endüstrilerde iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlamak amacıyla kapsamlı bir literatür incelemesi yapılmış ve sektöre özgü risklerin belirlenmesine yönelik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, iş kazalarının azaltılmasına yönelik yöntemler, güvenlik farkındalığını artırmaya yönelik stratejiler ve sektörel özeliklere uygun İSG uygulamaları ele alınmıştır. Bu bağlamda, elde edilen bulgular ışığında otomotiv sektörü için uygulanabilir çözüm önerileri sunulmuştur.

2. Metot
2. Method

Bu çalışmada, Samsun ilinde otomotiv sektöründe çalışan bireylerin İSG farkındalık düzeylerini değerlendirmek amacıyla tanımlayıcı ve kesitsel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın ana kütlesini, Samsun ilindeki otomotiv sektöründe çalışanlar oluşturmaktadır. COVID-19 pandemisi nedeniyle oluşan zaman kısıtlaması ve çalışanların katılım isteksizliği nedeniyle, 100 kişilik bir örneklem grubundan elde edilen veriler analiz edilmiştir.

Araştırmada kullanılan veri toplama aracı, üç bölümden oluşan bir anket formudur. Anketin birinci bölümünde, katılımcıların demografik bilgileri yer alırken, ikinci bölümde katılımcıların iş sağlığı ve güvenliği bilgi düzeylerini ölçen 7 adet evet-hayır sorusu ve iş sağlığı ve güvenliği farkındalığını ölçmek için 5'li Likert ölçeği kullanılmıştır. Likert ölçeğinde katılımcılara 24 adet soru sorulmuş ve verilen sorulara "Kesinlikle Katılmıyorum (1)" ile "Kesinlikle Katılıyorum (5)" arasında değişen seçeneklerle yanıt vermeleri istenmiştir. Üçüncü bölümde ise, Zacharatos'un *"An organization and employee-level investigation of the relationship between high-performance work systems and workplace safety"* isimli çalışmasında yer alan ifadeler Türkçeye çevrilmiş ve çalışmada doğrudan kullanılmıştır (Zacharatos, 2001).

Araştırmanın kapsamı, 2021 yılında Samsun ilinde bulunan otomotiv sektöründe çalışan bireylerle sınırlıdır. Çalışmada, 25 firma ve 100 kişiye ulaşılmış olup, analizler katılımcıların anket doldurma gönüllülüğüne dayanmaktadır. Verilerin analizinde güvenilirlik analizi, doğrulayıcı faktör analizi, tanımlayıcı istatistikler, homojenlik testi ve ilişki fark analizleri gibi çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılmıştır. Çalışmada, veri setine faktör analizi uygulanmadan önce güvenilirlik kontrolü yapılmıştır. Güvenilirlik, bir ankette veya testte ölçülmek istenen değerlerin tutarlılığını ifade eder ve Cronbach alfa katsayısı kullanılarak değerlendirilir (Çam, 2012). Cronbach alfa, 0 ila 1 arasında değişen bir katsayıdır ve 1'e ne kadar yakınsa, ölçek o kadar güvenilirdir (Kalaycı, 2018). Araştırmaya ait güvenilirlik analizi sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'de görüldüğü üzere, *"Yönetimin Rolü"* faktörü için Cronbach's Alpha değeri 0,764 olarak belirlenmiştir, bu da bu ölçeğin oldukça güvenilir olduğunu göstermektedir. *"Güvenlik Kurallarına Uyma"* faktöründe de benzer şekilde 0,751'lik bir Cronbach's Alpha değeri elde edilmiştir ve bu değer, ölçeğin oldukça güvenilir olduğunu gösterir.

"Güvenlik Konusunda İnisiyatif Alma" ve *"Algılanan Risk"* faktörlerinde de güvenilirlik değerleri sırasıyla 0,736 ve 0,701 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, ölçeklerin oldukça güvenilir olduğunu ifade eder. Özellikle *"Güvenlik Konusunda Bilgi Alma"* faktörü için Cronbach's Alpha değeri 0,851 olarak belirlenmiş, bu da ölçeğin yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu gösterir.

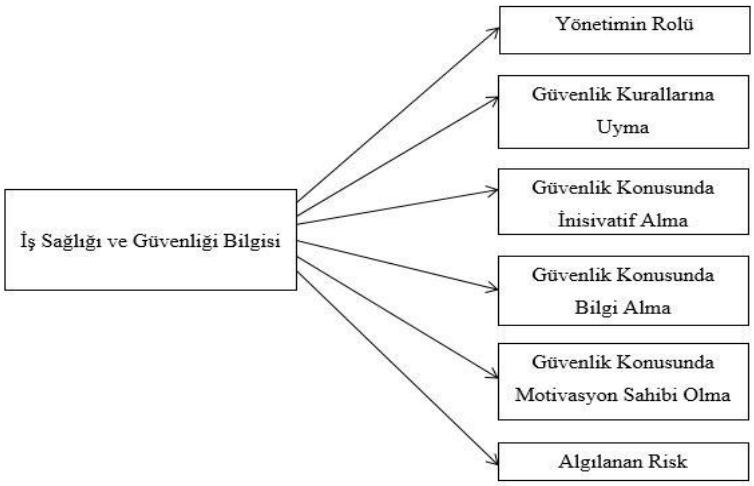
Tablo 1. Ölçeklerin güvenirlik analizi sonuçları
Table 1. Reliability analysis results of the scales

Ölçekler	İfade sayısı	Cronbach's Alpha
Yönetimin Rolü	4	0,764
Güvenlik Kurallarına Uyma	4	0,751
Güvenlik Konusunda İnisiyatif Alma	4	0,736
Güvenlik Konusunda Bilgi Alma	4	0,851
Güvenlik Konusunda Motivasyon Sahibi Olma	4	0,791
Algılanan Risk	3	0,701
İş Sağlığı ve Güvenliği Farkındalığı (Toplam)	23	0,883

Son olarak, tüm ifadelerin bir araya getirildiği genel güvenilirlik analizinde Cronbach's Alpha değeri 0,883 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek güvenilirlik değeri, çalışmada kullanılan ölçeklerin genel anlamda güvenilir olduğunu ve verilerin istikrarlı bir biçimde toplandığını göstermektedir.

2.1. Araştırmanın modeli ve hipotezler
2.1. Research model and hypotheses

Araştırma modeli, iş sağlığı ve güvenliği farkındalığı ile yönetimin rolü, güvenlik kurallarına uyma, güvenlik konusunda inisiyatif alma, güvenlik konusunda bilgi alma, güvenlik konusunda motivasyon sahibi olma ve algılanan risk gibi faktörler arasındaki ilişkileri incelemektedir. Şekil 3, bu faktörlerin iş sağlığı ve güvenliği farkındalığı üzerindeki etkilerini görselleştirmektedir.



Şekil 3. Araştırma modeli
Figure 3. *Research model*

Yönetimin Rolü: Yönetimin, iş güvenliğini organizasyonun temel yapısı olarak kabul etmesi ve çalışanlara örnek olması gerekmektedir. Bu, iş kazalarının önlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Akalp ve Yamankaradeniz, 2013; Bayram vd., 2023).

Güvenlik Kurallarına Uyma: İşyerlerinde uygulanan güvenlik kurallarına uyum, çalışanların güvenliğini sağlamak için önemlidir. Bu kuralların hatırlatılması ve uygulanması, güvenlik kültürünün bir parçasıdır (TOBFED, 2024).

Güvenlik Konusunda İnisiyatif Alma: Çalışanların güvenlik konusunda inisiyatif alması, iş sağlığı ve güvenliği kültürünü olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, yönetimin proaktif bir güvenlik yaklaşımı benimsemesi önemlidir (TOBFED, 2024).

Güvenlik Konusunda Bilgi Alma: İş sağlığı ve güvenliği bilincinin arttırılması için, çalışanların güvenlik konularında yeterli bilgiye sahip olmaları gerekmektedir. Bu bilgi, iş kazalarının önlenmesine katkı sağlar (TOBFED, 2024).

Güvenlik Konusunda Motivasyon Sahibi Olma: İSG kültürünün oluşturulmasında işveren farkındalığı ve eğitim uygulamaları gibi faktörler önemlidir. İşverenin bu süreçte aktif rol alması, çalışanların güvenlik konusunda daha motive olmalarını sağlar (TOBFED, 2024).

Algılanan Risk: Çalışanların kendilerini güvende hissetmeleri, işyerindeki davranışlarını etkiler. Güvenli bir çalışma ortamı, çalışanların doğru davranışlar sergilemesini sağlar (TOBFED, 2024).

Bu model, yukarıdaki faktörlerin iş sağlığı ve güvenliği farkındalığı üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Yapılan literatür çalışmalarının ardından araştırmaya ait hipotezler aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur;

- H1: Çalışanların İş sağlığı ve güvenliği kavramının ne olduğunu biliyor olması açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır.
- H2: Çalışanların İş sağlığı ve güvenliği konusunda kapsamlı bir eğitim almaları açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır.
- H3: Çalışanların Son 2 yılda iş sağlığı ve güvenliği eğitimi almaları açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır.
- H4: Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği eğitimleri, işyerinde karşılaşılacak tüm durumları kapsaması açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır.
- H5: Çalışanların İş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin çalışanları bilinçlendirmede yeterli olduğunu düşünmesi açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır.
- H6: Çalışanların daha önce hiç iş kazası geçirmesi açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır.
- H7: Çalışanların Mesleklerinde karşılaşacağı meslek hastalıklarını biliyor olmaları açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır.

3. Bulgular ve tartışma
3. Results and discussion

Çalışmada, katılımcı anket verileri üzerinden güvenilirlik, demografik özellikler, iş sağlığı ve güvenliği bilgisi, tanımlayıcı istatistikler, faktör analizi ve farklılık analizleri yapılmış ve bu kısımda değerlendirilmiştir.

3.1. Demografik bulgular
3.1. Demographic data

Araştırmaya katılanların çoğunluğu erkek (95 kişi) ve evli (78 kişi) olup, en yaygın eğitim düzeyi ilkokul (37 kişi) ve lise (30 kişi) mezunlarıdır. Katılımcıların yaş aralığı genellikle 33-39 yaş (28 kişi) olup, 12 yıl ve üzeri çalışma süresine sahip olanlar çoğunluktadır (54 kişi). Çoğu katılımcı, bakım hizmetlerinde çalışmaktadır (71 kişi). Katılımcıların demografik özellikleri Tablo 2'de detaylı olarak gösterilmiştir.

3.2. Faktör analizleri
3.2. Factor analyses

Faktör analizi, değişkenler arasındaki ilişkileri inceleyerek verileri özetleyen ve daha kavramsal anlamlar çıkaran bir yöntemdir. Bu analiz, genellikle çok sayıda değişkeni daha küçük, homojen gruplara ayırmak için kullanılır (Nakip, 2006). Faktör analizi, değişken sayısını azaltmak ve değişkenler arasındaki ilişkileri yeni yapılar oluşturacak şekilde incelemek amacıyla yapılır. Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) testi, gözlenen korelasyon katsayılarını kısmi korelasyon katsayıları ile karşılaştırarak veri setinin uygunluğunu değerlendirir (Büyüköztürk vd., 2009; Kalaycı, 2018; Patır, 2009). Doğrulayıcı faktör analizi ise araştırmada kullanılan faktörlerin yapısal güvenirliğini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu analizde, örneklem büyüklüğünü kontrol etmek için Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) katsayısı ve verilerin normal dağılım koşulunu sağladığını belirlemek için Bartlett testi kullanılmıştır. KMO değerinin 0,50 ve üzeri, Bartlett testinin ise $p<0,05$ olması gerekmektedir (Tatlıdil, 1996). Ölçeklere ilişki bulgular Tablo 3'te daha detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 2. Katılımcıların demografik özellikleri
Table 2. Demographic characteristics of the participants

Durum	Birim	Sayı
Katılımcıların cinsiyeti	Erkek	95
	Kadın	5
Katılımcıların medeni halleri	Bekâr	21
	Evli	78
	Dul/Boşanmış	1
Katılımcıların eğitim durumları	Okur-Yazar	2
	İlkokul	37
	Ortaokul	20
	Lise	30
	Ön Lisans	2
	Lisans	9
Katılımcıların yaşı	18-25	10
	26-32	20
	33-39	28
	40-45	15
	46 ve üstü	27
Katılımcıların hizmet süreleri	0 – 2 yıl arası	7
	3 – 5 yıl arası	13
	6 – 8 yıl arası	11
	9 – 11 yıl arası	15
	12 yıl ve üstü	54
Katılımcıların çalışma pozisyonu	Ofis Hizmetleri	8
	Üretim Hizmetleri	7
	Bakım Hizmetleri	71
	Satış Hizmetleri	14

Tablo 3. Ölçeklere ilişkin bulgular
Table 3. Findings related to scales

	Ort.	S.S.	Faktör Yükleri	KMO	B. Test	p	T (Varyans)
Yönetimin Rolü 1	4,18	0,73	0,753	0,626	191,655	0,00	61,281
Yönetimin Rolü 2	3,91	1,03	0,588				
Yönetimin Rolü 3	4,49	0,84	0,885				
Yönetimin Rolü 4	4,55	0,82	0,869				
Güvenlik Kurallarına Uyma 1	4,64	0,70	0,711	0,617	133,728	0,00	58,947
Güvenlik Kurallarına Uyma 2	3,90	1,21	0,736				
Güvenlik Kurallarına Uyma 3	4,27	0,98	0,844				
Güvenlik Kurallarına Uyma 4	4,47	0,79	0,773				
Güvenlik Konusunda İnisiyatif Alma 1	4,30	0,81	0,781	0,656	102,881	0,00	56,313
Güvenlik Konusunda İnisiyatif Alma 2	4,55	0,60	0,599				
Güvenlik Konusunda İnisiyatif Alma 3	4,22	0,88	0,857				
Güvenlik Konusunda İnisiyatif Alma 4	4,18	0,97	0,741				
Güvenlik Konusunda Bilgi Alma 1	4,58	0,71	0,822	0,784	187,335	0,00	70,094
Güvenlik Konusunda Bilgi Alma 2	4,18	0,93	0,760				
Güvenlik Konusunda Bilgi Alma 3	4,45	0,84	0,901				
Güvenlik Konusunda Bilgi Alma 4	4,35	0,84	0,859				
Güvenlik Konusunda Motivasyon Sahibi Olma 1	4,29	0,83	0,701	0,711	146,235	0,00	63,527
Güvenlik Konusunda Motivasyon Sahibi Olma 2	4,69	0,58	0,757				
Güvenlik Konusunda Motivasyon Sahibi Olma 3	4,67	0,65	0,916				
Güvenlik Konusunda Motivasyon Sahibi Olma 4	4,67	0,62	0,798				
Algılanan Risk 1	4,25	1,06	0,760	0,653	53,317	0,00	62,575
Algılanan Risk 2	4,28	1,04	0,773				
Algılanan Risk 3	3,60	1,18	0,838				

Araştırmada, iş sağlığı ve güvenliği farkındalığı üzerinde etkili olan çeşitli faktörler incelenmiştir. Faktör analizleri, bu faktörlerin yapılarını ve güvenilirliklerini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

"Yönetimin Rolü" faktöründe, değişkenlerin faktör yükleri 0,753 ile 0,885 arasında değişmiş ve toplam varyansın %61,281'ini açıklamıştır. Bu, yönetimin iş sağlığı ve güvenliği üzerindeki etkisinin güçlü olduğunu gösterir. KMO değeri 0,626 olup, örneklemin faktör analizi için uygun olduğunu ve Bartlett testinin p=0,000 olması analiz sonuçlarının anlamlı olduğunu göstermektedir.

"Güvenlik Kurallarına Uyma" faktöründe, faktör yükleri 0,711 ile 0,844 arasında değişmiş ve toplam varyansın %58,947'si açıklanmıştır. Bu, çalışanların güvenlik kurallarına uyumunun iş sağlığı ve güvenliği farkındalığında önemli bir yer tuttuğunu gösterir. KMO değeri 0,617 ve Bartlett testi p=0,000 olarak hesaplanmıştır, bu da analizlerin uygun ve anlamlı olduğunu doğrular.

"Güvenlik Konusunda İnisiyatif Alma" faktöründe, değişkenlerin faktör yükleri 0,599 ile 0,857 arasında değişmiş ve toplam varyansın %56,313'ü açıklanmıştır. KMO değeri 0,656 olup, bu faktörün çalışanların güvenlik konusunda inisiyatif almalarının iş sağlığı ve güvenliği farkındalığı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bartlett testi yine p=0,000 ile anlamlı bulunmuştur.

"Güvenlik Konusunda Bilgi Alma" faktörü, faktör yükleri 0,760 ile 0,901 arasında değişmiş ve toplam varyansın %70,094'ünü açıklamıştır. Bu yüksek varyans oranı, güvenlik konusunda bilgi almanın iş sağlığı ve güvenliği farkındalığında kritik bir rol oynadığını gösterir. KMO değeri 0,784 ve Bartlett testi p=0,000 olarak bulunmuş, bu da faktör analizinin güvenilir olduğunu doğrulamaktadır.

"Güvenlik Konusunda Motivasyon Sahibi Olma" faktöründe, faktör yükleri 0,701 ile 0,916 arasında değişmiş ve toplam varyansın %63,527'si açıklanmıştır. KMO değeri 0,711 olup, bu faktörün çalışanların güvenlik konusunda motive olmalarının iş sağlığı ve güvenliği farkındalığı üzerindeki etkisini vurgular. Bartlett testi p=0,000 olarak bulunmuş ve analizler anlamlı olarak değerlendirilmiştir.

"Algılanan Risk" faktöründe, faktör yükleri 0,760 ile 0,838 arasında değişmiş ve toplam varyansın %62,575'i açıklanmıştır. Bu, algılanan risklerin iş sağlığı ve güvenliği farkındalığı üzerindeki etkisinin belirgin olduğunu gösterir. KMO değeri 0,653 ve Bartlett testi p=0,000 olarak hesaplanmış, faktör analizinin uygunluğunu ve anlamlılığını göstermektedir.

Bu faktörler, iş sağlığı ve güvenliği farkındalığını etkileyen temel unsurlar olarak tanımlanmıştır ve yapılan analizler, bu faktörlerin araştırma kapsamında güvenilir ve geçerli olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada sunulan faktör analizi sonuçları, Kaplan (2022) çalışmasından alınmıştır ve ilgili çalışmada kullanılan ölçeklerin faktör yapıları, Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) testi, Bartlett's testi ve faktör yükleri detaylı olarak incelenmiştir (Kaplan, 2022).

3.2. İlişki ve fark analizleri
3.2. Relationship and difference analyses

T-testi, iki grup arasındaki farkların anlamlı olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılan bir analiz türüdür. Bu testte, bağımsız değişkenler arasında anlamlı bir fark olup olmadığını belirlemek için sig. (p) değerinin 0.05'ten küçük olması veya t değerinin 1.96'dan büyük ya da -1,96'dan küçük olması gerekmektedir (Özdamar, 1997). T-testi uygulanmadan önce, bazı ön koşulların sağlanması gereklidir. Bu ön koşullar şunlardır (Seçer, 2013):

- Bağımlı değişkene ait ölçümlerin her iki grupta da normal dağılması.
- Ortalama puanların karşılaştırılacağı örneklemlerin ilişkisiz olması.
- Her iki gruptaki ölçümlerin dağılımlarının varyanslarının eşit olması.
- Bağımlı değişkene ait ölçümlerin aralık veya oran ölçeğinde olması.

Sayısal ölçümlerin analizinde, verilerin dağılımının normal olup olmadığını kontrol etmek, hangi testin kullanılacağına karar vermede kritik bir faktördür. Parametrik testler, örneklemin normal dağılıma uyumlu olması ve verilerin homojen dağılması gibi belirli varsayımlar altında yapılır. Eğer bu varsayımlar karşılanmazsa, parametrik olmayan testlere başvurulabilir. Merkezi limit teoremine göre, popülasyon

büyüklüğü n>30 olduğunda, örnekleme dağılımının normal dağılım göstereceği varsayılmaktadır (Ovla vd., 2017). Bu çalışmanın örneklemi 100 kişiden oluştuğu için, parametrik testlerin ilk varsayımı olan normal dağılıma uyumlu olma şartı sağlanmaktadır.

Bu açıklamalar çerçevesinde, araştırmada t-testinin doğru uygulanabilmesi için gerekli koşulların sağlandığı ve bu testin kullanılmasının uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Araştırmada iş sağlığı ve güvenliği (İSG) farkındalığını etkileyen çeşitli faktörler üzerinde t-testi analizleri yapılmış ve bu analizler sonucunda hipotezlerin doğruluğu test edilmiştir (Tablo 4). Her bir faktör için ayrı tablolar hazırlanmış ve bu tablolar üzerinden hipotezlerin kabul veya reddi değerlendirilmiştir.

Tablo 4. Araştırmaya ait ilişki ve fark analizi sonuçları
Table 4. Results of relationship and difference analysis of the research

Soru	Cevap	n	Levene Testi F	Levene Testi Sig.	Ort.	S.S.	t	Sig.
İş sağlığı ve güvenliği kavramının ne olduğunu biliyor musunuz?	Evet Hayır	81 19	0.995	0.321	4.34 4.27	0.48 0.37	0.661	0.510
İş sağlığı ve güvenliği konusunda kapsamlı bir eğitim aldınız mı?	Evet Hayır	58 42	0.850	0.359	4.44 4.17	0.40 0.49	3.050	0.003
Son 2 yılda iş sağlığı ve güvenliği eğitimi aldınız mı?	Evet Hayır	30 70	0.663	0.417	4.56 4.23	0.39 0.45	3.521	0.001
İş Sağlığı ve Güvenliği eğitimleri, işyerinde karşılaşılacak tüm durumları kapsıyor mu?	Evet Hayır	54 46	2.233	0.138	4.38 4.27	0.48 0.43	1.223	0.224
İş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin çalışanları bilinçlendirmede yeterli olduğunu düşünüyor musunuz?	Evet Hayır	50 50	0.179	0.673	4.41 4.25	0.06 0.06	1.773	0.079
Daha önce hiç iş kazası geçirdiniz mi?	Evet Hayır	17 83	0.045	0.832	4.41 4.31	0.44 0.46	0.813	0.418
Mesleğinizde karşılaşacağınız meslek hastalıklarını biliyor musunuz?	Evet Hayır	77 23	13.414	0.000	4.40 4.09	0.35 0.67	2.923	0.004

"H1: Çalışanların iş sağlığı ve güvenliği kavramının ne olduğunu biliyor olmaları açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır" hipotezi test edildiğinde sonuçlar, p>0,05 olduğu için, İSG kavramını bilenler ile bilmeyenler arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu nedenle, H1 hipotezi reddedilmiştir. Bu durum, İSG kavramını bilme bilgisinin İSG farkındalığını önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir.

"H2: Çalışanların iş sağlığı ve güvenliği konusunda kapsamlı bir eğitim almaları açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır" hipotezi test edildiğinde sonuçlar, p<0,05 olduğu için, kapsamlı İSG eğitimi alanlar ile almayanlar arasında anlamlı bir fark bulunmuştur. Bu bulgu, H2 hipotezinin kabul edilmesine yol açmıştır. Kapsamlı İSG eğitimi alanların İSG farkındalığının daha yüksek olduğu gözlenmiştir, bu da eğitimin farkındalık üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

"H3: Çalışanların son 2 yılda iş sağlığı ve güvenliği eğitimi almaları açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır" hipotezi test edildiğinde sonuçlar, p<0,05 olduğu için, eğitim alanlar ile almayanlar arasında anlamlı bir fark bulunmuştur ve H3 hipotezi kabul edilmiştir. Son iki yılda İSG eğitimi alanların farkındalık düzeyinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

"H4: Çalışanların İSG eğitimlerinin işyerinde karşılaşılacak tüm durumları kapsaması açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır" hipotezi test edildiğinde sonuçlar, p>0,05 olduğu için, İSG eğitimlerinin kapsamlı olduğuna inanmanın İSG farkındalığını önemli ölçüde etkilemediği ve H4 hipotezinin reddedildiği görülmüştür.

"H5: Çalışanların İSG eğitimlerinin çalışanları bilinçlendirmede yeterli olduğunu düşünmesi açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır" hipotezi test edildiğinde sonuçlar, p>0,05 olduğu için, çalışanların İSG eğitimlerinin bilinçlendirme yeterliliğine dair algılarının farkındalık üzerinde önemli bir etkisi olmadığı ve H5 hipotezinin reddedildiği ortaya çıkmıştır.

"H6: Çalışanların daha önce iş kazası geçirmeleri açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır" hipotezi test edildiğinde sonuçlar, p>0,05 olduğu için, daha önce iş kazası geçirenler ile geçirmeyenler arasında anlamlı bir fark bulunmamış ve H6 hipotezi reddedilmiştir. Bu, iş kazası deneyiminin İSG farkındalığını belirleyici bir faktör olmadığını göstermektedir.

"H7: Çalışanların mesleklerinde karşılaşacağı meslek hastalıklarını biliyor olmaları açısından İSG farkındalığında anlamlı bir farklılık vardır" hipotezi test edildiğinde sonuçlar, p<0,05 olduğu için, meslek hastalıklarını bilenler ile bilmeyenler arasında anlamlı bir fark bulunmuş ve H7 hipotezi kabul edilmiştir. Meslek hastalıklarını bilenlerin İSG farkındalığının daha yüksek olduğu belirlenmiştir, bu da meslek hastalıkları bilgisi olan çalışanların daha bilinçli olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın bulguları, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) farkındalığının artırılmasında eğitim, yönetim desteği ve çalışanların güvenlik kültürüne olan ilgisinin kritik rol oynadığını göstermektedir. Özellikle kapsamlı İSG eğitimi almış bireylerin, iş kazalarını önleme konusunda daha bilinçli hareket ettikleri tespit edilmiştir. Bu bulgu, daha önce yapılan araştırmalarla da örtüşmektedir. Örneğin, Ricci vd. (2016), iş güvenliği eğitimlerinin çalışanların güvenli davranış sergilemesini artırdığını ve meslek hastalıklarını önlemede önemli bir faktör olduğunu belirtmiştir.

Bununla birlikte, yönetimin rolü faktörünün yüksek faktör yüklerine sahip olması, yöneticilerin iş güvenliği süreçlerindeki tutum ve davranışlarının çalışanlar üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Akalp ve Yamankaradeniz (2013) çalışmasında yönetimin İSG'yi teşvik eden uygulamaları benimsemesinin, çalışanların iş güvenliği farkındalığını artırdığını vurgulamaktadır. Benzer şekilde, Bayram vd. (2023), yöneticilerin güvenlik kültürünü destekleyici tutumlarının çalışanların iş güvenliği kurallarına daha fazla uyum göstermelerine neden olduğunu ifade etmektedir.

Ancak çalışmada dikkat çeken bir diğer bulgu, iş kazası deneyimi ile İSG farkındalığı arasında anlamlı bir ilişkinin bulunmamasıdır. Bu durum, çalışanların geçmişte yaşadıkları kazaların İSG konusundaki bilinçlerini artırmada yeterince etkili olmadığını göstermektedir. Sanne vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada yalnızca iş kazası deneyimi yaşamış olmanın çalışanların güvenli çalışma davranışlarını artırmadığı, fakat düzenli eğitimlerin ve yönetim desteğinin daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bulgular ayrıca, çalışanların güvenlik kurallarına uyumunun ve güvenlik konusunda inisiyatif almalarının İSG farkındalığını şekillendiren önemli değişkenler olduğunu göstermektedir. Jaffar vd. (2011), güvenlik risk yönetimi uygulamalarının, çalışanların inisiyatif alma düzeyleri ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada da iş güvenliği konusunda inisiyatif alan bireylerin daha yüksek farkındalığa sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Son olarak, meslek hastalıkları hakkında bilgi sahibi olan çalışanların daha yüksek İSG farkındalığına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, Ali vd. (2021) tarafından yapılan çalışmadaki bulgularla paraleldir. Meslek hastalıkları konusundaki bilgi düzeyinin artırılması, çalışanların kendi sağlık ve güvenliklerine yönelik daha bilinçli kararlar almasına katkı sağlayabilir.

4. Sonuçlar
4. Conslusions

Bu çalışmada Samsun ilindeki otomotiv sektöründe çalışan bireylerin İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) farkındalığı ve bilgi düzeyleri analiz edilmiş, hipotez testleri t-testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- İSG Kavramının Bilinmesi (H1); Çalışanların İSG kavramını bilmeleri ile İSG farkındalığı arasında anlamlı bir farklılık olmadığı tespit edilmiştir (p > 0,05; Sig=0,510). Bu sonuç, İSG kavramına dair bilgiye sahip olmanın çalışanların farkındalık düzeyinde belirleyici bir etkisi olmadığını göstermektedir.

- Kapsamlı İSG Eğitimi (H2); Kapsamlı İSG eğitimi alan çalışanların farkındalık düzeylerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir ($p < 0,05$; Sig=0,003). Bu bulgu, eğitim programlarının içeriğinin farkındalığın artırılmasında önemli bir etken olduğunu ortaya koymaktadır.
- Son 2 Yılda Alınan İSG Eğitimi (H3); Son iki yıl içinde İSG eğitimi almış çalışanların farkındalık düzeylerinin daha yüksek olduğu saptanmıştır ($p < 0,05$; Sig=0,001). Bu sonuç, yakın geçmişte alınan eğitimlerin etkili olduğunu göstermektedir.
- İSG Eğitimlerinin Kapsamı (H4); İSG eğitimlerinin işyerinde karşılaşılacak tüm durumları kapsaması ile İSG farkındalığı arasında anlamlı bir ilişki bulunmamıştır ($p > 0,05$; Sig=0,224). Bu, eğitimlerin kapsamının farkındalık üzerinde beklendiği kadar etkili olmadığını göstermektedir.
- İSG Eğitimlerinin Bilinçlendirme Yeterliliği (H5); Çalışanların, İSG eğitimlerinin bilinçlendirme yeterliliği hakkındaki algılarının farkındalık düzeylerine etkisi anlamlı bulunmamıştır ($p > 0,05$; Sig=0,079).
- İş Kazası Deneyimi (H6); Daha önce iş kazası geçirmiş olmanın, çalışanların İSG farkındalığı üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı belirlenmiştir ($p > 0,05$; Sig=0,418).
- Meslek Hastalıkları Bilgisi (H7); Meslek hastalıkları konusunda bilgi sahibi olan çalışanların İSG farkındalığının daha yüksek olduğu bulunmuştur ($p < 0,05$; Sig=0,004).

Araştırmanın bulguları, İSG farkındalığının artırılmasında eğitim ve bilgi sahibi olmanın önemli bir rol oynadığını, ancak belirli faktörlerin beklenen düzeyde etkili olmadığını göstermektedir. Özellikle kapsamlı ve yakın zamanda alınan eğitimler ile meslek hastalıklarına dair bilgilendirme farkındalık üzerinde olumlu etkilere sahiptir. Ancak, iş kazası deneyimi ve eğitimlerin kapsamı gibi diğer faktörlerin farkındalık düzeyine katkısı sınırlı kalmıştır. Bu durum, eğitim programlarının içerik ve metodolojilerinin yeniden değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Yazar katkısı
Author contribution

Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalında İbrahim ÇAVUŞOĞLU danışmanlığında ve Yasemin TATLI ikinci danışmanlığında yürütülen *"Otomotiv Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği Farkındalığı: Samsun İli Örneği"* isimli Yüksek Lisans Tezinden üretilen bu çalışmada yazarlar; Fikir/Kavram: E.K.; İ.Ç.; Y.T., Tasarım: E.K.; İ.Ç.; Y.T., Denetleme: E.K.; İ.Ç.; Y.T., Veri Toplama ve/veya İşleme: E.K., Analiz ve/veya Yorum: E.K.; İ.Ç.; Y.T., Literatür Taraması: E.K.; İ.Ç.; Y.T., Makale Yazımı: E.K.; İ.Ç.; Y.T., şeklinde katkıda bulunmuştur.

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz. Bu araştırmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik yönü, Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulunun 06.01.2021 tarihli 2020/12 sayılı toplantısında incelenmiş ve kurul tarafından onaylanmıştır.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder

Kaynaklar
References

Akalp, G., & Yamankaradeniz, N. (2013). İşletmelerde Güvenlik Kültürünün Oluşumunda Yönetimin Rolü ve Önemi. *Sosyal Güvenlik Dergisi*, 3(2), 96-109.

Akpınar, Ş., (2019). *Otomotiv Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Kazaları Önleme Yeterliliği* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gedik Üniversitesi, Sağlık Bilimler Enstitüsü].

Akpınar, Ş., & Meral, M. (2020). Otomotiv Sektörü Çalışanlarının İş Güvenliği Farkındalıklarının Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi, *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, 9(4), 168-180.

Ali, R. H., Liaqat, F., Azhar, S. & Ali, M. (2021). Exploring the quantity and quality of occupational health and safety disclosure among listed manufacturing companies: Evidence from Pakistan, a lower-middle income country. *Safety Science*, 143, 151. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105431

Bayram, M., Arpat, B., & Nam, D. (2023). Çalışanların İş Güvenliği Katılımında Yönetimin Rolü: Kavramsal Bir Model Önerisi. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 15(4), 2846–2862. https://doi.org/10.20491/isarder.2023.1752

Büyüköztürk, Ş., Çakmak, E. K., Akgün, Ö. E., Karadeniz, Ş. & Demirel, F. (2009). *Bilimsel araştırma yöntemleri*, Pegem Akademi Yayıncılık, Ankara.

Çam, H. (2012). *Türkiye'deki üniversitelerde bulut bilişim teknolojisinin uygulanabilirliğinin teknoloji kabul modeli yaklaşımıyla belirlenmesi* [Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü].

Domínguez C. R., Mares, J.I. P. & Hernández R.G.Z. (2021). Hazard identification and analysis in work areas within the Manufacturing Sector through the HAZID methodology. *Process Saf Environ Prot*, 145:23–38. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.049

Elmas, G. (2011). *Bursa Bölgesi'nde otomotiv lojistiği ve otomotiv terminallerinde kapasite analizi* [Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Gabaçlı, N., (2018). *Türkiye Otomotiv Sektörü ve Küresel Rekabet Gücünün Analizi* [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü].

Jaffar, N., Abdul-Tharim, A. H., Mohd-Kamar, I. F., & Lop, N. S. (2011). A Literature Review of Ergonomics Risk Factors in Construction Industry. *Elsevier*, 20, 89-97. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.142

Jeffry, Z. Azlan, N. & Majid, N. (2015). The study of occupational accident and ınjuries in an automotive ındustry plant. *International Academic Conference (IAC)* (pp. 1-15), Terengganu, Malaysia.

Kalaycı, Ş. (2018). *SPSS uygulamalı çok değişkenli istatistik teknikleri,* Asil Yayın Dağıtım, Ankara.

Kaplan, E. (2022). *Otomotiv Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği Farkındalığı: Samsun İli Örneği* [Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Kaya, B.E. & Erbaş, İ. (2022). Türk İnşaat Sektöründeki KOBİ'lerde İş Güvenliği İklimi Algısının Değerlendirilmesi. *Çalışma İlişkileri Dergisi*, 1, 1-18.

Kelleci, S. Ç., & Civcivoğlu, S. N. (2024). Yetişkin Öğrenmesinde Andragojik Yaklaşımlar: Otomotiv Sektöründe İş Sağlığı Güvenliği Eğitiminde Oyunlaştırma Uygulamaları. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 36(4), 396-406. https://doi.org/10.7240/jeps.1529762

Liu, R., Liu, Z., Liu H., & Shi, H. (2021). An improved alternative queuing method for occupational health and safety risk assessment and its application to construction excavation. *Safety Science*, 126, 1. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103672

Nakip, M. (2006). *Pazarlama araştırmaları teknikler ve (spss destekli) uygulamalar,* Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Ovla, D. H., Türkegün, M., Özdemir, A. A., Özcömert, B. V., & Taşdelen, B. (2017). Parametrik olmayan yöntemlerin yanlış kullanımı ve doğurabileceği sonuçlar: simülasyon çalışması. *Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*, 42(2), 241-248. https://doi.org/10.17826/cutf.322875.

Özdamar, K. (1997). *Paket programlar ile istatistiksel veri analizi*, Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.

Patır, S. (2009). Faktör analizi ile öğretim üyesi değerleme çalışması, *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 23(4), 69-86.

Ricci, F., Chiesi, A., Bisio, C., Panari, C. & Pelosi, A. (2016). Effectiveness of occupational health and safety training: A systematic review with meta-analysis. *Journal of Workplace Learning,* 28 (6), 355-377. https://doi.org/10.1108/JWL-11-2015-0087

Saizarbitoria, H.I., Boiral, O., Arana, G., & Allur, E. (2019). OHSAS 18001 certification and work accidents: Shedding light on the connection. *Journal of Safety Research*, 68, 33-40. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2018.11.003

Sanne, E., Benzerga, A., Jiao, B., & Ruggeri, K. (2019). Health promotion at work: a comparison of policy and practice across Europe. *Safety and Health at Work,* 10, 21-29. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2018.07.003

Seçer, İ. (2017). *Spss ve Lisrel ile pratik veri analizi*, Anı Yayıncılık, 3.Baskı, Ankara, s. 218.

Şişman, B. (2017). Hata Türü ve Etkileri Analizinde Bulanık Ahp ve Bulanık Vıkor Yöntemleri İle Otomotiv Sektöründe Risk Değerlendirmesi-Rısk Evaluatıng By Fuzzy Ahp And Fuzzy Vıkor Methods In Faılure Mode And Effects Analysıs For Automotıve Sector. *Mehmet Akif Ersoy University Journal of Social Sciences Institute*, 9(18), 234-250. https://doi.org/10.20875/makusobed.302942

Tatlı, Y. (2021). İş, iş yükü ve iş çevresi. E. B. Şekerli (Ed.), *Endüstri ve örgüt psikolojisi içinde (ss. 1-12)*. İstanbul.

Tatlıdil, H., (1996). *Uygulamalı çok değişkenli istatistiksel yöntemler*, Cem Web Ofset, Ankara.

TOBFED, (2024, 25 Aralık). *İş Güvenliği Kuralları Neden Önemlidir?* https://tobfed.org/is-guvenligi-kurallari-neden-onemlidir/

Tuik, (23, Ocak 2024), *Motorlu Kara Taşıtları, Aralık 2023*.Türkiye İstatistik Kurumu, https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Ta%C5%9F%C4%B1tlar%C4%B1-Aral%C4%B1k-2023-49432&dil=1

UİB, (25, Aralık 2021). *Türkiye Otomotiv Endüstrisi Raporu*. Uludağ İhracatçı Birlikleri, https://uib.org.tr/tr/kbfile/turkiye-otomotiv-endustrisi-raporu#:~:text=Otomotiv%20end%C3%BCstrisi%20bu%20b%C3%BCy%C3%BCkl%C3%BC%C4%9F%C3%BCyle%2C%2050.000,1.250.000'i%20bulmaktad%C4%B1r.

Ürüt, M. (2017). *Türk Otomotiv Sektöründe İş Sağlığı ve İş Güvenliği Yönetim Sistemi (Ohsas 18001) Uygulaması ve Bir Firma Örneği* [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü].

Yamankaradeniz, N., Akalp, G., & Çankaya, O. (2015). Otomotiv ve Metal Sektöründe Çalışan Kadınların Maruz Kaldıkları Fiziksel Risk Algısı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 449-458.

Zacharatos, A., (2001). *An organization and employee-level investigation of the relationship between high-performance work systems and workplace safety* [Doktora Tezi, Queen's University, Canada].

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 298-320 doi: 10.17714/gumusfenbil.1517633 Derleme Makalesi / *Review Article*

Hayvan yemlerine yeşil sentez metalik nanopartikül ilavelerinin etkileri

Effects of green synthesized metallic nanoparticle additions to animal feeds

Hacer KAYA*

Gümüşhane Üniversitesi, Kelkit Aydın Doğan Meslek Yüksekokulu, Veterinerlik Bölümü, 29600, Kelkit / Gümüşhane

• Geliş tarihi / *Received*: 17.07.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 17.12.2024

Öz

Hayvancılık işletmelerinde "mümkün olan en yüksek kalitede, en fazla ürünü, en kısa zamanda ve en ucuza üretme" amacına ulaşabilmeleri için yemde uygun mineral dengesini sağlayabilmek önemlidir. Mineraller, tüm çiftlik hayvanlarının optimum bir düzeyde büyüme ve gelişmeleri, hastalıklardan korunmaları, üremeleri ve üretmeyi sürdürebilmeleri için temel besinsel elemanlardır. Geçtiğimiz yıllarda fiziksel ve kimyasal yöntemlerle sentezlenen nano minerallerin çiftlik hayvanları üzerine etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak bu yöntemlere alternatif olan "yeşil sentez" veya "biyosentez" adı verilen yöntemle üretilen nano minerallerin yem katkı maddesi olarak kullanımına yönelik çalışmalar da son zamanlarda dikkat çekmektedir. Yeşil sentez teknolojisi temiz, ucuz, tek adımlı ve basit, hızlı ve güvenilir olmasının yanısıra sağlık ve çevre dostu bir yöntemdir. Yeşil sentez yöntemi, bitki, bakteri, mantar, alg ve maya gibi biyolojik ajanlarda bulunan proteinler, enzimler, vitaminler, fenolik maddeler, organik asitler vb. metabolitlerin indirgeme fonksiyonu ile metal tuzları nanopartikül (NP) seviyesine dönüştürebilmesidir. En az bir boyutu 100 nm'den daha küçük olan parçacıklar NP'ler olarak adlandırılmaktadır. Nano mineraller/metal nanopartikül (MNP)'ler çok küçük boyut ve yüksek yüzey/hacim oranlarına sahip olmaları nedeniyle üstün mekanik, termal, optik ve manyetik özellikler kazanmış ve tarım, eczacılık, tıp, biyomedikal, biyoteknoloji, optik, enerji gibi farklı uygulama alanlarında yenilik için önemli bir araç haline gelmişlerdir. Bu derleme, gelişen küresel problemlere çözüm olarak, sürdürülebilir ve sıfır atık ilkelerini temel almış yeşil sentez metoduyla üretilen metal nanopartiküllerin hayvan yemlerinde kullanılma potansiyellerine ilişkin literatür verilerini özetlemektedir.

Anahtar kelimeler: Hayvan besleme, Metalik nanopartikül, Nanoteknoloji, Yeşil sentez

Abstract

It is important to ensure the appropriate mineral balance in feed for livestock enterprises to achieve their goal of "producing the highest possible quality, the most products in the shortest time and cheapest possible". Minerals are the basic nutritional elements for all farm animals to grow and develop at an optimum level, to be protected from diseases, to reproduce and to continue producing. In recent years, many studies have been conducted examining the effects of nano minerals synthesized by physical and chemical methods on farm animals. However, studies on the use of nano minerals produced by the method called "green synthesis" or "biosynthesis" as feed additives, which are alternatives to these methods, have also attracted attention recently. Green synthesis technology is clean, cheap, one-step and simple, fast and reliable, as well as a health and eco friendly method. The green synthesis method is the ability to convert metal salts to nanoparticle (NP) level with the reduction function of proteins, enzymes, vitamins, phenolic substances, organic acids, etc. metabolites found in biological agents such as plants, bacteria, fungi, algae and yeast. Particles with at least one dimension smaller than 100 nm are referred to as nanoparticles. Nano minerals/metal nanoparticles (MNPs) have gained superior mechanical, thermal, optical and magnetic properties due to their very small size and high surface/volume ratios, and they have become an important tool for innovation in different application fields such as agriculture, pharmacy, medicine, biomedicine, biotechnology, optics and energy. This review summarizes the literature data on the potential of using metal nanoparticles produced by the green synthesis method based on sustainable and zero waste principles in animal feed as a solution to developing global problems.

Keywords*: Animal nutrition, Metallic nanoparticle, Nanotechnology, Green synthesis*

* Hacer Kaya; hacerkaya@gumushane.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

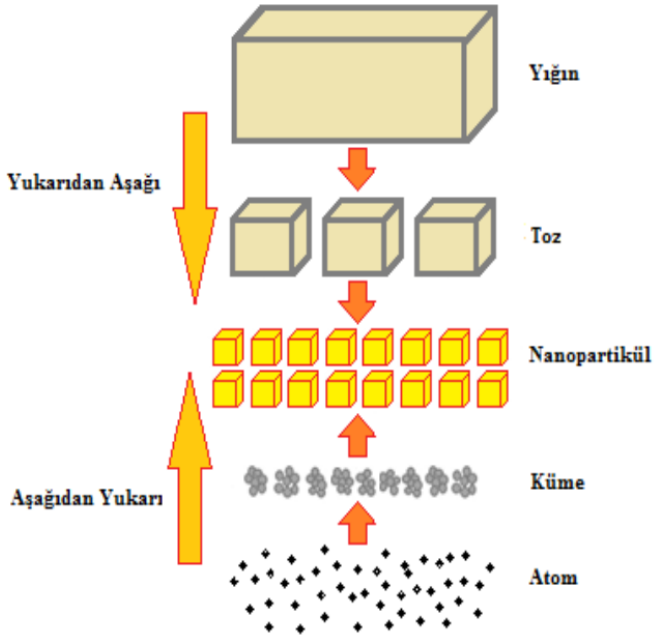
Beslemede, hayvanların besin madde ihtiyaçlarının tam olarak karşılanabilmesi kadar bu besin maddelerinden yararlanmanın mümkün olan en üst seviyeye çıkarılabilmesi de üzerinde önemle durulan husustur. Bu bakımdan hayvan yemlerinde enerji, protein ve vitamin içerikleri kadar mineral içeriklerinin de dengelenmesi büyük önem arz etmektedir. Doku ve organların yapısal bileşenleri olan mineraller, çiftlik hayvanlarının sağlıklı olarak büyümeleri, gelişmeleri, üremeleri ve yaşam ile verime ait metabolik faaliyetlerini sürdürülebilmeleri için gerekli temel besin kompenentleridir. Minerallerin eksik, dengesiz ya da aşırı düzeyde alınması harici semptomların dışında büyümede gerileme, yemden yararlanma ve verimlilikte azalma, genel sağlıkta bozulma gibi beslenme anomalilerine ve fizyolojik fonksiyonların olumsuz etkilenmesine yol açabilmektedir (Aksoy vd., 2011). Mineral biyoyararlanımı rasyondaki seviye, form ve minerallerin aralarındaki sinerjik ve antagonistik etkileşimlerine bağlı olarak değişim gösterebilmektedir (Freeland-Graves vd., 2015).

Hayvanın sağlıklı ve dengeli beslenmesi için gereken mineral düzeyi karma yemin bileşimi ile karşılanamadığı durumlarda rasyon, konsantre mineral kaynakları veya ticari mineral karmaları ile desteklenebilir. Yakın zamana kadar yem mineral kaynağı olarak organik veya inorganik mineraller ile fiziksel veya kimyasal yöntemle üretilen nanominerallerin kullanımını inceleyen çok sayıda çalışma yürütülmüştür (Mahmoud vd., 2016; Kaya & Macit, 2018; Wang vd., 2019; Akhtar vd., 2020). Kümes hayvanları, domuzlar ve koyunlar gibi çiftlik hayvanlarından elde edilen ümit verici sonuçlar nanopartikül (NP)'lerin modern hayvan beslemede kullanılabilecek yeni yem katkı maddeleri olduğunu göstermektedir (Adegbeye vd., 2019). Yüksek düzeylerde biyoyararlılığa sahip olan nanominerallerin yemlerin besin değerini artırdığı (Hassan vd., 2017) ve geleneksel mineral kaynaklarından daha düşük dozlarda bile önemli faydalı etkileri olduğu bildirilmiştir (Raje vd., 2018a). Öte yandan son birkaç yılda bu mineral kaynaklarına alternatif olarak "yeşil sentez" veya "biyosentez" yöntemiyle üretilen nano minerallerin yem katkı maddesi olarak kullanımına yönelik çalışmalar da dikkat çekmektedir (Asaikkutti vd., 2016; Ezealisiji vd., 2019; Ali vd., 2020; Bidian vd., 2021; Fatholahi vd., 2021; Fouda vd., 2021; Hassan vd., 2021; Naz vd., 2021; Hatab vd., 2022; Abdelaziz vd., 2023; Hassan vd., 2023; Khan vd., 2023; Satgurunathan vd., 2023; Yazdani vd., 2023). Bu derleme, güvenilir, sürdürülebilir ve çevre dostu ilkeleri temel almış yeşil sentez metodu ve bu metodla üretilen metalik nanopartikül (MNP)'lerin özellikle kanatlı hayvanlar, laboratuvar hayvanları ve su ürünleri yemlerinde kullanım potansiyellerine ilişkin literatür verilerini özetlemektedir.

2. Metalik nanopartiküller
2. Metallic nanoparticles

Nanoteknoloji, nanometre ölçeğindeki materyal (genellikle 1 ila 100 nanometre arasında boyutlara sahip) ve metodları kontrol etme, inşa etme, tasarlama ve yeniden yapılandırmayı amaçlayan bir bilim dalıdır (Sehgal vd., 2023). Nanoteknolojinin yapı taşları olarak kabul edilen NP'ler en az bir boyutu 100 nanometreden daha küçük olan parçacıklardır (Biswas & Wu, 2005). Nanopartiküller yukarıdan aşağıya "top down" veya aşağıdan yukarıya "bottom up" doğru (Ravichandran, 2010) iki farklı yöntemle (Şekil 1) sentezlenebilmektedir. Nanopartiküller genellikle karbon bazlı organik ve inorganik olarak; inorganik nanopartiküller de metalik NP'ler ve metal oksit NP'ler olarak sınıflandırılmaktadır (Ealia & Saravanakumar, 2017).

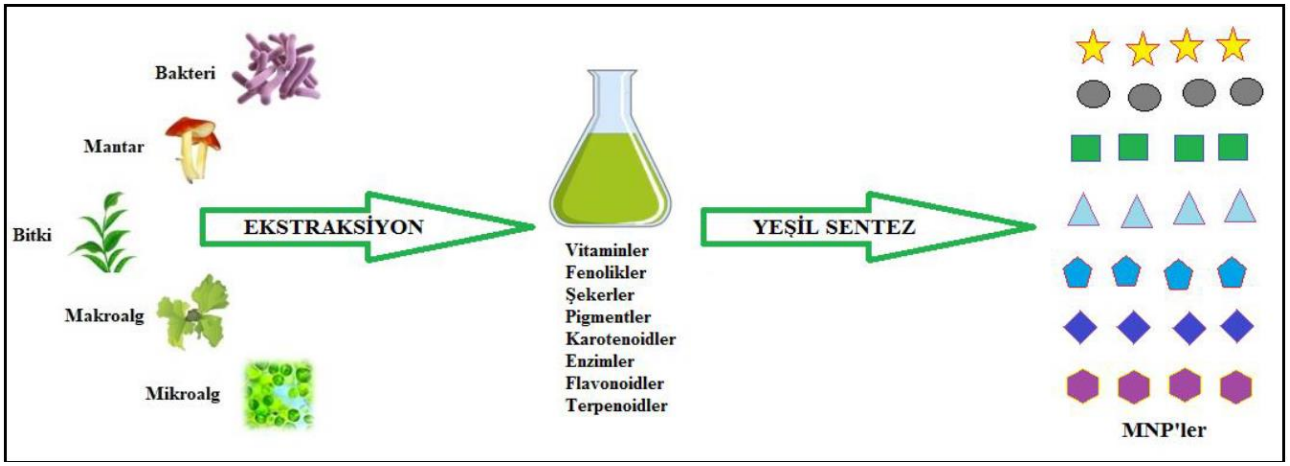
Metal nanopartiküller, çoğunlukla metal oksit, organik ya da inorganik kabukla çevrilmiş metal veya metal oksitten oluşan çekirdeğe sahiptirler (Khan, 2020; Koçer, 2023). Metal nanopartiküller, çok küçük boyutları nedeniyle büyük ölçekli materyallerden daha farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösterebilmektedirler (Nagajyothi vd., 2020). Küçük boyutları ve yüksek yüzey/hacim oranları MNP'lere üstün fiziksel, kimyasal, biyolojik, mekanik, termal, optik, elektriksel ve manyetik özellikler kazandırarak tarım, eczacılık, tıp, biyomedikal, biyoteknoloji, çevre, enerji gibi farklı uygulama alanları ve endüstrilerde yenilik için önemli bir araç haline gelmelerine yol açmıştır (Qiao vd., 2022; Sazak, 2023). Artan MNP üretimi, kullanımı ve çevreye salınma olasılığı, insan ve çevre güvenliğini teminat altına alacak yöntemlerin arayışlarını doğurmuştur (Koçer, 2023). Günümüze kadar MNP sentezi için kullanılan fiziksel ve kimyasal sentez olarak adlandırılan geleneksel yöntemlerin karmaşık, pahalı ve çevreye zararlı süreçler içermesi gerekçeleri, araştırmacıları son zamanlarda aşağıdan yukarıya doğru yaklaşıma dayalı olan "biyosentez" ya da "yeşil sentez" adı verilen biyolojik üretim yöntemine yöneltmiştir (Guleria vd., 2022).



Şekil 1. MNP üretimi için yukarıdan aşağı ve aşağıdan yukarı yaklaşımları (Koçer, 2023)
Figure 1. *Top-down and bottom-up approaches for MNP production (Koçer, 2023)*

3. Yeşil sentezle metalik nanopartikül üretimi
3. Metallic nanoparticle production with green synthesis method

Yeşil sentez yöntemi toksik kimyasallar, karmaşık işlemler, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık değerleri olmaksızın MNP'lerin güvenilir, sürdürülebilir ve ekolojik olarak üretilmesinde kullanılan pratik bir yöntemdir (Şahin, 2023). Yeşil sentezle MNP üretimi için bitki özütleri, bakteri, mantar, alg, maya vb. biyolojik ajanlar kullanılmakta olup (Şekil 2) bunların yapılarında bulunan protein, enzim, vitamin, fenolik madde, terpenoid, şeker ve organik asitler gibi fitokimyasallar indirgeyici madde olarak görev yapmaktadırlar (Marappan vd., 2017; Koçer, 2023).



Şekil 2. MNP üretimi için yukarıdan aşağı ve aşağıdan yukarı yaklaşımları (Koçer, 2023)
Figure 2. *Top-down and bottom-up approaches for MNP production (Koçer, 2023)*

Farklı konsantrasyonlarda, farklı indirgeyici ve stabilize edici ajan kombinasyonlarını içermesi nedeniyle yeşil sentezle MNP üretim yönteminde kullanılan kaynak ve koşullar, sentezlenen NP'lerin özelliklerini belirlemektedir (Martínez-Cabanas vd., 2016). Bu bağlamda yeşil sentez MNP üretiminde pH, sıcaklık, işlem süresi, uygulama türü, redükleyici ajan ve substrat miktarı gibi faktörler önemlidir (Gedikli, 2022).

Çevre ve insan sağlığına zararlı radyasyon, yüksek yoğunluklu kimyasal indirgeyiciler ve stabilize edici maddelerin kullanıldığı fiziksel ve kimyasal yöntemlerle MNP üretiminin aksine, yeşil sentez MNP üretim sürecinde oluşan ürünler biyolojik kökenlidir ve çevreye zararlı etkileri bulunmamaktadır (Güven & Sızmaz, 2020). Ayrıca geleneksel metotla üretilen MNP'lere göre yeşil sentez MNP üretim yönteminin basit, güvenilir, yüksek verimli, ucuz, hızlı, etkin enerji tüketimi, biyolojik uyumlu, çevre dostu ve kolay ölçeklendirilebilir bir metot olduğu (Tablo 1) bildirilmektedir (Akbar vd., 2020).

Tablo 1. Yeşil sentez nanopartikül üretim yönteminin avantajları
Table 1. *Table 1. Advantages of the green synthesis nanoparticle production method*

Fiziksel/Kimyasal Metod	Yeşil Sentez Metod
Pahalı ve düşük üretim hızı	Bitkisel materyaller ile indirgeyici ve stabilize edici biyo-bileşenlerin kolayca bulunabilir olması nedeniyle ucuzdur.
Güvenlik düzeyi yüksek laboratuvar ortam gerektirir	NP sentezi için iyi donanımlı laboratuvar ve kısıtlı koşullar gerektirmez
Yüksek veya düşük sıcaklık/basınç ve inert ortam gerektirir.	NP'ler normal sıcaklık ve basınç koşullarında sentezlenebilir
Sentez işlemi sırasında büyük miktarda enerji tüketimi	Sentez için karmaşık enerji sistemi gerektirmez
Kimyasal yöntemler, NP'lerin sentezi veya stabilizasyonu için toksik kimyasallar kullanır, bu kimyasallar NP'lerin yüzeyine absorbe olabilir ve son ürünün kirlenmesine veya yüzeyin kusurlu oluşumuna yol açabilir	Nihai ürün, bitkilerin doğal sekonder metabolitlerinin kullanılması nedeniyle çoğunlukla güvenli ve stabildir.
Çevreye zararlı toksik yan ürün üretimi	Çevre dostu ve güvenli sistem

Yeşil sentez MNP'lerin, eşsiz fiziksel ve kimyasal özelliklerine ek olarak antibakteriyel, antiviral, antifungal, antioksidan, antikanser ve antidiyabetik özelliklerinden dolayı biyotıp, çevre, tarım ve eczacılık gibi birçok bilimsel alanda büyük bir role sahip olduğu bildirilmektedir (Koçer, 2023). Biyolojik kökenli farklı materyallerden elde edilen yeşil sentez MNP'ler arasında özellikle çinko oksit (Faisal vd., 2021; Salem & Awwad, 2022; MuthuKathija vd., 2023; Nguyen vd., 2023), gümüş/gümüş oksit (Kanchana vd., 2022; Dhir vd., 2023; Essghaier vd., 2023; Khodeer vd., 2023), bakır/bakır oksit (Cengiz vd., 2023; Dhir vd., 2023; Kocabas vd., 2023; Manivannan vd., 2023), demir/demir oksit (Salmani vd., 2021; Roy vd., 2022; Linima vd., 2023), platinyum (Tahir vd., 2017; Jeyaraj vd., 2021; Eltaweil vd., 2022) ve altın NP'ler (Bharadwaj vd., 2021; Fouda vd., 2022) araştırmacıların üzerinde daha çok çalışma yaptıkları konulardır.

4. Hayvan beslemede yeşil sentez MNP'ler
4. Greens Synthesis MNPs in animal nutrition

Hayvansal ürün üretiminde büyümeyi teşvik edici amaçla kullanılan antioksidan, antibiyotik ve antifungusit gibi sentetik katkı maddelerine getirilen yasaklama/sınırlamaların ardından yerini alabilecek ürünler henüz tam olarak bulunamamıştır (Güven & Sızmaz, 2020). Ancak hayvancılık işletmelerinde mevcut olan performans ve yemden yararlanmanın arttırılması, antibiyotik direnci, yemde mikotoksin kontaminasyonu, bağırsak sağlığı yönetimi, sindirim bozuklukları, çevre kirliliği, kemik sağlığı ve refah gibi bazı sorunların bertaraf edilmesinde nanopartiküllerin çözüm potansiyeline sahip olabileceği ve dolayısıyla yem katkı maddesi olarak kullanılabileceği bildirilmektedir (Adegbeye vd., 2019). Geleneksel mineral kaynaklarından daha düşük dozlarda bile yüksek faydalı etkileri olduğu bildirilen MNP'lerin (Raje vd., 2018a) dışkı mineral atılımını ve maliyeti azaltabileceği düşünülmektedir. Hayvan yemlerine katılan farklı mineral formları üzerine çok sayıda çalışma yapıla gelmekle birlikte özellikle son zamanlarda, minerallerden en etkin şekilde yararlanılabilmesi amacıyla MNP'lerin kullanılması gündeme gelmiştir. MNPlerin sentezinde kullanılan fiziksel ve kimyasal yöntemlerin, karmaşık, pahalı ve çevreye zararlı süreçler içermesi araştırmacıları "yeşil sentez" üretim yöntemine yöneltmiştir (Koçer, 2023). Aşağıda kümes hayvanları, laboratuvar hayvanları ve su ürünleri beslemede yeşil sentezle üretilen MNP'lerin etkinliklerine yönelik literatür incelenmiştir.

4.1. Kanatlı yemlerinde yeşil sentez MNP kullanımı
4.1. Use of green synthesis MNP in poultry feeds

Altmış haftalık kahverengi ticari yumurta tavuğu diyetlerine 0.50, 1.0 veya 1.5 g/kg dozlarında *Sargassum latifolium* alglerinden yeşil sentezle elde edilen kalsiyum nanopartikül (Ca-NP)'leri ilavesinin yumurta

ağırlığı, yumurta kabuk kalınlığı ve kabuk ağırlığı ile serum Ca ve inorganik fosfor düzeylerini artırdığı, yumurta şekil indeksi ve serum toplam protein (TP), albumin ve globulin üzerine etkili olmadığı tespit edilerek yumurta tavuklarının diyetine 1.5 g/kg'a kadar yeşil sentez Ca-NP ilavesinin yumurta kabuk kalitesini iyileştirdiği rapor edilmiştir (El-Maaty vd., 2021). Etlik piliç diyetlerine sarımsak ekstraktından yeşil sentezle elde edilen 0.5 veya 1 g/kg dozlarında Ca-NP ilavelerinin etkilerini belirlemek amacıyla yürütülen çalışmada 1 g/kg Ca-NP ilavesinin 21. gün canlı ağırlık (CA), canlı ağırlık artışı (CAA) ve yem tüketimi (YT)'nde azalmaya neden olduğu ancak kesim öncesi performans üzerine etkileri olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca 0.5 veya 1 g/kg Ca-NP'leri ilavelerinin bursa fabrikus nispi ağırlığını ve 1 g/kg Ca-NP ilavesinin ise karaciğer nispi ağırlığını düşürdüğü gözlenmiştir. Serum glikoz, TP, albumin, lipit, trigiliserit, toplam kolesterol (T-KOL) ve yüksek yoğunluklu lipoprotein (HDL) seviyeleri Ca-NP ilavelerinden etkilenmezken 0.5 g/kg Ca-NP ilavesi ile serum düşük yoğunluklu lipoprotein (LDL) düzeyi önemli miktarda azalma göstermiştir. Serum immunglobulin (Ig)-A, IgG ve IgM düzeyleri her iki düzeydeki Ca-NP ilaveleri ile artarken serum malondialdehit (MDA) düzeyi 0.5 g/kg Ca-NP ilavesi ile azalmış, serum toplam antioksidan kapasitesi (TAC)'ni artmıştır. Araştırmacılar etlik piliç diyetlerine 0.5 g/kg düzeyinde nano sarımsak ilavesinin, lipit profili, bağışıklık, antioksidan durum ve histolojik gözlemler üzerinde yararlı etkileri olduğunu bildirmektedirler (El-Gogary vd., 2019).

Yenilebilir hayvansal doku ve ürünlerde kalıntı-birikim hakkında değerlendirme yapmak amacıyla yumurtacı tavuklara oral yoldan gümüş nanopartikül (Ag-NP)'leri verilerek yürütülen *in vivo* çalışmada, 22 günlük deneme süresince her biri 1 mg/kg olan altı doz Ag-NP verilmiştir. Ag'nin kas, böbrek ve yumurta akında birikmediği ancak karaciğer (konsantrasyon 141-269 µg/kg arasında) ve yumurta sarısında (konsantrasyon 20-49 µg/kg arasında) birikim gösterdiği bildirilerek yumurtacı tavukların Ag-NP'lerle beslenmesinin tüketicileri Ag-NP'lere maruz bırakabileceği rapor edilmiştir (Gallocchio vd., 2017). Öte yandan İtalyan çimi kullanılarak yeşil sentezle üretilen Ag-NP'lerin kanatlı patojen bakterilere karşı antibakteriyel etkilerinin incelendiği çalışmada *Pseudomonas aeruginosa, Salmonella typhi, Escherichia coli* (*E. coli*) ve *Bacillus subtilis* dahil kümes hayvanı patojen mikroorganizmalarına karşı güçlü antibakteriyel aktiviteler sergilediği bildirilmiştir (Lee vd., 2018). İndirgeyici ve stabilize edici madde olarak nişastanın kullanıldığı yeşil sentez Ag-NP'lerinin 1 ve 2 ppm dozlarında etlik piliç içme sularına verimli ve güvenli bir şekilde uygulanabileceği ancak daha yüksek dozlarda (3, 4 ve 5 ppm) uygulanmasının hematolojik, biyokimyasal ve oksidatif parametreler (MDA, TAC ve glutatyon peroksidaz (GSH-px)) üzerinde doza bağlı hafif/orta şiddette olumsuz etkilere neden olduğu bildirilmiştir (Fouda vd., 2021). Ancak *Cyperus rotundus*'tan yeşil sentezle üretilen Ag-NP'lerinin kullanıldığı *in vitro* çalışma sonuçları, kümes hayvancılığı endüstrisine büyük ekonomik yük getiren ve kümes hayvanlarında yaygın olarak görülen solunum yolu hastalıklarına neden olan laringotrakeit ve enfeksiyöz bronşit virüslerinin dış zarf proteinleriyle etkileşime girebileceği ve hücre dışı virüsleri inhibe edebileceğini bildirmektedir (Abo-El-Yazid vd., 2022). Allur Subramaniyan vd. (2018), tavuk embriyolarında *Brassica oleracea L. var. capitata f. rubra* (kırmızı lahana)'dan yeşil sentezle üretilen Ag-NP ve kimyasal olarak sentezlenmiş Ag-NP'lerinin karakterizasyon ve konsantrasyon etkilerini *in ovo* enjeksiyon yoluyla inceledikleri çalışmada, biyosentez Ag-NP ve kimyasal Ag-NP'leri *in ovo* enjeksiyonlar yoluyla sırasıyla 100, 1000, 2500 ve 5000 µg/100 µl/yumurta dozlarında kullanmışlardır. Deneysel süre sonunda civcivlerin vücut ve karaciğer ağırlıkları hem gruplar arasında hem de konsantrasyonlar arasında değişim göstermiş ve yeşil sentez Ag-NP'lerin 2500 ve 5000 µg doz enjeksiyonları ile serum alanin aminotransferaz (ALT) ve aspartat aminotransferaz (AST) seviyeleri önemli ölçüde artarken yaşam gücü ve çıkım oranları azalmıştır. Araştırmacılar, kimyasal Ag-NP enjeksiyonları ile yaşam gücü ve çıkım oranlarındaki azalmanın, karaciğer HSP-60 ve HSP-70'in mRNA ve protein ifadelerinin arttığını, ayrıca mikronukleus ve nükleer anormalliklerin varlığının tespit edildiğini bildirerek *in ovo* nano-beslenme taşıyıcıları olarak yeşil sentez Ag-NP'lerin kimyasal Ag-NP'lerden daha üstün olduğunu rapor etmişlerdir.

Dosoky vd. (2021), indirgeyici ve stabilize edici madde olarak nişastanın kullanıldığı yeşil sentez gümüş katkılı silika NP'lerinin (SiO_2@Ag-NP) etlik piliç diyetlerine 2, 4 veya 8 mg/kg dozlarında ilave edilmesinin büyüme performansı, hematolojik, biyokimyasal ve oksidatif parametreler üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığını, kanatlı diyetine 4 mg/kg doz seviyesinde SiO_2@Ag-NP'leri ilavesinin umut verici ve güvenli bir nano büyüme destekleyicisi olduğunu ancak 8 mg/kg doz seviyesinde SiO_2@Ag-NP'leri ilavesinin ise minimum enflamatuar reaksiyonlar ve lenfoid tükenmeyi ortaya çıkardığını bildirmişlerdir.

İndirgeyici ve stabilizatör madde olarak ticari glikozun kullanıldığı yeşil sentez selenyum nanopartikül (Se-NP)'leri veya inorganik selenyum ilavelerinin, 10 günlük iken *E. coli* (O157:H7 1.6 × 108) yüklemesine maruz bırakılan Arbor Acres ve Ross 308 piliçlerinin davranış, performans ve bağışıklığı üzerindeki etkisini

araştırmak için yürütülen çalışmada, yeşil sentez Se-NP ilave edilen Ross 308'lerde CAA, yemden yararlanma oranı (YYO), serum TP, albümin, ALT, AST, IgG ve IgM, TAC, MDA ve süperoksit dismutaz (SOD) düzeylerinde artış kaydedildiği, hem Arbor Acres ve hem de Ross 308 piliçlerde Se-NP ilavesinin bağırsak ve göğüs kaslarının toplam bakteriyel ve *Enterobakteriaceae* sayısında azalma ve Ross 308 piliçlerde Se-NP ilavesi ile yüksek derecede hücresel ve doku koruması ortaya çıkardığı bildirilmiştir (Ali vd., 2020). Üç farklı selenyum kaynağının (sodyum selenit (Na_2SeO_3), organik selenyum ve *Bacillus subtilis* bakterilerinden yeşil sentezle üretilen Se-NP'leri) etkilerini belirlemek amacıyla yürütülen çalışmada, Ross 308 suşu tavsiyelerini karşılamak üzere farklı kaynaktan 0.3 mg/kg selenyum içeren 4 deneysel rasyon oluşturuldu. Rasyona özellikle yeşil sentez Se-NP'leri ilavesinin CA artırıp YYO'nı iyileştirdiği, 42. gün ileum morfolojisini değiştirip patojen mikrobiyota popülasyonunu azalttığı, karkas, göğüs ve but nispi ağırlığını artırıp karaciğer ve bursa fabricius nispi ağırlığını düşürdüğü, duodenum, jejunum ve ileumun uzunluğunu azalttığı ve occludin, zonula occluden-1 ve zonula occluden-2'nin ekspresyonunun artırıp claudin-5 ekspresyonunu düşürdüğü tespit edilerek nano-biyo Se'nin, yaygın organik ve inorganik selenyum kaynaklarına kıyasla performans ve bağırsak bütünlüğünü etkili bir şekilde artırabildiği rapor edilmiştir (Ali vd., 2022). Abdel-Moneim vd. (2022) sıcaklık stresi altında barındırılan etlik piliç diyetlerine *Spirulina platensis* mikroalglerinden yeşil sentezle üretilen Se-NP (0.1 veya 0.2 mg/kg yem) ilavesinin, CAA ve Avrupa ürün verimlilik faktörünü artırdığını, serum IgM, IgA ve IgG düzeyleri ile serum GSH-px ve SOD düzeylerini artırıp tiyobarbitürik asit reaktif madde (TBARS) düzeyini düşürdüğünü, ileal toplam bakteri, küf ve maya ile *Koliform, E. coli, Salmonella spp.* ve *Enterococcus spp*. sayılarına karşı doza bağlı antimikrobiyal aktiviteler sergilediğini ve ayrıca laktik asit bakterileri (LAB)'nin ileal popülasyonlarında doza bağlı artış olduğunu ancak serum enfeksiyöz bursal hastalık (IBD), avian influenza virüsü (AIV) ve Newcastle hastalık virüsü (NDV)'ne yönelik antikor titrelerin değişmediğini belirleyerek Se-NP'lerin sıcaklık stresi altındaki piliçlerde büyüme destekleyicisi, antioksidan, immün sistemi uyarıcısı ve antimikrobiyal ajanlar olarak kullanım potansiyeline sahip olabileceğini bildirmişlerdir. Etlik piliç diyetlerine 0.075, 0.15 ve 0.3 mg/kg dozlarında *Saccharomyces boulardii* mayalarından yeşil sentezle üretilen Se-NP'leri ilavelerinin performansı etkilemediği ancak et Se içeriği ile serum IgG düzeyini artırdığı, 21. gün ileum ve jejunum vilus yüksekliği/kript derinlik oranı yanı sıra ileum villus yüksekliği ve villus yüzey alanını artırıp jejunum kript derinliği ve epitel hücre tabaka kalınlığını azaltığı, 42. gün ileum ve jejunum villus yüksekliği, villus yüzey alanı ile goblet hücre yoğunluğunu, ileum LAB sayısı ve LAB/*Koliform* oranlarını artırıp ve ayrıca 0.3 mg/kg Se-NP takviyesi ile sekum *Koliform* sayısını azalttığı bildirilmiştir (Bami vd., 2022). Yeşil sentezlenmiş nano Se'nin (Se-NP), kimyasal nano Se ve inorganik Se'ye göre, sıcak ve nemli ortamda yetiştirilen etlik piliçlerde büyüme performansı, minerallerin sindirilebilirliği, bağışıklık, stresin azaltılması, antioksidan durumu ve vücut Se içeriği üzerindeki rolünün araştırılması amacıyla gerçekleştirilen çalışmada, Se'nin üç seviyesi (0.15, 0.20 ve 0.25 ppm) ve üç farklı kaynağı (inorganik, yeşil nano ve kimyasal nano) kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları 0.25 ppm yeşil sentez ve kimyasal Se-NP ilavelerinin büyüme performansı, serum, karaciğer ve göğüs kasında Se konsantrasyonlarını ve serum antioksidan aktivitesi ile Se ve nitrojen sindirilebilirlik katsayılarını artırdığı, bağışıklık tepkisini ve lenfoid organ gelişimini iyileştirdiği, heterofil/lenfosit oranı ile HSP-70 geni ekspresyonunu düşürdüğü tespit edilmiştir. Yeşil sentez nano Se'nin, kimyasal olarak sentezlenmiş nano Se kadar kadar etkili olduğu ve piliçlerde bağışıklık, büyüme, antioksidan durum ve stresin azaltılmasında 0.25 ppm Se'nin nano formlarının Se'nin düşük seviyelerine ve inorganik formuna göre üstün olduğu sonucuna varılmıştır (Dukare vd., 2020).

Etlik piliç diyetlerine 120 mg/kg seviyesinde Zn sağlayacak şekilde $ZnSO_4$, organik Zn veya *Bacillus subtilis* bakterilerinden yeşil sentezle üretilen çinko nanopartikül (Zn-NP)'leri ilavelerinin etkilerinin incelendiği çalışmada, diyete Zn-NP ilavesinin, organik ve $ZnSO_4$ ile karşılaştırıldığında CAA, karkas, but ve göğüs randımanını artırıp YYO'nı geliştirdiği, duodenum, jejunum ve ileumun nispi uzunluğu ile bursa fabricius ve karaciğer nispi ağırlığını düşürdüğü, ileum morfolojisini değiştirdiği ve ileum *Koliform, E. coli* ve *Salmonella* popülasyonunu azalttığı, 42. günde claudin-1, claudin-5, occludin ve zonula occluden-1 ekspresyonunu artırdığı tespit edilerek kümes hayvanları için *Bacillus subtilis* kullanılarak Zn-NP'leri biyosentezinin mümkün olduğu ve Zn-NP'lerinin performansı, bağırsak sağlığı ve bütünlüğünü etkili bir şekilde artırabildiği bildirilmiştir (Fatholahi vd., 2021). Guava (*Psidium guajava*) yapraklarından yeşil sentez yöntemiyle üretilen Zn-NP'lerinin %0.15 toplam fenol, %12,68 Zn ve 22,12 mg/ml antioksidan aktivite (IC_{50}) içerdiği ve ayrıca Zn-NP'lerinin patojen bakteriler *E. coli* ve *Salmonella enteridis* üzerinde antibakteriyel olarak güçlü bir yeteneğe sahip olduğu bildirilmiştir (Hidayat vd., 2021a). Öte yandan guava (*Psidium guajava*) yapraklarından yeşil sentezle üretilen Zn-NP'lerinin 45, 90, 135 veya 180 mg/kg dozlarında etlik piliç diyetlerine ilavesinin etkilerini inceleyen çalışmada (Hidayat vd., 2021b), 90 mg/kg'a kadar Zn-NP'leri ilavelerinin CAA'nı iyileştirdiği YYO'nı etkilemediği, et SOD aktivitesini artırdığı ve

ayrıca tüm Zn-NP dozlarının bağırsak içeriği *E. coli* ve *Salmonella spp*. popülasyonunu düşürdüğü belirlenmiştir. Etlik piliç diyetlerine 90 mg/kg dozuna kadar Zn-NP'leri ilavelerinin performansın iyileştirilmesinde, antioksidan aktivitenin arttırılmasında ve bağırsak patojen bakterilerinin azaltılmasında olumlu faydalar sağladığı rapor edilmiştir. *Bacillus subtilis* bakterilerinden yeşil sentezle üretilen Zn-NP'lerinin 0.1, 0.2, 0.3 veya 0.4 g/kg dozlarında bir haftalık yaştaki Japon bıldırcını diyetlerine ilavelerinin serum HDL düzeyini artırdığı, 0.2 g/kg Zn-NP ilavesinin CA, CAA, YT ve YYO'nı iyileştirdiği, 0.3 g/kg Zn-NP ilavesinin serum T-COL düzeyini düşürdüğü, 0.1-0.3 g/kg Zn-NP ilavelerinin serum ALT, AST ve laktat dehidrojenaz (LDH) aktiviteleri üzerinde olumlu etkili olduğu, 0.2 ve 0.3 g/kg Zn-NP ilavelerinin serum LDL düzeyini düşürüp 0.4 g/kg Zn-NP ilavesinin ise LDL'yi artırdığı, 0.1-0.3 g/kg Zn-NP ilavelerinin serum SOD, GSH-px, MDA, IgG ve IgM düzeylerini olumlu etkilediği ve diyete 0.2 g/kg Zn-NP ilavesinin büyüyen Japon bıldırcınlarının performans ve fizyolojik durumu üzerinde olumlu etkili olduğu belirtilmiştir (Reda vd., 2021).

Etlik piliç diyetlerine *Lactobacillus plantarum* bakterilerinden yeşil sentezle üretilen 40, 70 veya 100 mg/kg dozlarında çinko oksit nanopartilül (ZnO-NP)'leri ilavelerinin dışkı Zn atılımını düşürüp tibia kemiği ağırlık, uzunluk ve kalınlık gibi morfolojik özelliklerini iyileştirdiğini bildiren Yusof vd. (2023), 100 mg/kg ZnO-NP ilavesinin serum, göğüs kası ve karaciğer Zn tutulumu ile tibia külü ve tibia Zn, Ca ve P tutulumunu artırarak tibia kemik mineralizasyonunu iyileştirdiğini, 70 ve 100 mg/kg ZnO-NP ilavelerinin ise serum ve karaciğer dokusundaki antioksidan durumu iyileştirdiğini tespit ederek optimum etkilerin 70 ve 100 mg/kg'lık ZnO-NP diyet takviyesi ile sağlandığını rapor etmişlerdir. *Eimeria tenella* ile enfekte etlik piliç diyetlerine *Nigella sativa* kullanılarak biyosentezlenmiş 60 mg/kg ZnO-NP'leri ilavesinin serum ALT ve AST enzim seviyelerinde azalma ile doku hasarını azalttığı, SOD ve katalaz (CAT) aktivitesini artırıp proenflamatuar sitokinler olan interlökin (IL)-2 ve tümör nekroz faktör (TNF)-α miktarını azaltarak antioksidan ve antienflamatuar aktivite gösterdiği, ookist atılımını azaltarak ve büyüme performansını artırarak antikoksidial aktivite gösterdiği belirtilmiştir. Ancak, antikoksidiyal etkisinin mekanizmasının tam olarak açıklığa kavuşması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğuna ve farklı bitki kaynaklı Zn-ONP'lerin sentezini karşılaştırmanın önemine vurgu yapılmıştır (Lail vd., 2023).

Koksidiya sporlarında geleneksel tedavilere karşı ortaya çıkan direnci azaltmak ve piliçlerde bağışıklık düzeyini artırmak için *Ficus racemosa* yaprak ekstraktından yeşil sentezle üretilen demir oksit nanopartikül (IO-NP)'lerinin 10, 15 veya 20 mg/kg dozlarında *Eimeria tenella* ile enfekte olan etlik piliç diyetlerine ilave edildiği 3 haftalık bir çalışmada, 15 mg/kg'lık orta dozdaki IO-NP'leri ilaveleri ile dışkı başına ookist atılımını %91'e kadar ortadan kaldırarak ve lezyon, kanlı ishal ve ölüm oranı gibi klinik semptomları düşürerek koksidiyal etkileri negatif kontrole göre azalttığı bildirilmiştir. Ayrıca özellikle 15 ve 20 mg/kg IO-NP'leri ilaveleri, *Eimeria tenella*'nın büyüme parametreleri, biyokimya, hematoloji ve histoloji üzerindeki toksik etkilerini enfekte ve tedavi edilmemiş negatif kontrole kıyasla önemli ölçüde iyileştirmiştir. Akut bir gastrointestinal paraziter hastalık olan ve dünyada büyük ekonomik kayıplara yol açan koksidiyozun tedavisinde, *Ficus racemosa* yaprak ekstraktından yeşil sentezle üretilen IO-NP'leri kullanımının potansiyel ve güvenli bir antikoksidiyal ajan olabileceği bildirişleri (Khan vd., 2023)'nin kümes hayvanı endüstrisi için önemli olduğu düşünülmektedir.

Tablo 2. Yeşil sentez metalik nanopartiküllerinin kanatlı hayvanlar üzerine etkisi
Table 2. *Effect of green synthesis metallic nanoparticles on poultry*

Tür	Yeşil sentez MNP tipi	Konsantrasyon	Etki	Referans
Etlik piliç	*Allium sativum* ekstraktı / Ca-NP'leri	0.5 veya 1g/kg diyet	0.5 g/kg Ca-NP ilavesi ile -Serum LDLve MDA düzeylerinde azalma -Serum IgA, IgG ve IgM düzeyleri ile serum TAC aktivitesinde artış	El-Gogary vd. (2019)

Tablo 2. Devamı

Etlik piliç	İndirgeyici ve stabilizatör olarak ticari glikoz kullanımı / Se-NP'leri	100 mg/L içme suyu	-CAA, YYO, serum TP, albumin, ALT, AST, SOD, MDA, TAC, IgG ve IgM düzeylerinde artış -Performans indeksinde azalma -Bağırsak içeriği ve göğüs eti toplam bakteri ve *Enterobakteriaceae* sayısında azalma -Yüksek derecede hücre ve doku koruması	Ali vd. (2020)
Etlik piliç	*Leucas lavandulifolia* yaprakları / Se-NP'leri	0.15, 0.20 veya 0.25 ppm diyet	0.25 ppm Se-NP ilavesi ile -Büyüme performansı, bağışıklık tepkisi ve lenfoid organ gelişiminde iyileşme -Se ve nitrojen sindirilebilirlik katsayıları ile serum antioksidan aktivitesinde artış -Heterofil/Lenfosit oranı ve HSP-70 gen ekspresyonunda düşüş -Serum, karaciğer ve göğüs kası Se konsantrasyonunda artış	Dukare vd. (2020)
Stres altında olan etlik piliç	*Saccharomyces boulardii* mayası / Se-NP'leri	0.075, 0.15 veya 0.3 mg/kg diyet	0.3 mg/kg Se-NP ilavesi ile -Karaciğer ağırlığında azalma -Ette su tutma kapasitesi, a*, b* ve kroma değerlerinde artış, TBARS ve damlama kaybında azalma -Serum TP düzeyinde artış *Et kalitesini iyileştirdiği ancak büyüme performansı, karkas özellikleri ve piliç kan indeksleri üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı	Bami vd. (2021)
Etlik piliç	İndirgeyici ve stabilizatör olarak nişasta kullanımı / SiO_2-AgNP'leri	2, 4 veya 8 mg/kg diyet	-2 ve 4 mg/kg dozlarında büyüme performansı, hematolojik, biyokimyasal ve oksidatif parametreler üzerinde olumsuz bir etki bulunmama -4 mg/kg doz seviyesinde umut verici ve güvenli bir nano büyüme destekleyicisi olduğu -8 mg/kg doz seviyesinde minimum enflamatuar reaksiyonlar ve lenfoid tükenme	Dosoky vd. (2021)
Yumurtacı tavuk	*Sargassum latifolium* algleri / Ca-NP'leri	0.5, 1.0 veya 1.5 g/kg diyet	-Yumurta ağırlığı, yumurta kabuk kalınlığı ve kabuk ağırlığı ile yumurta birim yüzey alanı başına kabuk ağırlığında iyileşme -Serum Ca ve P düzeylerinde artış	El-Maaty vd. (2021)
Etlik piliç	*Bacillus subtilis* bakterileri / Zn-NP'leri	120 mg/kg diyet	-CAA ve YYO'nda gelişme -Karkas, but ve göğüs randımanında artış -Duodenum, jejunum ve ileumun nispi uzunluğu ile karaciğer ve bursa fabricius nispi ağırlığında azalma -İleum morfolojisinde değişim -İleum *Koliform*, *E. coli* ve *Salmonella* popülasyonunda azalma -Claudin-1, claudin-5, occludin ve zonula occluden-1 ekspresyonunda artış	Fatholahi vd. (2021)

Tablo 2. Devamı

Etlik piliç	İndirgeyici ve stabilizatör olarak ticari nişasta kullanımı / Ag-NP'leri	1, 2, 3, 4 veya 5 ppm Ag-NP/L içme suyu	-Performans ve lenfoid organlar üzerine etkisizlik -1 ve 2 ppm dozlarında hematolojik ve immunolojik parametrelerde iyileşmelerle verimli ve güvenli bir şekilde uygulanabilirlik -3, 4 ve 5 ppm dozlarında hematolojik, biyokimyasal ve oksidatif parametreler (MDA, TAC ve GSH-px) üzerinde doza bağlı hafif ila orta şiddette olumsuz etkiler	Fouda vd. (2021)
Etlik piliç	*Psidium guajava* yaprağı / Zn-NP'leri	45, 90, 135 veya 180 mg/kg diyet	90 mg/kg seviyesine kadar -YYO'nı etkilemeden CAA'da iyileşme -Et SOD aktivitesinde artış Tüm Zn-NP ilave seviyelerinde -Bağırsak içeriği *E. coli* ve *Salmonella spp.* popülasyonunda düşüş	Hidayat vd. (2021b)
Japon bıldırcını	*Bacillus subtilis* AM12 bakterileri / ZnO-NP'leri	0.1, 0.2, 0.3 veya 0.4 g/kg diyet	-0.2 g/kg Zn-NP ilavesi ile performansta iyileşme -0.1 ve 0.3 g/kg Zn-NP ilaveleri ile serum ALT, AST ve LDH, SOD ve GSH-px aktiviteleri ile serum MDA, IgG ve IgM üzerinde olumlu etki -0.2 ve 0.3 g/kg Zn-NP ilaveleri ile serum LDL düzeyinde azalma, 0.4 g/kg Zn-NP ilavesi ile LDL düzeyinde artış -0.3 g/kg Zn-NP' ilavesi ile T-COL düzeyinde azalma -Tüm Zn-NP ilaveleri ile serum HDL'de artış	Reda vd. (2021)
Stres altındaki etlik piliç	*Spirulina platensis algi* / Se-NP'leri	0.1 veya 0.2 mg/kg diyet	-CAA ve Avrupa ürün verimlilik faktöründe artış -Serum IgM, IgA ve IgG, GSH-px ve SOD düzeylerinde artış, TBARS düzeyinde azalma - İleal toplam bakteri, toplam küf ve maya, *Koliform, E. coli, Salmonella spp.* ve *Enterococcus spp.* popülasyonlarına karşı doza bağlı antimikrobiyal aktivite, -LAB'nin ileal popülasyonlarında doza bağlı artış	Abdel-Moneim vd. (2022)
Etlik piliç	*Bacillus subtilis* bakterileri / Se-NP'leri	0.3 mg/kg diyet	-Performansta iyileşme -Karkas, göğüs ve but nispi ağırlıklarında artış, karaciğer ve bursa fabricius nispi ağırlıklarında azalma -İleum morfolojisinde değişim ve ileum patojen mikrobiyotasında azalma -Duodenum, jejunum ve ileumun uzunluğunda azalma -Occludin, zonula occluden-1 ve zonula occluden-2'nin ekspresyonunda artış, claudin-5 ekspresyonunda azalma *Nano-biyo selenyumun, yaygın organik ve inorganik selenyum kaynaklarına kıyasla performans ve bağırsak bütünlüğünü daha etkili bir şekilde artırabildiği raporu	Ali vd. (2022)

Tablo 2. Devamı

Stres altında olan etlik piliç	*Saccharomyces boulardii* mayası / Se-NP'leri	0.075, 0.15 veya 0.3 mg/kg diyet	Tüm Se-NP ilaveleri ile -Et Se içeriğinde artış - Serum IgG düzeyinde artış -42. gün ileum LAB ve LAB/*Koliform* oranlarında artış 0.3 mg/kg Se-NP ilavesi ile -Sekum *Koliform* sayısında azalma -21. gün ileum ve jejunum vilus yüksekliği/kript derinliği oranında artış, ileum villus yüksekliği ve villus yüzey alanında artış, jejunum kript derinliği ve epitel hücre tabakası kalınlığında azalma -42. gün ileum ve jejunumda villus yüksekliği, villus yüzey alanı ve goblet hücre yoğunluğunda artış	Bami vd. (2022)
Etlik piliç	*Corallina elongata* extraktı / Ag-NP'leri ve biyojenik AgNP'lerin asetik asit ile kaplanması	1 mM / içme suyu	-Ag-NP'lerin asetik asitle kaplanmasının *Pseudomonas orizihabitain* ve *Sphinogomonas paucimobilis* olarak tanımlanan mikroflora popülasyonun yüzdesinde azalma -Piliç etinde Ag birikimi olmadığı *Asetik asitle kapatılan biyojenik Ag-NP'ler, piliç içme suyunda güvenli bir katkı maddesi, alternatif antibiyotik ve aynı zamanda çevre dostu olduğu raporu	El-Abd vd. (2022)
Etlik piliç	*Alternaria tenuissima* mantarı / ZnO-NP'leri	40 veya 60 mg/kg diyet	- CA, YT, YYO ve performans indeksinde gelişme -Serum T-KOL, trigliserit, LDL ve ürik asit konsantrasyonlarında azalma, HDL ve karaciğer enzim konsantrasyonlarında artış -Serum, karaciğer, göğüs ve butta artan Zn birikimi	Hatab vd. (2022)
Eimeria tenella ile enfekte etlik piliç	*Ficus racemose* ekstraktı / IO-NP'leri	10, 15 veya 20 mg/kg	Koksidiyal etkilere karşı - IO-NP'leri kullanım dozuna ve süresine bağlı olarak farklı düzeylerde büyüme, biyokimya ve hematolojik parametrelerde iyileşme, -Parazitlenmiş ve yüksek oranda hasar görmüş hepatositler, karaciğer ve sekum dokularında 15 ve 20 mg/kg dozundaki IO-NP ilaveleri ile iyileşme -15 mg/kg IO-NP ilavesi ile koksidiyozlu piliçlerde hızlı iyileşme ve büyüme artışı **Ficus racemosa*'nın yaprak ekstraktı kullanılarak sentezlenen yeşil IO-NP'lerin 15 mg/kg dozunun potansiyel ve güvenli bir antikoksidiyal ajan olabileceği	Khan vd. (2023)
Eimeria tenella ile enfekte etlik piliç	*Nigella sativa* / Zn-ONP'leri	60 mg/kg diyet	-Enfekte piliçlerde kötüleşen büyüme performansında artış -Ookist dökülümü ve antikoksidial indeksde azalma -AST ve ALT düzeylerinde azalma, CAT ve SOD gibi antioksidan enzim düzeylerinde artış -IL-2 ve TNF-α gibi proenflamatuar sitokinlerde azalma **Nigella sativa* içeren biyojenik ZnO-NP'ler, gelişmiş büyüme performansıyla birlikte antikoksidiyal, antioksidan ve antienflamatuar etkileri artırmış olabileceği	Lail vd. (2023)

Tablo 2. Devamı

Etlik piliç	*Lactobacillus plantarum* bakteri / ZnO-NP'leri	40, 70 veya 100 mg/kg diyet	-100 mg/kg ZnO-NP'ler ilave seviyesinde serum, göğüs kası, tibia kemiği ve karaciğerde Zn tutulum ve birikiminde artış -Artan tibia külü, Zn, Ca ve P tutulumuyla birlikte tibia kemik mineralizasyonunda iyileşme -40, 70 ve 100 mg/kg ZnO-NP'leri ilave seviyelerinde tibia kemiğinin ağırlık, uzunluk ve kalınlık gibi morfolojik özelliklerinde iyileşme -70 ve 100 mg/kg diyet ZnO NP'leriyle beslenen piliçlerde serum ve karaciğer dokusundaki antioksidan durumda iyileşme	Yusof vd. (2023)

4.2. Laboratuvar hayvanı yemlerinde yeşil sentez MNP kullanımı
4.2. Use of green synthesis MNP in laboratory animal feeds

Camellia sinensis'in yaprak ekstraktı kullanılarak üretilen yeşil sentez ZnO-NP'lerinin, *Aspergillus ochraceus* kullanılarak buğday taneleri üzerinde katı hal fermantasyonu yoluyla üretilen okratoksin A (OTA)'nın albino sıçanlarda yol açtığı semtomlar üzerine olan etkilerini belirlemek amacıyla yürütülen çalışma sonuçları, 25 ppm diyet ZnO-NP ilavesi ile OTA'nın yol açtığı performansta gerileme, karaciğer ve böbrekte dejenerasyon, sinüzoidal boşluklarda artış, lenfosit infiltrasyon, damar tıkanıklığı ve nekroz, serum ALT, AST ve kreatinin düzeylerinde artış ile albümin ve TP düzeyinde azalma gibi olumsuzlukların tümünün iyileştiği ve *Camellia sinensis* aracılı ZnO-NP'lerin, albino sıçanlarda OTA'nın öldürücü etkilerini azaltmak için hepatoprotektif ve nefroprotektif bir rol oynadığını göstermektedir (Hassan vd., 2021). Sütten kesilmiş wistar rat rasyonlarına 10 ppm ZnSO4 ya da ticari veya yeşil yöntemle sentezlenmiş 10, 20 ve 40 ppm seviyelerinde Zn-NP'leri ilavelerinin hematolojik parametreleri, serum glukoz, üre, toplam protein, albümin, globulin ve kreatinin ile serum Ca, P, Cu, Fe ve Mn seviyelerini etkilemediği, ancak serum Zn seviyelerinin tüm Zn-NP takviyeleri ile önemli ölçüde yükseldiği tespit edilerek Zn-NP'lerinin sıçanların diyetine 40 ppm seviyesine kadar güvenli bir şekilde eklenebileceği bildirilmiştir (Raje vd., 2018b). Öte yandan Ezealisiji vd. (2019), 28 gün süreyle Wistar albino sıçanlara %0.5 veya %1 dozlarında itüzümü olarak bilinen *Solanum torvum*'un sulu ekstraktından biyosentezle üretilen ZnO-NP'leri içeren hidrojelin dermatolojik uygulaması ile plazma Zn içeriklerinin doza ve zamana bağlı olarak arttığını, serum ürik asit ve üre düzeylerinin azaldığını ancak serum alkalen fosfataz (ALP) ve TP üzerine etkili olmadığını ve %1 ZnO-NP uygulamasının ise serum AST, ALT, T-KOL ve kreatinin düzeylerini artırdığını bildirerek dermatolojik olarak ZnO-NP'leri içeren hidrojel uygulamasının hem böbrek hem de karaciğer biyobelirteçleri üzerine etkili olduğunu ve uzun süreli uygulama sonrasında organlarda hasara neden olabileceğini duyurmuşlardır.

Anne rat ve fetüsün dokuları üzerinde saponin ilavesi ya da limon suyu veya saponinden yeşil sentezle üretilen Ag-NP'leri ilavelerinin fizyolojik, histolojik ve genotoksik etkilerini ortaya çıkarmayı amaçlayan çalışma sonuçlarına göre anneye ait vücut, karaciğer ve böbrek ağırlıklarının katkı maddelerinden etkilenmediği ancak başta yeşil sentez saponin Ag-NP'leri olmak üzere, sırasıyla limon suyu Ag-NP'leri ve saponin ilaveli gruplarda karaciğer, böbrek ve plasentada Ag-NP birikimi ile serum glikoz, ALT, AST, ALP, T-KOL, trigliserit, kreatinin, üre ve ürik asit miktarlarının artıp serum albumin ve TP miktarlarının azaldığı, hem fetös hem de annenin karaciğer ve böbrek dokularında CAT, SOD, glutatyon (GSH) ve glutation transferaz (GST) aktivitelerinin azalıp, MDA ve nitrik oksit düzeylerinin arttığı ve ayrıca Ag-NP'lere maruz kalan gebe ratların karaciğer ve böbreklerinde DNA hasarı göstergelerinde anlamlı artışlar kaydedilmiştir (Abdelaziz vd., 2023). Wistar dişi ratlara gebeliğin 3-14. günlerinde iki farklı dozda giraburu (*Viburnum opulus* L.) meyve ekstraktından yeşil sentezle elde edilen Ag-NP (0.8 ve 1.5 mg/kg vücut ağırlığı) uygulanarak, doğumdan sonraki 6. haftada, erkek yavruların testislerinde Ag miktarı ile ilişkili olarak ultrastrüktürel değişiklikler ve oksidatif stres, enflamasyon ve hücre ölümü mekanizmaları parametrelerinin değerlendirildiği çalışmada hamilelik sırasında uygulanan Ag-NP'lerin plasenta ve testis bariyerlerini geçerek hücre toksisitesinin mekanizması olarak oksidatif stresi, DNA hasarını ve otofajiyi indüklediği bildirilmektedir. Ayrıca Ag-NP'lere maruziyetten sonra enflamasyon ve apoptoz belirteçlerinde azalma nükleer faktör kappa B (NFkB) aktivasyonunda artış, sertoli hücrelerinde önemli yapısal değişiklikler olduğu

tespit edilerek erkek gonadının embriyolojik gelişimi sırasında uygulanan *Viburnum opulus* L. meyve ekstraktından yeşil sentezle elde edilen Ag-NP'lerin, doğumdan 6 hafta sonra bile testislerde toksik etkiye neden olduğu rapor edilmiştir (Bidian vd., 2021).

Biyolojik ve kimyasal olarak sentezlenen CuO-NP'lerin fareler üzerindeki karşılaştırmalı toksikolojik etkilerini değerlendirmek üzere tasarlanmış olan çalışmada, kırk beş fare rastgele üç gruba ayrılmış ve kontrol grubuna damıtılmış su, ikinci gruba tek doz *Ulva fasciata* makro algi kullanılarak biyolojik olarak sentezlenen CuO-NP'leri (500 mg/kg vücut ağırlık), üçüncü gruba ise tek doz kimyasal olarak sentezlenmiş CuO-NP'ler (500 mg/kg bw) oral yoldan uygulanmıştır. Hem biyolojik hem de kimyasal olarak sentezlenen CuO-NP'leri ilavelerinin lökositoza, serum ALT ve AST aktiviteleri ile serum üre ve kreatinin seviyelerinde artışa, hepatik dokularda P53 mRNA ve kaspaz-3 protein ekspresyonlarında artışa neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, CuO-NP'ler hepatik, renal ve dalak dokularında dejeneratif ve nekrotize değişikliklere de neden olduğu ve biyokimyasal, apoptotik ve patolojik değişikliklerin biyolojik olarak sentezlenmiş CuO-NP'ler ile uygulanan farelerde daha ciddi olduğu rapor edilen bu çalışmada, biyolojik ve kimyasal olarak sentezlenen CuO-NP'lerin yüksek dozunun hepatik, renal ve dalak dokularında olumsuz etkilere neden olduğu bildirilmektedir. Aynı doz seviyesinde, biyolojik olarak sentezlenen CuO-NP'ler kimyasal olarak sentezlenen CuO-NP'lere göre daha güçlü toksik etkilere neden olmuştur (El Bialy vd., 2020). Çiftleşme öncesinden başlayarak tüm gebelik boyunca haftada iki kez oral yolla 50 veya 100 mg/kg yeşil ya da kimyasal olarak sentezlenmiş bakır oksit nanopartikül (CuO-NP)'lerin, ratlar ve yavruları üzerindeki karşılaştırmalı hepatotoksik etkisini araştırmak için tasarlanan çalışmada, Naz vd. (2021) yeşil sentezle üretilen CuO-NP'lerin etrafının bitki özütünde bulunan fitokimyasallarla kaplanararak hem çıplak NP'lerin toksik etkisinin hafifletildiğini hem de toksik Cu^{2+} iyonlarının salınımının sınırladığını ileri sürerek yeşil NP'lerin kimyasal NP'lere kıyasla daha az toksik olduğu ve annenin CuO-NP'lere maruz kalmasının emzirme yoluyla yavrularda belirgin bir değişikliğe neden olmadığı sonucuna varmışlardır.

Sıcaklık stresi altında yetiştirilen tavşan yemlerine 25 veya 50 mg/kg dozlarında biyolojik ve kimyasal yöntemle sentezlenen Se-NP'lerinin potansiyel etkilerini karşılaştırmak amacıyla Sheiha vd. (2020) tarafından tasarlan çalışmada, biyolojik olarak sentezlenen Se-NP büyüme, karkas, oksidatif ve enflamatuar parametrelerin iyileştirilmesi açısından, kimyasal olarak sentezlenen Se-NP'lere göre stres etkilerini hafifletme ve büyüyen tavşanların performansını artırma konusunda daha üstün etkiler göstermiştir.

Oral yolla 4 gün boyunca giraburu (*Viburnum opulus*) meyve ekstraktından kg vücut ağırlığı için 0.3 mg/kg yeşil sentezle üretilen altın nanopartikül (Au-NP)'leri, kg vücut ağırlığı için 15 mg/kg giraburu ekstraktı veya kg vücut ağırlığı için 15 mg/kg indometasin uygulamasının karragenan ile indüklenen deneysel plantar enflamasyonu oluşturulmuş Wistar ratlar üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmada Au-NP'lerin plantar oksidatif stres üzerindeki etkisi enflamasyonun indüklenmesinden 48 saat sonra ortaya çıkmıştır. Au-NP'lerin, özellikle geç dönem enflamasyonda cilt MDA oluşumunu azalttığı ve CAT ve GSH-px aktivitelerinin yanı sıra GSH / oksitlenmiş GSH oranını da arttırdığı ve ayrıca Au-NP'lerinin enflamasyonun indüksiyonundan sonraki 2. saatte kontrol grubuna kıyasla IL-1α, IL-1β, IL-6 ve TNF-α'nın lokal salgılanmasını ve indüklenebilir nitrik oksit sentaz (iNOS) ile siklooksijenaz (COX)-2 ekspresyonunda azalma sağladığı tespit edilerek, hem Au-NP hem de ekstraktın enflamasyonla ilişkili hastalıkların tedavisi için değerli ajanlar olarak kullanılabilir olduğu söylenmiştir (Bidian vd., 2022).

Tablo 3. Yeşil sentez metalik nanopartiküllerinin laboratuvar hayvanları üzerine etkisi
Table 3. *Effect of green synthesis metallic nanoparticles on laboratory animals*

Tür	Yeşil sentez MNP tipi	Konsantrasyon	Etki	Referans
Wistar rat	Yeşil sentez Zn-NP ya da ticari Zn-NP	10, 20 veya 40 ppm diyetle	-Serum Zn düzeyindeki artış dışında diğer serum mineral (Ca, P, Cu, Mn ve Fe) düzeyleri ile serum biyiokimyasal ve hematolojik parametreleri üzerine etkili olamama	Raje vd. (2018b)
Wistar albino rat	*Solanum torvum* yaprak ekstraktı / ZnO-NP'leri	%0.5 veya %1 dermatolojik	-Serum ürik asit seviyesinde doza bağlı olarak azalma, ALP seviyesinde artış -Serum ALT seviyesinde 28 günlük maruziyet sonrasında artış *Yeşil sentez ZnO-NP'ler içeren hidrojelin ratlarda karaciğer ve böbrek performansını etkileyebileceği ve maruz kalma süresine bağlı olarak gözlemlenebilen birikimin toksikolojik etkili olduğu	Ezealisiji vd. (2019)

Tablo 3. Devamı

Fare	*Ulva fasciata makro algi /CuO-NP'leri ve kimyasal CuO-NP*	Kg vücut ağırlığı için 500 mg, oral olarak	-Beyaz kan hücrelerinde artış -Serum ALT ve AST aktiviteleri ile üre ve kreatinin düzeylerinde artış -Karaciğer dokusunda P53 mRNA ve kaspaz-3 protein ekspresyonlarında artış -Karaciğer, böbrek ve dalak dokularında dejeneratif ve nekrotik değişiklikler -Yeşil sentez CuO-NP'leri uygulanan farelerde daha ciddi olmak üzere biyokimyasal, apoptotik ve patolojik değişiklikler *Yüksek dozda biyolojik ve kimyasal olarak sentezlenmiş CuO-NP'lerin karaciğer, böbrek ve dalak dokuları üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu *Aynı doz seviyesinde, biyolojik olarak sentezlenen CuO-NP'lerin, kimyasal olarak sentezlenenlere göre daha güçlü toksik etkilere neden olduğu	El Bialy vd. (2020)
Sıcaklık stresi uygulanan tavşan	İnsan sütünden izole edilen LAB / Se-NP'leri	25 veya 50 mg/kg diyet	-CA, YT ve YYO doza bağlı gelişme -Karkas randımanında artış -Serum metabolitleri, antioksidan indeksleri ve enflamatuar sitokin tepkilerinde iyileşme *Yeşil sentez 25 veya 50 mg Se-NP/kg diyet seviyeleri stres altında barındırılan tavşanların büyüme performansını, böbrek ve karaciğer fonksiyonlarını, karkas özelliklerini, antioksidan indekslerini ve enflamatuar sitokinlerini iyileştirdiği raporu	Sheiha vd. (2020)
Rat	*Viburnum opulus* L. ekstraktı / Ag-NP'leri	Gebeliğin 3-14. günlerinde kg vücut ağırlığı 0.8 veya 1.5 mg/ Ag-NP enyeksiyonu	-Oksidatif stresi, DNA hasarını ve otofajiyi indüklediği -İnflamasyon ve apoptoz belirteçlerinde azalma, NFkB aktivasyonunda artış -Sertoli hücrelerinde önemli yapısal, vakuol ve sitoplazmik değişiklikler *Doğumdan 6 hafta sonra bile testislerde toksik etki	Bidian vd. (2021)
Okratoksin A ile indüklenen albino rat	*Camellia sinensis* ekstraktı /ZnO-NP'leri	25 ppm diyet	Okratoksin A beslemesi ile tespit edilen -Performansta gerileme, -Karaciğer ve böbrekte dejenerasyon, sinüzoidal boşluklarda artış, lenfosit infiltrasyonu, damar tıkanıklığı ve nekroz -Serum ALT, AST ve kreatinin düzeylerinde yükselme, albümin ve TP düzeyinde azalma gibi olumsuzlukların tümünün yeşil sentez ZnO-NP beslemesi ile iyileştiği ve *Camellia sinensis* aracılı ZnO-NP'lerin, albino sıçanlarda OTA'nın öldürücü etkilerini azaltmak için hepatoprotektif ve nefroprotektif bir rol oynadığı sonucu	Hassan vd. (2021)
Sprague-Dawley ratlar ve doğan yavruları	*Rhus punjabensis* yaprak ekstraktı CuO-NP'ler ve kimyasal üretilen CuO-NP'leri	Çiftleşme öncesinden itibaren tüm gebelik boyunca haftada iki kez 50 veya 100 mg CuO-NP/kg oral yolla	-Kimyasal CuO-NP'leri uygulanan ebeveynlerde CAT, peroksidaz ve GSH enzim aktivitelerinde azalma, lipid peroksidasyon seviyesinde artış -Kimyasal ve yeşil sentez CuO-NP'leri uygulamaları ile ebeveynlerde başta ALP ve ALT aktiviteleri ile toplam bilurubinde olmak üzere karaciğer fonksiyon testlerinde cinsiyete ve doza bağlı artışlar -Biyosentez CuO-NP uygulamalarında genotoksik parametrelerde anlamlı bir değişiklik görülmezken, 100 mg/kg kimyasal CuO-NP'leri uygulanan bilhassa dişi ebeveynlerde %2.3 oranıyla maksimum DNA hasarı -Yeşil sentez Cu-NP uygulaması ebeveynlerde önemli bir patoloji olmaksızın sağlam karaciğer yapısı sergilerken kimyasal CuO-NP uygulaması ile sinüzoidlerde doza bağlı dilatasyon ve tıkanıklık -CuO-NP'leri uygulanan yavrularda control gruplarında olduğu gibi hiçbir belirgin patoloji olmaksızın normal ve sağlam bir karaciğer yapısı (yavrulara uygulana hiçbir testte anlamlı bir farklılık gözlenmediği) -Yeşil sentez CuO-NP'lerle beslenen ebeveyn ve yavrularda olumlu histolojik değişiklikler *Kimyasal CuO-NP uygulaması ile, yeşil sentez CuO-NP'lere kıyasla karaciğer üzerinde doza bağlı toksik etkiler *Biyouyumlu olmaları nedeniyle yeşil sentez CuO-NP'lerin farmakolojik uygulamasının mümkün oduğu	Naz vd. (2021)

Tablo 3. Devamı

Deneysel enflamasyon oluşturulan Wistar rat	*Viburnum opulus* ekstraktı / Au-NP'leri	Kg vücut ağırlığı için 0.3 mg Au-NP oral yoldan	-Au-NP plantar enflamasyon üzerinde antioksidan ve antienflamatuar etki *Au-NP'lerinin enflamasyonla ilişkili hastalıkların tedavisine yönelik değerli ajanlar olarak kullanılabileceği	Bidian vd. (2022)
Gebe Wistar albino rat	Limon suyu veya saponin /Ag-NP'leri	Kg vücut ağırlığı için 100 mg saponin ilavesi ya da limon suyu veya saponinden yeşil sentezle üretilen kg vücut ağırlığı için 300 mg Ag-NP'lerinin gebeliğin 19. gününe kadar günde bir kez oral yolla	-Başta saponin Ag-NP'leri olmak üzere Ag-NP uygulanan anne ratların karaciğer kesitlerinde hepatosellüler nekrozun odak alanları sıklığında artış, karaciğer parankiminde yoğun mononükleer iltihabi hücre infiltrasyonu ve bazı kesitlerde portal fibrozis varlığı, diğer bazı kesitlerde de mononükleer hücrelerin odak birikimlerinin varlığı -Ag-NP'ler uygulanan fetus karaciğerlerinde hasar görmüş endotel tabakası, genişlemiş sinusoidler ve vakuolize hepatositler ile temsil edilen karaciğer parankimasında belirgin değişiklikler -Ag-NP'leri uygulanan anne sıçanların böbrekleri hem renal korteks hem de medullada renal tübüllerde yaygın nekroz ve odak birikimler halinde mononükleer iltihabi hücrelerin varlığı, Ag-NP'leri uygulamaları ile fetuslerde renal dokuda artmış kapsüler alan ve tübüler parankima genişlemesi *Yeşil sentez Ag-NP'lerin anne ve fetus dokuları üzerinde toksik etkilere yol açabildiği raporu	Abdelaziz vd. (2023)

4.3. Su ürünleri yemlerinde yeşil sentez MNP kullanımı
4.3. Use of green synthesis MNP in aquaculture feeds

Suda yaşayan canlılar normal yaşam süreçleri için Cu, Zn, Fe, Ca, Mg, Na, K, P, Se gibi minerallere ihtiyaç duyarlar ve bazı inorganik elementleri yalnızca diyetlerinden (canlı veya yapay) değil, aynı zamanda çevrelerinden de absorbe etme yeteneğine sahiptirler. Cu, ZnO, FeO, MnO, MgO ve Se gibi elementler çok düşük düzeylerde gerekli olmaları nedeniyle zaman zaman su ürünleri yetiştiriciliğinde mineral eksikliğini gidermek için diyet formüle etmek veya mineral bakımından düşük bir su ortamını sürdürmek zor olabilmektedir (Satgurunathan vd., 2019). Düşük miktardaki mineraller bitki, alg, maya ve bakteri gibi biyolojik ajanlar kullanılarak üretilen MNP'lerle sağlanabilir. Nanoteknolojinin su ürünleri yetiştiriciliğinde uygulanması çok erken bir aşamada olmasına rağmen, farklı düzeylerde daha iyi teknik yeniliklerle su ürünleri yetiştiriciliği ve balıkçılık sorunlarının önemli bir kısmını çözme potansiyeline sahip olabilir (Thangapandiyan & Monika, 2020).

Asaikkutti ve ark. (2016), *Ananas comosus* kabuk ekstraktından yeşil sentezle üretilen MnO-NP'lerin tatlı su karidesi *Macrobrachium rosenbergii* için güvenli ve etkili bir diyet takviyesi olduğunu ve yaşam gücü, büyüme performansı ve antioksidan aktivitelerini artırabileceğini bildirmişlerdir. Thangapandiyan & Monika (2020), *Spinacia oleracea* yaprak ekstraktından yeşil sentezle üretilen ZnO-NP'lerinin diyete ilaveleri ile su ürünleri yetiştiriciliğinde çinko eksikliğine bir çözüm sağlayabileceğine dikkat çekmişlerdir. Kurian & Elumalai (2021), Nil tilapia balık diyetlerine *Leucas aspera* ekstraktından yeşil sentezle üretilen 400 mg/kg ZnO-NP'leri ilavesinin antioksidan enzim aktivitelerini ve dolayısıyla bağışıklık tepkisini artırdığını, organlarda histolojik hasara neden olmadığını ve bu nedenle balık sağlığının iyileştirilmesi için yeşil sentez ZnO-NP kullanımının önerilebileceğini bildirmişlerdir.

Son yıllarda biyoteknoloji, sağlık, elektronik, giyim ve kozmetik vb üretiminde sıklıkla kullanılan Ag-NP'lerin su ekosistemlerinin kirlenmesine ve sudaki türlerin olumsuz etkilenmesine neden olduğu bildirilmektedir (Hamed & Abdel-Tawwab, 2021). Karabiber (*Piper nigrum)*'den yeşil sentezle üretilen Ag-NP'lerin öldürücü olmayan konsantrasyonlardaki (2.5 veya 5 µg/L su) ilavesinin dahi *Labeo rohita* balığının solungaç, karaciğer ve böbreklerinde birikime, oksidatif strese ve histopatolojik değişikliklere yol açtığı anlaşılmıştır (Shobana vd., 2018). Nil tilapia balıklarının test sularına öldürücü olmayan iki farklı doz (1.95 veya 3.9 ppm) *Moringa oleifera* yaprak ekstraktı aracılı yeşil sentez Ag-NP'leri maruzuyeti ile uyarı ve mikronükleus hücreleri gibi eritrositlerde sitotoksisite ve genotoksik etkilerle birlikte hematolojik ve biyokimyasal dejenerasyonu oluşmuştur (Ibrahim, 2021). Öte yandan Mansour vd. (2021), Nil tilapia'sının

3.31 mg/L üzerinde dozlarda çevre dostu nano-malzeme olarak kullanılan nişasta aracılı Ag-NP'lere kronik maruziyetinin, toksisite ve iltihabi gen ekspresyonunu tetiklemenin yanı sıra şiddetli oksidatif stresi de içeren lineer toksisite tepkisine neden olduğunu ve ayrıca Ag-NP'lere maruziyetle hematotoksisite, karaciğer ve böbrek fonksiyonlarinde bozulma, büyüme ve mortalite sorunlarına yol açtığını kaydetmişlerdir.

Tablo 4. Yeşil sentez metalik nanopartiküllerinin su ürünleri yemlerine ilavesi
Table 4. *Addition of green synthesis metallic nanoparticles to aquaculture feeds*

Tür	Yeşil sentez MNP tipi	Konsantrasyon	Sonuçlar	Referans
Karides (*Macrobrachium rosenbergii*)	*Ananas comosus* kabuk ekstraktı / MnO-NP'leri	3.0, 6.0, 9.0, 12.0, 15.0 veya 18.0 mg/kg diyet	-MnO-NP ilaveleri ile büyüme performansı, sindirim enzim aktiviteleri ve kas biyokimyasal bileşimlerinde gelişme -15 mg/kg MnO-NP ilavesi ile kas mineral konsantrasyonları, toplam azot ve ham protein yüzdesi ile TP, amino asit, karbonhidtat ve lipit miktarlarında artış -18 mg/kg MnO-NP ilavesi ile kas ve hepatopankreastaki antioksidan enzim (SOD, CAT, glutamik oksaloasetat transaminaz (GOT), glutamik piruvat transaminaz (GPT)) aktivitelerinde artış	Asaikkutti vd. (2016)
Hint büyük sazanı-Rohu balığı (*Labeo rohita)*	*Piper nigrum*'un sulu yaprak ekstraktı / Ag-NP'leri	2.5 veya 5 µg/L su (Ag-NP'leri sabit bir seviyede tutmak için her 24 saatte bir test suyu yenilenerek taze hazırlanan çözelti eklenmiştir).	-Solungaç, karaciğer ve böbreklerde önemli ölçüde Ag birikimi -Solungaç, karaciğer ve böbrekte antioksidan enzimler SOD ve CAT' aktivitesinde azalma, lipit peroksidaz (LPO) aktivitesinde ve oksidatif stress belirteçlerinde artış -Solungaç, karaciğer ve böbreklerde lamel dejenerasyonu, lamel epitelinin kaldırılması, hepatiknekroz, piknotik çekirdekler, hücre içi alanın artması ve glomerulusun büzülmesi gibi histopatolojik değişiklikler **Piper nigrum*'dan yeşil sentezle üretilen Ag-NP'lerinin öldürücü olmayan konsantrasyonlarda ilavesinin *Labeo rohita* balığının hedef organlarında Ag birikimine, oksidatif strese ve histopatolojik değişikliklere yol açtığını sonucu	Shobana vd. (2018)
Karides (*Macrobrachium rosenbergii*) post larvaları	*Allium sativum* ekstraktı / Cr-NP'leri	4.94 mg/L konsantrasyonundaki Cr-NP'leri ile farklı sürelerde (½, 1, 2 ve 4 saat) zenginleştirilen *Artemia nauplii* isimli canlı yem vasıtasıyla	-½ ve 1 saatlik zenginleştirilmiş *Artemia nauplii*'nin büyüme ve hayatta kalma dahil beslenme indekslerinde ve karides post larvalarının TP, amino asit, karbonhidrat ve lipit gibi doku biyokimyasal bileşen konsantrasyonlarında önemli iyileşmeler -4.94 mg/L Cr-NP'lerinin *Macrobrachium rosenbergii* post larvalar için toksik olmadığı	Satgurunathan vd. (2019)
Öldürücü olmayan konsantrasyonda (1.95 ve 3.9 ppm) *Moringa oleifera* yaprak ekstraktından biyosentezle üretilen Ag-NP'lere maruz bırakılan Nil tilapia balığı (*Oreochromis niloticus*)	*Moringa oleifera* yaprak ekstraktı / Se-NP'leri	Test suyuna 4 hafta boyunca her gün 0.1 ppm Se-NP'leri veya 0.1 ppm Na_2SeO_3 (Sodium selenite)	Ag-NP'lerin ilaveleri ile -Eritrosit, hemoglobin, hematokrit, ortalama eritrosit hacmi, lökositler, lenfositler ve serum proteinleri konsantrasyonunda azalma -Ortalama corpuscular hemoglobin konsantrasyonu, mikronükleus, uyarılan hücreler, nötrofiller, AST, ALT ve ALP enzim aktiviteleri, üre, kreatinin, glukoz, T-KOL ve trigliserit düzeylerinde artış *Na_2SeO_3 ve Se-NP'leri ilavelerinin Ag-NP'lerin toksisitesinin detoksifikasyonunda iyimser bir rolü olduğu ancak biyosentezlen Se-NP'lerinin hematolojik ve biyokimyasal parametrelerde Na_2SeO_3'ten daha etkili olduğu tespiti.	Ibrahim (2020)
Hint büyük sazanı-Rohu balığı (*Labeo rohita)*	*Spinacia oleracea* yaprak ekstraktı / ZnO-NP'leri	5, 7.5 veya 10 mg/kg diyet	-Büyüme performansı, biyokimyasal, hematolojik ve sindirim enzimi aktivitelerinde artış	Thangapandiyan & Monika (2020)
Nil tilapia balığı (*Oreochromis niloticus*)	*Leucas aspera ekstraktı* / ZnO-NP'leri	100, 200 veya 400 mg/kg yeşil sentez ZnO-NP ya da kimyasal sentez ZnO-NP'leri	-400 mg/kg yeşil sentez ZnO-NP'leri ilavesi ile antioksidan enzim (CAT, SOD, GSH-px, GSH) aktiviteleri ve ümmünolojik parametrelerde artış -NP'lerle ile zenginleştirilmiş yemle beslenen balık karaciğer ve solungaç dokularında histolojik değişiklikler -Çinko biyobirikiminin daha çok karaciğerde, ardından kaslarda ve en az solungaçlarda olduğu ve DNA hasarının, kimyasal olarak sentezlenmiş ZnO-NP ile zenginleştirilmiş yemle beslenen balıklarda daha belirgin olduğu	Kurian & Elumalai (2021)

Tablo 4. Devamı

Nil tilapia balığı (*Oreochromis niloticus*)	İndirgeyici ve stabilizatör olarak ticari nişasta kullanımı / Ag-NP'leri	3.31, 6.63, 13.25 veya 26.5 mg/L Ag-NP'ler	-mRNA toksisite seviyeleri (CYP1A ve HSP-70) ve inflamatuar (TNF-α ve TGF-β) genlerinde değişiklikler -Antioksidan genlerin (SOD ve CAT) ekspresyonunda baskılanma, enzim aktivitelerinde yavaşlama, MDA seviyesinde artış -3.31 mg/L'nin üzerindeki dozlarda Ag-NP'leri ilaveleri ile eritrosit, hemoglobin, hematokrit ve lökosit değerleri ile TP ve globulin düzeyinde azalma -Karaciğer fonksiyon enzimleri ve böbrek fonksiyon göstergelerinde toksisite *3.31 mg/L'nin üzerindeki dozlarda nişasta aracılı Ag-NP'lerin etkisi, Nil tilapia yavrularında moleküler ve proteomik seviyelerde toksisiteye neden olduğu	Mansour vd. (2021)
Zebra balığı *(Danio rerio)*	*Anisomeles malabarica* yaprak ekstraktı / IO-NP'leri	10, 20, 30, 40 veya 50 mg/100 g yem	40 mg yeşil sentezlenmiş IO-NP'leri ilavesi ile -YT, YYO, CAA, sindirim, metabolizma ve büyüme hızında artış -Sindirim enzimleri ve biyokimyasal bileşenlerde iyileşme	Rajan vd. (2021)
Candida albicans ile enfekte edilmiş yemlerle beslenen Nil tilapia balığı (*Oreochromis niloticus*) balığı	*Ulva fasciata yosunu* / ZnO-NP'leri	40 veya 60 mg/kg ZnO-NP'leri	-ZnO-NP'lerin antifungal aktiviteleri ve ZnO-NP'lere bağlı olarak *Candida albicans* hücresinde morfolojik değişiklikler -Yeşil sentez ZnO-NP'leri ilavelerinin, büyüme performansı, serum lizozim aktivitesi, fagositik aktiviteyi, fagositik indeksi, solunum patlaması ve sindirim enzimi aktivitesi ile bağışıklıkla ilgili genlerin (IL-1β, TGF, TNF-α) ekspresyonunda iyileşme -Diyetlerin 40 mg/kg biyosentez ZnO-NP'lerle desteklenmesinin Nil tilapia'sında kandidiyazın kontrol edilmesinde iyi bir seçim olarak değerlendirilebileceği raporu.	Diab vd. (2022)
Karides (*Macrobrachium rosenbergii*) post larvaları	*Allium sativum* ekstraktı / Se-NP'leri	0.5, 1.0, 1.5 veya 2.0 mg/kg diyet	-Karkaslarda doza bağlı Se birikimi -CAA ve YYO'nda iyileşme, ölüm oranında azalma -1.5 mg/kg'a kadar Se-NP'leri, diğer eser elementlerin (Ca, Cu ve Fe) ve mineral tuzlarının (K, Mg, Na ve Zn) emilimi üzerine etkiler -Bağırsak içeriğindeki sindirim enzim (proteaz, amilaz ve lipaz) aktiviteleri ve karides post larvaları kasındaki TP, kül, esansiyel amino asitler, toplam karbonhidrat, toplam lipid, tekli ve çoklu doymamış yağ asitleri içeriklerinde artış -1.5 mg/kg Se-NP ilave dozuna kadar karidesler için kabul edilebilir MDA, GOT, GPT, SOD ve CAT'in önemsiz derecede değişen aktiviteleri -2.0 mg/kg Se-NP takviyesinin karides üzerinde olumsuz etkiler yaratmaya başladığı *Karides post larvalarının sürdürülebilir büyümesini sağlamak için besin takviyesi olarak maksimum 1.5 mg/kg Se-NP'leri kullanımı önerisi	Satgurunathan vd. (2023)
Eromonas hydrophila ile enfekte edilen Nil tilapia balığı (*Oreochromis niloticus*)	*Curcuma longa* ekstraktı / ZnO-NP'leri	5, 7.5 veya 10 mg/kg diyet	10 mg/kg ZnO-NP ilavesi ile -Hematolojik indekslerde, vücut ham protein içeriğinde, antioksidan kapasitesinde (SOD ve GSH) ve humoral bağışıklıkta (IgM, lizozim ve kompleman yolu aktivitesi) artış, -MDA, dokusal ham lipit içeriği, T-KOL ve AST düzeyleri ve ölüm oranında azalma	Yazdani vd. (2023)

Sonuç
Conclusion

Yeşil sentezle üretilen MNP'lerin kanatlı hayvanlar, laboratuvar hayvanları ve su ürünleri yemlerinde ya da sularında kullanımına ilişkin literatür verileri incelendiğinde, hayvansal üretimde kullanılan yeşil sentez MNP ilavelerinin genel olarak büyüme performansı ve ürün kalitesini, bazı serum biyokimyasal bileşenleri, enflamatuar sitokinler ve immünoglobulinlerin düzeylerini iyileştirmenin yanı sıra kemik mineralizasyonu ve morfolojik özelliklerini artırarak kemik sağlığını, bağırsaktaki patojen bakteri gelişimini kontrol altına alıp yararlı bakteri popülasyonunu artırarak da bağırsak sağlığı ve bütünlüğünü iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca, yeşil sentez MNP'lerin, antioksidan durumu iyileştirerek oksidatif stresin neden olduğu olumsuzlukları etkili bir şekilde azaltabildiği, antikoksidiyal ve antimikrobiyel etkileri artırabildiği, hepatoprotektif ve nefroprotektif rol oynadığı görülmektedir. Öte yandan geleneksel yöntemlerle üretilen MNP'lere kıyasla düşük dozlarda kullanılan yeşil sentez MNP'lerin maliyeti azaltacağı gibi dışkı ile atılan mineral düzeyindeki azalma ile çevre kirliliğinde de azalmaya yol açarak çevre dostu ve antibiyotiklere alternatif güvenli bir katkı maddesi olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Ancak yemlerde yeşil sentez MNP kullanımında doza ve maruz kalma süresine bağlı olarak hayvanlarda görülebilecek olası toksik etkilere ilişkin literatür verileri, bu konuda dikkatli olunması gerektiğini ve ayrıca daha fazla, derin ve net çalışmalara gereksinim olduğunu düşündürmektedir.

Teşekkür
Acknowledgement

Bu çalışma**,** 26-28 Ekim 2023 tarihleri arasında, Zootekni Federasyonu tarafından düzenlenen 13. Ulusal Zootekni Kongresi'nde sözlü olarak sunulmuştur.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Abdelaziz, M. H., El-Dakdoky, M. H., Ahmed, T. A., & Mohamed, A. S. (2023). Biological impacts of the green synthesized silver nanoparticles on the pregnant albino rats and their fetuses. *Birth Defects Research, 115*(4), 441-457. https://doi.org/10.1002/bdr2.2131

Abdel-Moneim, A. M. E., Shehata, A. M., Selim, D. A., El-Saadony, M. T., Mesalam, N. M., & Saleh, A. A. (2022). Spirulina platensis and biosynthesized selenium nanoparticles improve performance, antioxidant status, humoral immunity and dietary and ileal microbial populations of heat-stressed broilers. *Journal of Thermal Biology, 104*, 103195. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103195

Abo-El-Yazid, Z. H., Ahmed, O. K., El-Tholoth, M., & Ali, M. A. S. (2022). Green synthesized silver nanoparticles using Cyperus rotundus L. extract as a potential antiviral agent against infectious laryngotracheitis and infectious bronchitis viruses in chickens. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 9*(1), 1-11. https://doi.org/10.1186/s40538-022-00325-z

Adegbeye, M. J., Elghandour, M. M., Barbabosa-Pliego, A., Monroy, J. C., Mellado, M., Reddy, P. R. K., & Salem, A. Z. (2019). Nanoparticles in equine nutrition: Mechanism of action and application as feed additives. *Journal of Equine Veterinary Science, 78*(7), 29-37. https://doi.org/10.1016/j.jevs.2019.04.001

Akbar, S., Tauseef, I., Subhan, F., Sultana, N., Khan, I., Ahmed, U., & Haleem, K. S. (2020). An overview of the plant-mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles and their antimicrobial potential. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry, 50*(4), 257-271. https://doi.org/10.1080/24701556.2019.1711121

Akhtar, K., Chand, N., Khan, S., Dai, S., & Khan, R. U. (2020). Supplementation of organic minerals and its effect on production performance and egg quality of laying hens. *Journal of Animal Physiology and Nutrition Science, 1*(1), 12-16. https://doi.org/10.46417/JAPN/2020.003

Aksoy, A., Macit, M., & Karaoğlu, M. (2011). *Hayvan Besleme,* Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Ofset Tesisi, Ders yayınları, No:220, s:166., Erzurum.

Ali, A. A., Soliman, E. S., Hamad, R. T., El-Borad, O. M., Hassan, R. A., & Helal, M. S. (2020). Preventive, behavioral, productive, and tissue modification using green synthesized selenium nanoparticles in the drinking water of two broiler breeds under microbial stress. *Brazilian Journal of Poultry Science, 22*(01). https://doi.org/10.1590/1806-9061-2019-1129

Ali, F., Saeed, K., & Fatemeh, H. (2022). Nano-Bio selenium synthesized by bacillus subtilis modulates broiler performance, intestinal morphology and microbiota, and expression of tight junction's proteins. *Biological Trace Element Research, 200*(4), 1811-1825. https://doi.org/10.1007/s12011-021-02767-2

Allur Subramaniyan, S., Kang, D. R., Belal, S. A., Choe, H. S., & Shim, K. S. (2018). A comparative study of biologically and chemically fabricated synthesized AgNPs' supplementation with respect to heat-shock proteins, survival, and hatching rates of chicken embryos: an in ovo study. *Journal of Cluster Science, 29*, 129-139. https://doi.org/10.007/s10876-017-1319-5

Asaikkutti, A., Bhavan, P. S., Vimala, K., Karthik, M., & Cheruparambath, P. (2016). Dietary supplementation of green synthesized manganese-oxide nanoparticles and its effect on growth performance, muscle composition and digestive enzyme activities of the giant freshwater prawn Macrobrachium rosenbergii. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 35*, 7-17. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.01.005

Bami, M. K., Afsharmanesh, M., Espahbodi, M., & Angkanaporn, K. (2021). Dietary supplementation with biosynthesised nano-selenium affects growth, carcass characteristics, meat quality and blood parameters of broiler chickens. *Animal Production Science, 62*(3), 254-262. https://doi.org/10.1071/AN21192

Bami, M. K., Afsharmanesh, M., Espahbodi, M., & Esmaeilzadeh, E. (2022). Effects of dietary nano-selenium supplementation on broiler chicken performance, meat selenium content, intestinal microflora, intestinal morphology, and immune response. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 69*, 126897. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126897

Bharadwaj, K. K., Rabha, B., Pati, S., Sarkar, T., Choudhury, B. K., Barman, A., Bhattacharjya, D., Srivastava, A., Baishya, D., Edinur, H. A., Kari, Z. A., & Mohd Noor, N. H. (2021). Green synthesis of gold nanoparticles using plant extracts as beneficial prospect for cancer theranostics. *Molecules, 26*(21), 6389. https://doi.org/10.3390/molecules26216389

Bidian, C., Filip, G. A., David, L., Florea, A., Moldovan, B., Robu, D. P., Olteanu, D., Radu, T., Clichici, S., Mitrea, D. R., & Baldea, I. (2021). The impact of silver nanoparticles phytosynthesized with Viburnum opulus L. extract on the ultrastrastructure and cell death in the testis of offspring rats. *Food and Chemical Toxicology, 150*, 112053. https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112053

Bidian, C., Filip, G. A., David, L., Moldovan, B., Baldea, I., Olteanu, D., Filip, M., Bolfa, P., Potara, M., Toader, A. M., & Clichici, S. (2022). Viburnum opulus fruit extract-capped gold nanoparticles attenuated oxidative stress and acute inflammation in carrageenan-induced paw edema model. *Green Chemistry Letters and Reviews, 15*(2), 320-336. https://doi.org/10.1080/17518253.2022.2061872

Biswas, P., & Wu, C. Y. (2005). Nanoparticles and the environment. *Journal of the Air & Waste Management Association, 55*(6), 708-746. https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464656

Cengiz, M., Baytar, O., Şahin, Ö., Kutlu, H. M., Ayhanci, A., Vejselova Sezer, C., & Gür, B. (2023). Biogenic Synthesized Bare and Boron-Doped Copper Oxide Nanoparticles from Thymbra spicat ssp. spicata: In Silico and In Vitro Studies. *Journal of Cluster Science*, 1-20. https://doi.org/10.1007/s10876-023-02481-0

Dhir, S., Dutt, R., Singh, R. P., Chauhan, M., Virmani, T., Kumar, G., Alhalmi, A., Aleissa, M. S., Rudayni, H. S., & Al-Zahrani, M. (2023). Amomum subulatum Fruit Extract Mediated Green Synthesis of Silver and Copper Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Antibacterial and Anticancer Activities. *Processes, 11*(9), 2698. https://doi.org/10.3390/pr11092698

Diab, A. M., Shokr, B. T., Shukry, M., Farrag, F. A., & Mohamed, R. A. (2022). Effects of dietary supplementation with green-synthesized zinc oxide nanoparticles for candidiasis control in Oreochromis niloticus. *Biological Trace Element Research, 200*(9), 4126-4141. https://doi.org/10.007/s12011-021-02985-8

Dosoky, W. M., Fouda, M. M., Alwan, A. B., Abdelsalam, N. R., Taha, A. E., Ghareeb, R. Y., El-Aassar, M. R., & Khafaga, A. F., (2021). Dietary supplementation of silver-silica nanoparticles promotes histological, immunological, ultrastructural, and performance parameters of broiler chickens. *Scientific Reports, 11*(1), 4166. https://doi.org/10.1038/s41598-021-83753-5

Dukare, S., Mir, N. A., Mandal, A. B., Dev, K., Begum, J., Tyagi, P. K., Rokade, J. J., Biswas, A., Tyagi, P. K., & Bhanja, S. K. (2020). Comparative study on the responses of broiler chicken to hot and humid environment supplemented with different dietary levels and sources of selenium. *Journal of Thermal Biology, 88*, 102515. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102515

Ealia, S. A. M., & Saravanakumar, M. P. (2017). *A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. In IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 263, No. 3, 2017, November, pp. 032019). IOP Publishing.

El Bialy, B. E., Hamouda, R. A., Abd Eldaim, M. A., El Ballal, S. S., Heikal, H. S., Khalifa, H. K., & Hozzein, W. N. (2020). Comparative toxicological effects of biologically and chemically synthesized copper oxide nanoparticles on mice. *International Journal of Nanomedicine, 15*: 3827-3842. https://doi.org/10.2147/IJN.S241922

El-Abd, N. M., Hamouda, R. A., Al-Shaikh, T. M., & Abdel-Hamid, M. S. (2022). Influence of biosynthesized silver nanoparticles using red alga Corallina elongata on broiler chicks' performance. *Green Processing and Synthesis, 11*(1), 238-253. https://doi.org/10.1515/gps-2022-0025

El-Gogary, M. R., El-Khateeb, A. Y., & Megahed, A. M. (2019). Effect of physiological and chemical nano garlic supplementation on broiler chickens. *Plant Archives, 19*(1), 695-705.

El-Maaty, H. A. A., El-Khateeb, A. Y., Al-Khalaifah, H., Hamed, E. S. A. E., Hamed, S., El-Said, E. A., Mahrose, K. M., Metwally K., & Mansour, A. M. (2021). Effects of ecofriendly synthesized calcium nanoparticles with biocompatible Sargassum latifolium algae extract supplementation on egg quality and scanning electron microscopy images of the eggshell of aged laying hens. *Poultry Science, 100*(2), 675-684. https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.10.043

Eltaweil, A. S., Fawzy, M., Hosny, M., Abd El-Monaem, E. M., Tamer, T. M., & Omer, A. M. (2022). Green synthesis of platinum nanoparticles using Atriplex halimus leaves for potential antimicrobial, antioxidant, and catalytic applications. *Arabian Journal of Chemistry, 15*(1), 103517. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103517

Essghaier, B., Hannachi, H., Nouir, R., Mottola, F., & Rocco, L. (2023). Green Synthesis and Characterization of Novel Silver Nanoparticles Using Achillea maritima subsp. maritima Aqueous Extract: Antioxidant and Antidiabetic Potential and Effect on Virulence Mechanisms of Bacterial and Fungal Pathogens. *Nanomaterials, 13*(13), 1964. https://doi.org/10.3390/nano13131964

Ezealisiji, K. M., Siwe-Noundou, X., Maduelosi, B., Nwachukwu, N., & Krause, R. W. M. (2019). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Solanum torvum (L) leaf extract and evaluation of the toxicological profile of the ZnO nanoparticles–hydrogel composite in Wistar albino rats. *International Nano Letters, 9*, 99-107. https://doi.org/10.1007/s40089-018-0263-1

Faisal, S., Jan, H., Shah, S. A., Shah, S., Khan, A., Akbar, M. T., Rizwan, M., Jan, F., Akhtar, N., Khattak, A., & Syed, S. (2021). Green synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles using aqueous fruit extracts of Myristica fragrans: their characterizations and biological and environmental applications. *ACS Omega, 6*(14), 9709-9722. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00310

Fatholahi, A., Khalaji, S., Hosseini, F., & Abbasi, M. (2021). Nano-Bio zinc synthesized by Bacillus subtilis modulates broiler performance, intestinal morphology and expression of tight junction's proteins. *Livestock Science, 251*, 104660. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104660

Fouda, A., Eid, A. M., Guibal, E., Hamza, M. F., Hassan, S. E. D., Alkhalifah, D. H. M., & El-Hossary, D. (2022). Green Synthesis of Gold Nanoparticles by Aqueous Extract of Zingiber officinale: Characterization and Insight into Antimicrobial, Antioxidant, and In Vitro Cytotoxic Activities. *Applied Sciences, 12*(24), 12879. https://doi.org/10.3390/app122412879

Fouda, M. M., Dosoky, W. M., Radwan, N. S., Abdelsalam, N. R., Taha, A. E., & Khafaga, A. F. (2021). Oral administration of silver nanoparticles–adorned starch as a growth promotor in poultry: Immunological and histopathological study. *International Journal of Biological Macromolecules, 187*, 830-839. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.157

Freeland-Graves, J. H., Sanjeevi, N., & Lee, J. J. (2015). Global perspectives on trace element requirements. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 31, 135-141. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.04.006

Gallocchio, F., Biancotto, G., Cibin, V., Losasso, C., Belluco, S., Peters, R., Bemmel, G., Cascio, C., Weigel, S., Tromp, P., Gobbo, F., Catania, S., & Ricci, A. (2017). Transfer study of silver nanoparticles in poultry production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 65*(18), 3767-3774. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00670

Gedikli, H. (2022). *Türk siyah ve yeşil çayı ekstraklarının ve bu ekstraklardan yeşil sentez yoluyla üretilen demir nano parçacıklarının bazı gıdalarda aflatoksinlerin azaltılması üzerine bir araştırma.* [Yüksek Lisans Tezi. Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Guleria, A., Sachdeva, H., Saini, K., Gupta, K., & Mathur, J. (2022). Recent trends and advancements in synthesis and applications of plant-based green metal nanoparticles: a critical review. *Applied Organometallic Chemistry, 36*(9), e6778. https://doi.org/10.1002/aoc.6778

Güven, G., & Sızmaz, Ö. (2020). Çevre için yeşil sentez, yeşil sentez için broyler beslemede kullanılan alg. *Türkiye Klinikleri Veteriner Bilimleri Dergisi, 11*(1), 30-37. https://doi.org/10.5336/vetsci.2019-71493

Hamed, H. S., & Abdel-Tawwab, M. (2021). Dietary pomegranate (Punica granatum) peel mitigated the adverse effects of silver nanoparticles on the performance, haemato-biochemical, antioxidant, and immune responses of Nile tilapia fingerlings. *Aquaculture, 540*, 736742. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736742

Hassan, E. A., Ramadan, H. K., Ismael, A. A., Mohamed, K. F., El-Attar, M. M., & Alhelali, I. (2017). Noninvasive biomarkers as surrogate predictors of clinical and endoscopic remission after infliximab induction in patients with refractory ulcerative colitis. *Saudi journal of gastroenterology: official journal of the Saudi Gastroenterology Association, 23*(4), 238. https://doi.org/10.4103/sjg.SJG_599_16

Hassan, S. A., Mujahid, H., Ali, M. M., Irshad, S., Naseer, R., Saeed, S., Firyal, S., & Arooj, F. (2021). Synthesis, characterization and protective effect of green tea-mediated zinc oxide nanoparticles against ochratoxin A induced hepatotoxicity and nephrotoxicity in albino rats. *Applied Nanoscience, 11*(8), 2281-2289. https://doi.org/10.1007/s13204-021-02006-z

Hassan, S., Sharif, M., Mirza, M. A., & Rehman, M. S. U. (2023). Effect of Dietary Supplementation of Zinc Nanoparticles Prepared by Different Green Methods on Egg Production, Egg Quality, Bone Mineralization, and Antioxidant Capacity in Caged Layers. *Biological Trace Element Research*, 1-11. https://doi.org/10.1007/s12011-023-03640-0

Hatab, M. H., Rashad, E., Saleh, H. M., El-Sayed, E. S. R., & Taleb, A. A. (2022). Effects of dietary supplementation of myco-fabricated zinc oxide nanoparticles on performance, histological changes, and tissues Zn concentration in broiler chicks. *Scientific Reports, 12*(1), 18791. https://doi.org/10.1038/s41598-022-22836-3

Hidayat, C., Sumiati, S., Jayanegara, A., & Wina, E. (2021b). Supplementation of dietary nano Zn-phytogenic on performance, antioxidant activity, and population of intestinal pathogenic bacteria in broiler chickens. *Tropical Animal Science Journal, 44*(1), 90-99. https://doi.org/10.5398/tasj.2021.44.1.90

Hidayat, C., Wina, E., & Jayanegara, A. (2021a). *Characteristics of Nano Zn-Fitogenik (NZF) made by green synthesis process using guava leaves (Psidium guajava) for feed additives.* In *IOP* Conference Series: Earth and Environmental Science (2021, November) (Vol. 888, No. 1, p. 012056). IOP Publishing.

Ibrahim, A. T. A. (2020). Toxicological impact of green synthesized silver nanoparticles and protective role of different selenium type on Oreochromis niloticus: hematological and biochemical response. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 61*, 126507. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126507

Jeyaraj, M., Gurunathan, S., Qasim, M., Kang, M. H., & Kim, J. H. (2019). A comprehensive review on the synthesis, characterization, and biomedical application of platinum nanoparticles. *Nanomaterials, 9*(12), 1719. https://doi.org/10.3390/NANO912171

Kanchana, P., Hemapriya, V., Arunadevi, N., Sundari, S. S., Chung, I. M., & Prabakaran, M. (2022). Phytofabrication of silver nanoparticles from Limonia acidissima leaf extract and their antimicrobial, antioxidant and its anticancer prophecy. *Journal of the Indian Chemical Society, 99*(10), 100679. https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100679

Kaya, H. A., & Macit, M., (2018). The effects of boron (orthoboric acid) supplementation into diets of laying hens on egg shell quality and tibia biomechanic parameters and serum, shell and tibia mineral concentrations during late laying period. *Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi, 13*(1), 42-53. https://doi.org/10.17094/ataunivbd.315617

Khan, A., Afzal, M., Rasool, K., Ameen, M., & Qureshi, N. A. (2023). In-vivo anticoccidial efficacy of green synthesized iron-oxide nanoparticles using Ficus racemosa Linn leaf extract.(Moraceae) against Emeria tenella infection in broiler chicks. *Veterinary Parasitology, 321*, 110003. https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2023.110003

Khan, S. A. (2020). Metal nanoparticles toxicity: role of physicochemical aspects. *In Metal nanoparticles for drug delivery and diagnostic applications* (pp. 1-11). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816960-5.00001-X

Khodeer, D. M., Nasr, A. M., Swidan, S. A., Shabayek, S., Khinkar, R. M., Aldurdunji, M. M., Ramadan, M. A., & Badr, J. M. (2023). Characterization, antibacterial, antioxidant, antidiabetic, and anti-inflammatory activities of green synthesized silver nanoparticles using Phragmanthera austroarabica AG Mill and JA Nyberg extract. *Frontiers in Microbiology, 13*, 1078061. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1078061

Kocabas, B. B., Attar, A., Yuka, S. A., & Yapaoz, M. A. (2023). Biogenic synthesis, molecular docking, biomedical and environmental applications of multifunctional CuO nanoparticles mediated Phragmites australis. *Bioorganic Chemistry, 133*, 106414. https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2023.106414

Koçer, A. T. (2023). *Alglerden yeşil sentez ile metalik nanopartiküllerin üretim optimizasyonu ve bu nanopartiküllerin antibakteriyal etkinliklerinin incelenmesi.* [Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Kurian, A., & Elumalai, P. (2021). Study on the impacts of chemical and green synthesized (Leucas aspera and oxy-cyclodextrin complex) dietary zinc oxide nanoparticles in Nile tilapia (Oreochromis niloticus). *Environmental Science and Pollution Research, 28*, 20344-20361. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11992-6

Lail, N. U., Sattar, A., Omer, M. O., Hafeez, M. A., Khalid, A. R., Mahmood, S., Shabbir, M. A., Ahmed, W., Aleem, M. T., Alouffi, A., & Almutairi, M. M. (2023). Biosynthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using Nigella sativa against coccidiosis in commercial poultry. *Scientific Reports, 13*(1), 6568. https://doi.org/10.1038/s41598-023-33416-4

Lee, K. D., Kuppusamy, P., Kim, D. H., Govindan, N., Maniam, G. P., & Choi, K. C. (2018). Forage crop Lolium multiflorum assisted synthesis of AgNPs and their bioactivities against poultry pathogenic bacteria in in vitro. *Indian Journal of Microbiology, 58*, 507-514. https://doi.org/10.1007/s12088-018-0755-8

Linima, V. K., Ragunathan, R., & Johney, J. (2023). Biogenic synthesis of RICINUS COMMUNIS mediated iron and silver nanoparticles and its antibacterial and antifungal activity. *Heliyon, 9*(2023), e15743. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15743

Mahmoud H, E. D., Ijiri, D., Ebeid, T. A., & Ohtsuka, A. (2016). Effects of dietary nano-selenium supplementation on growth performance, antioxidative status, and immunity in broiler chickens under thermoneutral and high ambient temperature conditions. *The Journal of Poultry Science, 53*(4), 274-283. https://doi.org/10.2141/jpsa.0150133

Manivannan, R., Kumar, G. S., Kamalakannan, D., Deventhiran, V. H., Rajsekar, P. R., Senthilkumar, V., & Shivaganesh, M. (2023). Green synthesis of Tecoma stans leaves-mediated copper oxide nanoparticles: Preparation, antioxidant, antimicrobial activities and in vitro MTT assay against MG-63 cell line. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 12*(3), 195-201.

Mansour, W. A., Abdelsalam, N. R., Tanekhy, M., Khaled, A. A., & Mansour, A. T. (2021). Toxicity, inflammatory and antioxidant genes expression, and physiological changes of green synthesis silver nanoparticles on Nile tilapia (Oreochromis niloticus) fingerlings. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 247*, 109068. https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2021.109068

Marappan, G., Beulah, P., Kumar, R. D., Muthuvel, S., & Govindasamy, P. (2017). Role of nanoparticles in animal and poultry nutrition: modes of action and applications in formulating feed additives and food processing. *International Journal of Pharmacology, 13*(7), 724-731. https://doi.org/10.3923/ijp.2017.724.731

Martínez-Cabanas, M., López-García, M., Barriada, J. L., Herrero, R., & de Vicente, M. E. S. (2016). Green synthesis of iron oxide nanoparticles. Development of magnetic hybrid materials for efficient As (V) removal. *Chemical Engineering Journal, 301*, 83-91. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.149

MuthuKathija, M., Badhusha, M. S. M., & Rama, V. (2023). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Pisonia Alba leaf extract and its antibacterial activity. *Applied Surface Science Advances, 15*, 100400. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100400

Nagajyothi, P. C., Prabhakar Vattikuti, S. V., Devarayapalli, K. C., Yoo, K., Shim, J., & Sreekanth, T. V. M. (2020). Green synthesis: Photocatalytic degradation of textile dyes using metal and metal oxide nanoparticles-latest trends and advancements. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 50*(24), 2617-2723. https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1705103

Naz, S., Nasir, B., Ali, H., & Zia, M. (2021). Comparative toxicity of green and chemically synthesized CuO NPs during pregnancy and lactation in rats and offspring: Part I-hepatotoxicity. *Chemosphere, 266*, 128945. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128945

Nguyen, T. T. T., Nguyen, Y. N. N., Tran, X. T., Nguyen, T. T. T., & Van Tran, T. (2023). Green synthesis of CuO, ZnO and CuO/ZnO nanoparticles using Annona glabra leaf extract for antioxidant, antibacterial and photocatalytic activities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 111003. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111003

Qiao, L., Dou, X., Song, X., & Xu, C. (2022). Green synthesis of nanoparticles by probiotics and their application. *Advances in Applied Microbiology, 119*, 83-128. https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2022.05.003

Rajan, M. R., Mangalaraj, M. D., & Dhandapani, S. (2021). Impact of different quantity of green synthesized iron oxide nanoparticles on growth, enzymatic, biochemical changes and hematology of zebrafish Danio rerio. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Nanotechnology (IJPSN), 14*(5), 5603-5611. https://doi.org/10.37285/ijpsn.2021.14.5.4

Raje, K., Garg, A. K., Jadhav, S. E., Dutta, N., Ojha, B. K., & Mishra, A. (2018b). Effect of Different Levels and Sources of Supplemental Nano Zinc on Blood-Biochemical Profile and Serum Mineral Status in Wistar Rats (Rattus norvegicus). *Journal of Animal Research, 8*(4), 643-649. https://doi.org/10.30954/2277-940X.08.2018.15

Raje, K., Ojha, S., Mishra, A., Munde, V. K., Rawat, C., & Chaudhary, S. K. (2018a). Impact of supplementation of mineral nano particles on growth performance and health status of animals: a review. *Journal of Entomology and zoology studies, 6*(3), 1690-1694.

Ravichandran, R. (2010). Nanotechnology applications in food and food processing: innovative green approaches, opportunities and uncertainties for global market. *International Journal of Green Nanotechnology: Physics and Chemistry, 1*(2), P72-P96. https://doi.org/10.1080/19430871003684440

Reda, F. M., El-Saadony, M. T., El-Rayes, T. K., Attia, A. I., El-Sayed, S. A., Ahmed, S. Y., Madkour, M., & Alagawany, M., 2021. Use of biological nano zinc as a feed additive in quail nutrition: biosynthesis, antimicrobial activity and its effect on growth, feed utilisation, blood metabolites and intestinal microbiota. *Italian Journal of Animal Science, 20*(1), 324-335. https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.1886001

Roy, A., Singh, V., Sharma, S., Ali, D., Azad, A. K., Kumar, G., & Emran, T. B. (2022). Antibacterial and dye degradation activity of green synthesized iron nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 1-6. https://doi.org/10.1155/2022/3636481

Salem, N. M., & Awwad, A. M. (2022). Green synthesis and characterization of ZnO nanoparticles using Solanum rantonnetii leaves aqueous extract and antifungal activity evaluation. *Chemistry International, 8*(1), 12-17.

Salmani, M. H., Abedi, M., Mozaffari, S. A., Mahvi, A. H., Sheibani, A., & Jalili, M. (2021). Simultaneous reduction and adsorption of arsenite anions by green synthesis of iron nanoparticles using pomegranate peel extract. *Journal of Environmental Health Science and Engineering, 19*(1), 603–612. https://doi.org/10.1007/S40201-021-00631-Y

Satgurunathan, T., Bhavan, P. S., & Joy, R. D. S. (2019). Green synthesis of chromium nanoparticles and their effects on the growth of the prawn Macrobrachium rosenbergii post-larvae. *Biological Trace Element Research, 187*, 543-552. https://doi.org/10.1007/s12011-018-1407-x

Satgurunathan, T., Bhavan, P. S., Kalpana, R., Jayakumar, T., Sheu, J. R., & Manjunath, M. (2023). Influence of garlic (Allium sativum) clove-based selenium nanoparticles on status of nutritional, biochemical, enzymological, and gene expressions in the freshwater prawn Macrobrachium rosenbergii (De Man, 1879). *Biological Trace Element Research, 201*(4), 2036-2057. https://doi.org/10.1007/s12011-022-03300-9

Sazak, C. (2023). *Yeşil sentez ile bakır oksit nanopartiküllerinin sentezi.* [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Sehgal, N., Naresh, G., & Kumari, A. (2023). Latest developments and applications of nanotechnology in agriculture sector: A review. *Agricultural Reviews. 44*(3): 275- 288. https://doi.org/10.18805/ag.R-2175

Sheiha, A. M., Abdelnour, S. A., Abd El-Hack, M. E., Khafaga, A. F., Metwally, K. A., Ajarem, J. S., Maodaa, S. N., Allam, A. A., & El-Saadony, M. T., (2020). Effects of dietary biological or chemical-synthesized nano-selenium supplementation on growing rabbits exposed to thermal stress. *Animals, 10*(3), 430. https://doi.org/10.3390/ani10030430

Shobana, C., Rangasamy, B., Poopal, R. K., Renuka, S., & Ramesh, M. (2018). Green synthesis of silver nanoparticles using Piper nigrum: tissue-specific bioaccumulation, histopathology, and oxidative stress responses in Indian major carp Labeo rohita. *Environmental Science and Pollution Research, 25*, 11812-11832. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1454-z

Şahin, A. (2023). Kiraz sapı ekstresi ile yeşil sentez yöntemi kullanılarak demiroksit nanopartiküllerin eldesi. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Tahir, K., Nazir, S., Ahmad, A., Li, B., Khan, A. U., Khan, Z. U. H., Khan, F. U., Khan, Q. U., Khan, A., & Rahman, A. U., 2017. Facile and green synthesis of phytochemicals capped platinum nanoparticles and in vitro their superior antibacterial activity. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *166*(1), 246-251. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.12.016

Thangapandiyan, S., & Monika, S. (2020). Green synthesized zinc oxide nanoparticles as feed additives to improve growth, biochemical, and hematological parameters in freshwater fish Labeo rohita. *Biological Trace Element Research, 195*, 636-647. https://doi.org/10.1007/s12011-019-01873-6

Wang, G., Liu, L., Wang, Z., Pei, X., Tao, W., Xiao, Z., Liu, B., Wang, M., Lin, G., & Ao, T. (2019). Comparison of inorganic and organically bound trace minerals on tissue mineral deposition and fecal excretion in broiler breeders. *Biological Trace Element Research, 189*, 224-232. https://doi.org/10.1007/s12011-018-1460-5

Yazdani, Z., Mehrgan, M. S., Khayatzadeh, J., Shekarabi, S. P. H., & Tabrizi, M. H. (2023). Dietary green-synthesized curcumin-mediated zinc oxide nanoparticles promote growth performance, haemato-biochemical profile, antioxidant status, immunity, and carcass quality in Nile tilapia (Oreochromis niloticus). *Aquaculture Reports, 32*, 101717. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101717

Yusof, H. M., Abdul Rahman, N. A., Mohamad, R., Zaidan, U. H., & Samsudin, A. A. (2023). Influence of Dietary Biosynthesized Zinc Oxide Nanoparticles on Broiler Zinc Uptake, Bone Quality, and Antioxidative Status. *Animals, 13*(115), 2-18. https://doi.org/10.3390/ani13010115

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(1): 321-330 doi: 10.17714/gumusfenbil.1591767 Derleme Makalesi / Review Article

Biyoetanol üretiminde mikroalglerin rolü

The role of microalgae in bioethanol production

Yasemin AKDAĞ*[1], Hüseyin GÜVEN[2], Mustafa Evren ERŞAHİN[3,4], Hale ÖZGÜN[5,6]

[1,2,3,5] *İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye*

[4,6] *MEM-TEK Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye*

• Geliş tarihi / *Received*: 26.11.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 06.02.2025

Öz

Mikroalgler, yüksek büyüme hızları ve karbondioksit tüketme kapasiteleri sayesinde sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Mikroalgler, çevresel faktörlere karşı gösterdikleri üstün adaptasyon yetenekleriyle, biyokütle üretimini hızla artırabilmekte ve atmosferdeki karbondioksiti etkili bir şekilde emerek sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Mikroalgler biyoetanol üretimi için ideal bir hammadde olarak değerlendirilebilmekte ve yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, mikroalglerden elde edilen biyoetanol, enerji üretiminde sürdürülebilir bir çözüm sunmanın yanı sıra fosil yakıt bağımlılığını azaltma potansiyeline de sahiptir. Bu makalenin amacı, mikroalglerin biyoetanol üretimindeki rolünü incelemektir. Bu çerçevede, mikroalg yetiştirilmesinde kullanılan yöntemler, biyokütle hasat süreçleri ve biyokütlenin biyoetanol üretiminde değerlendirilmesine yönelik teknikler değerlendirilmiştir. Ayrıca, mikroalglerin yenilenebilir enerji üretimindeki avantajların yanı sıra, bu süreçte karşılaşılan zorluklar ve geleceğe dair perspektifler de irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Biyoetanol, Biyokütle, Mikroalg, Sürdürülebilirlik, Yenilenebilir enerji

Abstract

Microalgae are emerging as a significant resource for sustainable energy production due to their rapid growth rates and high carbon dioxide absorption capabilities. Their remarkable adaptability to environmental conditions allows microalgae to rapidly increase biomass production while effectively absorbing carbon dioxide from the atmosphere, thus contributing to the reduction of greenhouse gas emissions. As an ideal raw material for bioethanol production, microalgae play a pivotal role in advancing renewable energy goals. Bioethanol derived from microalgae not only offers a sustainable solution for energy generation but also has the potential to reduce dependence on fossil fuels. The purpose of this paper is to explore the role of microalgae in bioethanol production. Within this framework, the methods used for cultivating microalgae, the processes involved in biomass harvesting and the techniques for converting this biomass into bioethanol have been assessed. Additionally, the paper discusses the advantages of using microalgae for renewable energy production, the challenges encountered in the process, and future prospects for this promising field.

Keywords*: Bioethanol, Biomass, Microalgae, Sustainability, Renewable energy*

*Yasemin AKDAĞ; akdagy@itu.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Enerjiye olan küresel talep; nüfus artışı, endüstrileşme ve kentleşmenin hızla artması gibi çeşitli faktörler nedeniyle hızla yükselmektedir. Artan küresel enerji talebi ve fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması, geleneksel enerji kaynaklarına bağımlı olmanın sürdürülebilirliği konusundaki endişeleri artırırken, sürdürülebilir enerji çözümlerine geçiş yapma gereksinimini giderek daha belirgin hale getirmektedir (Chia vd., 2018). Sanayi devrimi sırasında ekonomik büyümenin temeli olan fosil yakıtlar, günümüzde çevresel etkileri ve sınırlı rezervleri nedeniyle büyük bir endişe kaynağı haline gelmiştir. Fosil yakıt kullanımının sera gazı emisyonlarını arttırması ve iklim değişikliği gibi küresel sorunlara yol açması bu endişeleri pekiştirmektedir (Kabir vd., 2020). Bu sorunları önlemek amaçlı yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve ihtiyaç giderek artmaktadır. Güneş, rüzgar ve hidroelektrik enerji gibi yenilenebilir kaynaklar, çevresel etkileri azaltma ve enerji güvenliğini arttırma potansiyeline sahip olurken, biyoyakıtlar gibi yenilikçi seçenekler de sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynayabilir (Chia vd., 2018).

Biyoyakıtlar, organik materyallerden üretilen ve fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltmayı amaçlayan enerji kaynaklarıdır (Cherwoo vd., 2023). Biyoyakıtlar, fosil yakıtların çevresel ve ekonomik dezavantajlarına karşı sürdürülebilir bir alternatif sunarak enerji sektöründe önemli bir rol oynamaktadır. Fosil yakıtlar, sera gazı emisyonlarını arttırarak iklim değişikliğine katkıda bulunurken; biyoyakıtlar, yenilenebilir organik kaynaklardan elde edildikleri için daha düşük karbon salınımına sahiptir. Biyoyakıtların biyodizel, biyogaz ve biyoalkol olmak üzere temelde üç ana türü vardır (Cherwoo vd., 2023).

Biyoalkoller, özellikle etanol ve bütanol, şekerli veya nişastalı bitkilerden fermantasyon yoluyla üretilerek sıvı yakıt olarak kullanılabilen önemli yenilenebilir enerji kaynaklarıdır (Milano vd., 2016). Biyoetanol, özellikle ulaşım sektöründe benzin yerine alternatif bir yakıt olarak kullanılabilir ve genellikle yakıt performansını arttırmak ve sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla benzinle karıştırılır (Milano vd., 2016). Biyoetanol üretiminde üç ana nesil bulunmaktadır. Birinci nesil biyoetanol, şeker kamışı, mısır ve buğday gibi nişastalı veya şekerli gıda ürünlerinden üretilirken, bu hammaddelerin enerji üretiminde kullanılması gıda güvenliği sorunlarına yol açabilir ve tarım ürünlerinin ücretlerini etkileyebilir (Carneiro vd., 2017). İkinci nesil biyoetanol, gıda üretimiyle doğrudan rekabet etmeyen lignoselülozik biyokütlelerden, yani bitkisel ve endüstriyel atıklardan elde edilerek daha sürdürülebilir bir kaynak sağlar ve atık yönetimini iyileştirir; ancak üretim süreçleri genellikle daha karmaşık ve maliyetlidir (Cherwoo vd., 2023). Üçüncü nesil biyoetanol ise yüksek karbonhidrat içeriği ve hızlı büyüme kapasitelerine sahip olan mikroalglerden üretilir; bu özellikleri sayesinde yüksek verim elde edilir ve gıda üretimiyle rekabet etmez (Cherwoo vd., 2023).

Mikroalgler, biyoetanol üretimi için büyük bir potansiyele sahip olup, çeşitli avantajlar sunmaktadır. Yüksek karbonhidrat içeriği biyodizel için önemli olduğundan ve hızlı büyüme kapasiteleri sayesinde mikroalgler, yüksek verimli biyoetanol üretimi için ideal bir seçenek oluşturur (Milano vd., 2016). Bu hızlı büyüme özelliği, kısa sürede büyük miktarda biyokütle üretme imkanı sağlayarak üretim sürecini daha verimli hale getirir. Ayrıca, mikroalgler tatlı su, tuzlu su veya atıksu gibi farklı ortamlarda çoğalabilmeleri sayesinde geniş bir spektrumda yetiştirilebilir; bu da biyoyakıt üretimini daha sürdürülebilir hale getirir (Mehariya vd., 2021). Arazi kullanımı açısından, mikroalgler geleneksel tarım arazilerine ihtiyaç duymadan büyük miktarda biyokütle üretebilme kapasitesine sahiptir; böylece arazi kullanımında verimliliği arttırarak gıda üretimi ile rekabet etmeyen bir kaynak sağlar (Carneiro vd., 2017).

Bu çalışmanın amacı, biyoetanol üretiminde mikroalglerin rolünü incelemektir. Çalışma kapsamında, mikroalglerin üretimi ve hasat edilmesinde kullanılan yöntemler, elde edilen biyokütlenin ön işleme ve yağ ekstraksiyonu yöntemleri, mikroalglerden biyoetanol üretim yöntemleri ve bu süreçte karşılaşılan zorluklar ele alınacaktır.

2. Mikroalgerden biyoetanol üretimi
2. Bioethanol production from microalgae

Mikroalgler, sucul ekosistemlerde yaygın olarak bulunan ve fotosentetik süreçlerle enerji üreten tek hücreli organizmalardır (Mehariya vd., 2021). Klorofil pigmentleri sayesinde ışık enerjisini kullanarak karbondioksiti oksijene dönüştürme yeteneğine sahiptirler. Yüksek büyüme hızları, mikroalgleri biyokütle üretimi açısından cazip bir kaynak haline getirir. Hızla büyüme ve karbon depolama potansiyelleri sayesinde önemli miktarda

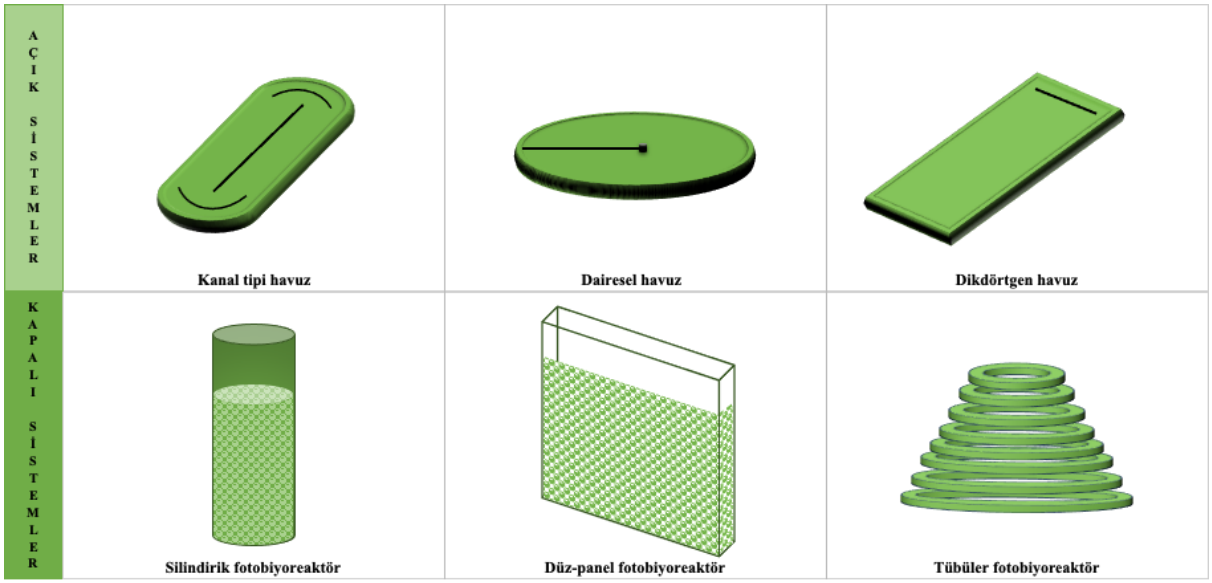
karbondioksiti biyokütleye dönüştürerek karbon emisyonlarını azaltır ve iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir rol oynarlar (Milano vd., 2016). Ayrıca, alan kullanımı açısından sundukları avantajlarla da dikkat çekerler. Geleneksel tarımsal ürünlerin aksine, mikroalgler sınırlı su kaynakları ve tarım arazileri gerektirmeden tuzlu su veya atıksu gibi dezavantajlı ortamlarda yetiştirilebilir (Carneiro vd., 2017). Bu özellikleri; su kıtlığı ve tarım arazisi eksikliği çeken bölgeler için büyük bir avantaj sunar. Besin içeriği bakımından zengin olan mikroalgler, yüksek protein, lipit, vitamin ve mineral değerleriyle dikkat çekmektedir (Milano vd., 2016).

2.1. Mikroalg üretimi
2.1. Microalgae cultivation

Mikroalgler, fotosentetik aktivitelerini destekleyerek biyokütle üretimini artıran azot, fosfor ve çeşitli mikro besin elementleri gibi temel besin maddelerine ihtiyaç duyarlar. Farklı mikroalg türleri, farklı besin gereksinimlerine sahip olduğundan, uygun besin ortamının belirlenmesi mikroalg yetiştiriciliğinde büyük önem taşımaktadır (Tao vd., 2022). Mikroalgler, fotootrofik, heterotrofik ve miksotrofik koşullar gibi farklı ortamlarda yetiştirilebilir. Fotootrofik yetiştirme yönteminde, mikroalgler enerji kaynağı olarak güneş ışığını ve karbondioksit formundaki inorganik karbonu kullanarak biyokütle üretirler (Alam vd., 2022). Heterotrofik yetiştirmede ise mikroalgler, ışık olmadan glikoz veya melas gibi organik karbon kaynaklarını kullanmaktadır (Alam vd., 2022). Miksotrofik yetiştirme, mikroalglerin organik ve inorganik karbon kaynaklarını kullanarak büyümesini sağlayan, fotootrofik ve heterotrofik metabolizma yollarını entegre eden bir yöntemdir; bu sayede çevresel koşullara uyum sağlamaları ve biyokütle verimliliğini arttırmaları mümkün olur (Abdelfettah vd., 2022). Mikroalglerin yetiştirilmesinde besi yerinin seçimi kadar kullanılacak sistemin seçimi de büyük öneme sahiptir. Mikroalgler, açık havuzlar ve kapalı fotobiyoreaktörler olmak üzere iki ana sistem türü aracılığıyla yetiştirilebilir (Tao vd., 2022). Mikroalg yetiştirilmesinde kullanılan açık ve kapalı sistemlere örnekler Şekil 1'de yer almaktadır.

Açık havuzlar, mikroalglerin yetiştirilmesi için tasarlanmış düz yüzeyli ve sığ derinliklere sahip yapılardır. Bu sistemler, mikroalglerin büyümesinde doğrudan çevresel koşullardan faydalanma imkanı sundukları için işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Tao vd., 2022). Güneş enerjisinin entegrasyonu, üretim süreçlerinin çevresel sürdürülebilirliğine katkıda bulunurken, fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasını teşvik etmektedir. Açık sistemlerin bir diğer önemli avantajı, mikroalglerin çevresel değişimlere daha hızlı uyum sağlama yeteneğidir. Bu sistemler, doğal ekosistemlerin bir parçası olarak işlev gördüğünden, mikroalgler sürekli değişen besin maddeleri ve ışık kaynaklarına etkili bir şekilde yanıt verebilmektedir (Paul vd., 2021). Ayrıca, açık havuzlar, büyük ölçekli biyokütle üretimi için uygun bir ortam sunarak mikroalglerin yaygın kullanılabilirliğini arttırmaktadır. Bununla birlikte; açık sistemlerin bazı dezavantajları da mevcuttur. Hava koşulları, kirleticiler ve diğer mikroorganizmalar gibi dış etkenler, mikroalglerin büyümesini olumsuz yönde etkileyebilir ve verimliliği azaltabilir (Xiaogang vd., 2022).

Kapalı fotobiyoreaktörler, mikroalglerin büyümesi için optimize edilmiş koşullar oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır (Tao vd., 2022). Mikroalglerin kapalı sistemler kullanılarak yetiştirilmesi, kontrol edilebilir bir ortam sağlama imkanı sunarak üretim süreçleri açısından önemli avantajlar sağlar (Paul vd., 2021). Kapalı fotobiyoreaktörlerin düz, boru tipi ve silindirik fotobiyoreaktörler olmak üzere farklı tipleri bulunmaktadır (Tao vd., 2022). Düz fotobiyoreaktörler, yüzey alanını arttırarak güneş ışığını etkin bir şekilde kullanmalarını sağlarken, boru tipi fotobiyoreaktörler akışın daha homojen dağılımını ve karışımın daha kolay olmasını sağlar. Silindirik reaktörler ise genellikle daha az yer kaplayarak dikey büyüme alanı sunar (Tao vd., 2022). Kapalı sistemlerin en büyük avantajı, dış etkenlere karşı koruma sağlamasıdır. Böylece kontaminasyon riskini azaltarak ürün kalitesini artırır (Paul vd., 2021). Ayrıca, ışık, sıcaklık ve besin maddeleri gibi büyüme koşulları üzerinde kontrol imkanı sağlar. Bununla birlikte; kapalı sistemlerin dezavantajları arasında yüksek maliyetli olması ve yüksek enerji tüketimi yer almaktadır (Xiaogang vd., 2022).



Şekil 1. Açık ve kapalı sistemlere örnekler
Figure 1. *Examples for open and closed systems*

2.2. Hasat yöntemleri
2.2. Harvesting methods

Mikroalg biyokütlesinin hasadı, bu organizmaların ekonomik değerinin arttırılması ve kullanılabilir hale getirilmesi açısından kritik bir aşamadır. Mikroalglerin biyoteknolojik uygulamalardaki rolü göz önüne alındığında, bu süreçler yalnızca verimlilik açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği açısından da büyük önem taşımaktadır (Liu vd., 2023). Hasat süreçleri; mikroalg türüne, yetiştirme sistemine ve istenen nihai ürünün niteliğine bağlı olarak çeşitlilik gösterirken, bu durum farklı mikroalg türlerinin farklı büyüme koşullarına ve fiziksel özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Deepa vd., 2023). Mikroalglerin etkin bir şekilde hasat edilmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, mikroalglerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine uygun olarak seçilmelidir. Yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında filtrasyon, santrifüj, koagülasyon ve flokülasyon, yüzdürme ve elektrokoagülasyon-flokülasyon yer almaktadır (de Morais vd., 2023). Mikroalg hasadında kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin avantajları ile dezavantajları Tablo 1'de özetlenmektedir.

Filtrasyon, mikroalg hücrelerinin belirli gözenek boyutlarına (0.1-1 µm) sahip filtreler kullanılarak ayrılmasını sağlayan bir yöntemdir (Liu vd., 2023). Bu yöntem, özellikle düşük enerji gereksinimi ile yüksek verim sunma kapasitesi nedeniyle mikroalg hasadında yaygın olarak tercih edilmektedir (Udayan vd., 2022). Filtrasyon süreci, mikroalglerin büyüklüklerine ve morfolojilerine bağlı olarak optimize edilebilir. Böylece belirli mikroalg türlerinin etkin bir şekilde ayrılması sağlanır (Liu vd., 2023). Bu süreçte, filtre materyalinin özellikleri, gözenek boyutları ve akış hızı gibi faktörler, hasat verimliliğini etkileyen unsurlardır (de Morais vd., 2023).

Santrifüj ise, mikroalg hücrelerinin ayrılmasında kullanılan başka bir yöntemdir. Bu teknik, yüksek hızda dönen bir santrifüj cihazı aracılığıyla mikroalg hücrelerini yoğunluk farklarına göre hızlı ve etkili bir şekilde ayırır (de Morais vd., 2023). Santrifüj, mikroalg hücrelerinin hızlı bir şekilde yoğunlaştırılmasını sağlarken, büyük hacimlerde biyokütle elde etme potansiyelini artırır (Liu vd., 2023). Ancak, bu yöntem enerji tüketimi açısından diğer yöntemlere göre daha maliyetli olabilir; dolayısıyla, uygulanacak sistemin ekonomik sürdürülebilirliği açısından dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir (Udayan vd., 2022).

Koagülasyon ve flokülasyon ise, mikroalg hücrelerinin hasadında kimyasal maddelerin kullanıldığı bir diğer önemli süreçtir. Bu yöntemde, alüminyum sülfat ($Al_2(SO_4)_3$ veya demir klorür ($FeCl_3$) gibi koagülantların eklenmesi, mikroalg hücrelerinin birleşmesini ve daha büyük aglomeralar oluşturmasını sağlar (de Morais vd., 2023). Bu aglomeralar, yerçekimi etkisiyle kolayca çöker ve böylece biyokütlenin hasadı mümkün hale gelir. Koagülasyon ve flokülasyon süreçleri yüksek hasat verimliliği sağlamakla birlikte, kullanılan kimyasalların

ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır (Liu vd., 2023). Bu nedenle, bu yöntemlerin çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik açısından dikkatlice değerlendirilmesi önemlidir.
Yüzdürme, mikroalglerin hasadında kullanılan yenilikçi bir yöntemdir ve temel prensibi, mikroalg hücrelerinin su yüzeyinde toplanmasını sağlamaktır (Yin vd., 2020; Zhu vd., 2024). Bu yöntemde, mikroalglerin doğal olarak yüzeyde birikmesi için çeşitli yüzdürme ajanları kullanılır (Udayan vd., 2022). Yüzdürme işlemi, enerji tüketimini minimize ederken, düşük maliyetli bir hasat süreci sunar. Mikroalglerin yüzeyde yoğunlaşması, daha sonraki aşamalarda bu biyokütlenin toplanmasını kolaylaştırır. Ancak, yüzdürme süreci, çevresel faktörlere ve mikroalg türlerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir, bu nedenle uygun koşulların sağlanması önemlidir (de Morais vd., 2023).

Elektrokoagülasyon-flokülasyon, mikroalglerin hasadında kullanılan bir başka etkili yöntemdir. Bu teknik, elektrik akımının uygulanmasıyla mikroalg hücrelerinin koagülasyon-flokülasyonunu sağlayarak hücrelerin yüzey yüklerini nötralize eder, böylece daha büyük aglomeraların oluşmasına neden olur ve bu aglomeralar yerçekimi ile çökerek hasat edilmeyi kolaylaştırır (Pereira vd., 2024). Elektrokoagülasyon-flokülasyon, özellikle yüksek verimlilik sağlama potansiyeli ile öne çıkar, ancak enerji tüketimi ve sistem tasarımı açısından maliyetli olabilir (Udayan vd., 2022).

Tablo 1. Mikroalg hasadında kullanılan yöntemler (Udayan vd., 2022; de Morais vd., 2023; Liu vd., 2023; Pereira vd., 2024)
Table 1. *Methods used in microalgae harvesting* (Udayan et al., 2022; de Morais et al., 2023; Liu et al., 2023; Pereira et al., 2024)

Hasat Yöntemi	Avantajlar	Dezavantajlar
Filtrasyon	▪ Düşük enerji gereksinimi ▪ Yüksek verimlilik ▪ Basit ve etkili uygulama	▪ Büyük hacimlerde tıkanma sorunları ▪ Filtrelerin bakımı ve temizliği
Santrifüj	▪ Yoğunluk farklarına dayalı hızlı ve etkili hasat	▪ Yüksek enerji maliyetleri ▪ Ekipman maliyetleri ve bakım gereksinimleri
Koagülasyon ve flokülasyon	▪ Yüksek hasat verimi ▪ Düşük maliyet ve etkili	▪ Kimyasal ilavesi gereksinimi ▪ Kimyasal maddelerin kullanımının ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri ▪ Hasat sonucunda oluşan atıkların bertarafı
Yüzdürme	▪ Düşük maliyet ve enerji tüketimi ▪ Doğal süreçle biyokütle hasadı	▪ Çevresel faktörlere bağımlılık ▪ Yüzeyden mikroalg kaybı
Elektrokoagülasyon-flokülasyon	▪ Yüksek verimlilik ve hızlı hasat ▪ Daha az kimyasal kullanımı	▪ Yüksek enerji tüketimi ▪ Ekipman maliyetleri ve bakım gereksinimleri

2.3. Biyokütle ön işleme, yağ ve karbonhidrat ekstraksiyonu
2.3. Biomass pretreatment and lipid extrction

2.3.1. Biyokütle ön işleme
2.3.1. Biomass pretreatment

Biyokütle ön işleme, mikroalg hücrelerinin yapısını fiziksel veya kimyasal yöntemlerle değiştiren bir süreçtir ve biyoetanol üretimi için kritik öneme sahiptir. Bu işlem, hücre duvarlarının parçalanmasını sağlayarak içeriğin daha iyi erişilebilir hale gelmesini amaçlar. Mikroalglerden elde edilen biyokütlenin biyoetanol üretiminde kullanılmadan önce ısıl ve alkali ön işleme yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Velazquez-Lucio vd., 2018).

Biyokütlenin ısı ile ön işlemesi, mikroalglerin biyoetanol üretiminde kritik bir aşama olup, hücre yapılarının modifikasyonu yoluyla biyokütle verimliliğini arttırmayı amaçlar. Bu işlem, mikroalg hücrelerinin belirli bir sıcaklıkta ısıtılması ile gerçekleştirilir ve genellikle 60-180 °C arasında değişen sıcaklıklar tercih edilir (Velazquez-Lucio vd., 2018). Isı uygulaması, hücre duvarlarının zayıflamasını sağlayarak, içerdikleri polisakkaritlerin ve diğer biyomoleküllerin daha iyi çözünmesini mümkün kılar (Velazquez-Lucio vd., 2018). Bu durum, sonraki aşamalarda gerçekleştirilecek enzimatik hidroliz sürecinin verimliliğini arttırarak, glikoz ve diğer fermentasyona uygun şekerlerin daha hızlı ve etkin bir şekilde serbest kalmasına katkı sağlar (Velazquez-Lucio vd., 2018).

Biyokütlenin alkali ön işlemesi, mikroalglerden biyoetanol üretiminde verimliliği arttırmak amacıyla uygulanan önemli bir yöntemdir. Alkali ön işleme, genellikle sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit gibi alkali kimyasalların kullanılmasıyla gerçekleştirilir ve hücre duvarlarının çözülmesini teşvik eder (Velazquez-Lucio vd., 2018). Alkali ortam, mikroalg hücrelerinin yapısal bileşenlerini parçalayarak, içerdikleri polisakkaritlerin ve diğer karbonhidratların daha iyi çözünmesine olanak sağlar (Chauhan vd., 2023). Bu süreç, özellikle mikroalglerin lignoselülozik yapısının bulunduğu durumlarda, hücre duvarı katmanlarını zayıflatır ve fermentasyon için gerekli şekerlerin serbest kalmasını kolaylaştırır (Velazquez-Lucio vd., 2018).

2.3.2. Yağ ekstraksiyonu
2.3.2. Lipid extraction

Yağ ekstraksiyonu, mikroalglerden elde edilen lipitlerin ayrılması işlemini içerir ve biyoetanol üretimi için önemli bir ham madde sağlar. Lipit ekstraksiyonu genellikle çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir; bunlar arasında solvent ekstraksiyonu, mekanik presleme, süperkritik CO_2 ekstraksiyonu ve ultrasonik ekstraksiyon yer alır (Ezhumalai vd., 2024).

Solvent ekstraksiyonu, mikroalglerden lipitlerin ayrılması için kullanılan en yaygın ve etkili yöntemlerden birisidir. Bu işlem, organik solventlerin kullanılmasıyla gerçekleştirilir; genellikle heksan, etanol veya asetat gibi solventler tercih edilir (Razzak vd., 2022). Mikroalg hücreleri, seçilen solvent ile karıştırılarak, lipitlerin çözünmesi sağlanır (Agarwalla vd., 2023). Solventin mikroalglerle etkileşimi, lipitlerin hücre yapısından ayrılmasına olanak tanırken; bu süreç, yüksek yağ verimi ve yüksek kaliteli yağ elde edilmesi açısından avantaj sağlar.

Mekanik presleme, lipitlerin mikroalglerden çıkarılması için kullanılan fiziksel bir yöntemdir. Bu işlem, mikroalglerin mekanik bir pres ile sıkıştırılması yoluyla gerçekleştirilir ve yağın serbest bırakılması sağlanır (Razzak vd., 2022). Mekanik presleme, solvent kullanımını minimize ettiği için çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır; ancak, bu yöntemin verimliliği, kullanılan mikroalg türüne ve hücre yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Agarwalla vd., 2023). Yüksek yağ içeriğine sahip mikroalgler için mekanik presleme, düşük maliyet ve basit uygulama avantajı sunarken, yağ verimliliği genellikle solvent yöntemlerine göre daha düşüktür (Razzak vd., 2022).

Süperkritik CO_2 ekstraksiyonu, karbondioksitin süperkritik hale getirilmesi yoluyla gerçekleştirilir. Bu aşamada CO_2 gaz ve sıvı özelliklerini sergileyerek, lipitleri çözme yeteneğini arttırır (Lorenzen vd., 2017). Süperkritik CO_2, düşük sıcaklıkta işlem yapılmasına imkan sağlar ve böylece lipitlerin kalite kaybını önler (Razzak vd., 2022). Ayrıca, bu yöntem solvent kullanımını en aza indirerek, çevresel etkiyi azaltır ve elde edilen yağların saf olmasını sağlar.

Ultrasonik ekstraksiyon, yüksek frekanslı ses dalgaları kullanılarak mikroalglerden lipitlerin çıkarılmasını sağlayan bir yöntemdir (Razzak vd., 2022). Bu işlem, ultrasonik dalgaların mikroalg hücrelerine uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Bu dalgalar, hücre duvarlarını zayıflatarak yağların çözünmesine yardımcı olur (Razzak vd., 2022). Ultrasonik ekstraksiyon, kısa işlem süresi ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlar sunar. Bununla birlikte; ultrasonik ekstraksiyonun bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu yöntem, yüksek frekansların kullanımı nedeniyle ekipman maliyetlerini arttırabilir ve işlem sürecinin kontrol edilmemesi durumunda lipitlerin ısınarak kalite kaybına yol açabilir (de Boer vd., 2012).

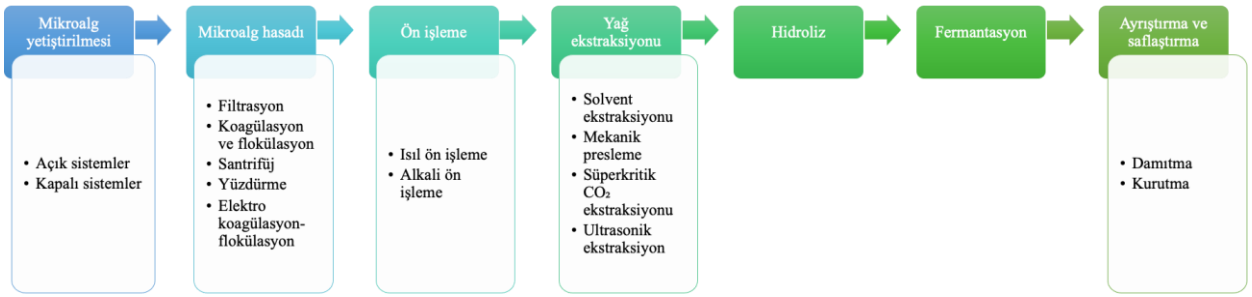
2.3.3. Karbonhidrat ekstraksiyonu
2.3.3. Carbohydrate extraction

Alglerin içerdiği karbonhidratlar, biyoetanol üretimi için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Mikroalg biyokütlesinde yer alan çözünür karbonhidratlar (glikoz, mannoz, galaktoz gibi monosakkaritler) ve polisakkaritler (örneğin nişasta), etanol fermantasyonu ile enerjiye dönüştürülebilir (Velazquez-Lucio vd., 2018). Karbonhidrat ekstraksiyonu genellikle termal, kimyasal veya enzimatik yöntemlerle gerçekleştirilir. Enzimatik ekstraksiyon, nişasta ve selüloz gibi polisakkaritlerin amilaz ve selülaz gibi enzimler kullanılarak şekerlere hidrolize edilmesini içerir (Kusmiyati vd., 2023). Düşük enerji gereksinimi ve çevre dostu özellikleri sayesinde enzimatik yöntemler daha fazla tercih edilmektedir.

Ekstraksiyon ve hidroliz işlemleri sonrasında ortaya çıkan monosakkaritler, Saccharomyces cerevisiae gibi maya suşları tarafından fermente edilerek biyoetanol üretiminde değerlendirilir (Velazquez-Lucio vd., 2018). Bu bütünleşik süreç, yalnızca biyoetanol üretiminin etkinliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda mikroalg biyokütlesinin sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlar. Böylece mikroalgler, biyoyakıt endüstrisinde geleneksel hammaddelere güçlü bir alternatif olarak öne çıkar ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine katkıda bulunur.

2.4. Biyoetanol üretimi
2.4. Bioethanol production

Biyoetanol üretimi, mikroalg biyokütlesinden fermentasyon süreçleriyle gerçekleştirilen sürdürülebilir bir enerji dönüşümüdür (Kusmiyati vd., 2023; Kumari vd., 2024). Bu proses, önceliklebiyokütlenin ön işlemesiyle başlayarak hücre duvarının parçalanmasıyla karbonhidratların serbest kalmasını sağlamakta ve serbest kalan kompleks karbonhidratlar hidroliz ile basit yapılı karbonhidratlara dönüştürülmektedir (Maity ve Mallick, 2022). Saccharomyces cerevisiae gibi mayalar aracılığıyla basit yapılı karbonhidratlar fermantasyon süreci sonunda alkol ve karbondioksite dönüştürülür (Kusmiyati vd., 2023; Kumari vd., 20224). Bu aşamalardan sonra, elde edilen biyoetanol, çeşitli arıtma yöntemleri ile saflaştırılır. En yaygın arıtma yöntemi, damıtma işlemi olup, etanolün kaynama noktası (78,37 °C) ile suyun kaynama noktası (100 °C) arasındaki farktan yararlanılarak gerçekleştirilir (Maity ve Mallick, 2022). Şekil 2'de mikroalglerden biyoetanol elde edilmesinde kullanılan aşamalar gösterilmektedir.



Şekil 2. Mikroalglerden biyoetanol üretim aşamaları
Figure 2. Steps to produce bioethanol from microalgae

3. Karşılaşılan zorluklar ve gelecek yönelimleri
3. Challenges and future perspectives

Mikroalglerin büyütülmesi, özel besin çözeltileri ve kontrollü koşullar gerektirdiğinden yüksek maliyetlere neden olabilir; ayrıca hasat ve işleme aşamaları da yüksek enerji tüketimi ve karmaşık yöntemler gerektirebilir (Liu vd., 2023). Bu nedenle, doğal ortamlar veya atıksu gibi düşük maliyetli kaynakların kullanımını içeren yenilikçi stratejilerin geliştirilmesi önemlidir. Uzun vadede, yüksek teknoloji entegrasyonu süreçlerin otomasyonu ve verimliliğini arttırarak maliyetleri düşürebilir. Genetik iyileştirme, biyoetanol üretiminde verimliliği artırmak ve biyokütlenin şeker veya lipit içeriğini optimize etmek için kullanılan kritik bir stratejidir (Mehariya vd., 2021). Biyoetanol üretiminde daha verimli suşlar geliştirmek amacıyla genetik mühendislik yöntemlerinin sunduğu büyük potansiyel sayesinde, genetik olarak modifiye edilmiş mikroalgler artırılmış karbonhidrat sentezi, kolaylaştırılmış şeker salınımına uygun optimize edilmiş polisakkarit yapıları ve geliştirilmiş biyokütle verimi gibi önemli avantajlar sağlayabilir (Ardo vd., 2022). Bununla birlikte, mikroalglerden biyoetanol üretimi için farklı teknolojiler ve kaynaklar gerektiğinden, mevcut sistemlere entegrasyonu zorlaşmakta ve bu biyoyakıtların tarım ve sanayi sistemleriyle uyumlu hale getirilmesinde zorluklar ortaya çıkmaktadır (Liu vd., 2023). Mikroalg üretim sistemlerinin mevcut enerji altyapılarıyla entegrasyonu karmaşık bir süreçtir ve su, besin maddeleri ve enerji gibi kaynakların etkin kullanımı için optimize edilmelidir. Yenilenebilir enerji talebinin artmasına rağmen, mikroalglerden biyoetanol üretiminde yetersiz teşvikler nedeniyle zorluklarla karşılaşılmaktadır. Yüksek üretim maliyetleri, genellikle gerekli yatırımları destekleyen teşvik eksikliğinden etkilenir. Mikroalglerin ticari ölçekli üretimi için daha fazla destek sağlanmalıdır. Uzun vadeli teşvikler, araştırma ve özel sektör yatırımlarını arttırarak sürdürülebilir bir biyoetanol pazarına katkı sağlayabilir.

4. Sonuç
4. Conclusions

Mikroalglerden biyoetanol üretimi, yenilenebilir enerji alanında dikkat çekici bir potansiyele sahiptir. Bu potansiyel, mikroalglerin yüksek biyokütle verimi ve karbondioksiti etkili bir şekilde dönüştürme kabiliyetiyle doğrudan ilişkilidir. Bu özellikleri, mikroalgleri yalnızca çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bir kaynak haline getirmekle kalmaz, aynı zamanda fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak enerji üretiminde yenilikçi bir yaklaşım sunar. Mikroalglerin karbondioksiti emme kapasitesi, atmosferdeki sera gazı seviyelerinin düşürülmesine katkıda bulunarak iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar. Ancak, bu büyük potansiyelin gerçeğe dönüşmesi için birkaç önemli engelin aşılması gerekmektedir. Özellikle, mikroalglerin biyoetanol üretimi için uygun suşlarının yüksek üretim maliyetleri, genetik iyileştirme süreçlerindeki zorluklar ve mikroalg üretim sistemlerinin mevcut enerji üretim altyapılarına entegrasyonundaki sorunlar, bu alandaki en büyük engelleri oluşturur. Bu engellerin ortadan kaldırılması, mikroalglerin enerji sistemlerine entegre edilerek sürdürülebilir ve verimli bir çözüm sunabilmesi için hayati önem taşımaktadır. Gelecekte mikroalgler, çevresel hedeflere ulaşmak ve enerji üretiminde daha yeşil alternatifler sağlamak için kritik bir araç olabilir. Ancak, bu potansiyelin hayata geçirilmesi için multidisipliner bir yaklaşım gerekmektedir; biyoteknoloji, kimya mühendisliği, çevre bilimi ve enerji mühendisliği gibi alanlardaki bilgilerin birleşmesi, bu alandaki ilerlemeyi hızlandırabilir. Gelecek araştırmalarının, daha verimli mikroalg türlerinin geliştirilmesine, genetik mühendislik tekniklerinin iyileştirilmesine ve mikroalglerin daha ekonomik ve sürdürülebilir bir şekilde üretilebileceği entegre sistemlerin tasarımına odaklanması büyük önem taşır. Bu tür yenilikçi yaklaşımlar, mikroalglerden biyoetanol üretimini daha verimli ve ekonomik hale getirerek, yenilenebilir enerji kaynaklarının gelecekteki rolünü güçlendirebilir.

Yazar katkısı
Author contribution

Yasemin Akdağ: Araştırma, Yazı - İlk Taslak, Görselleştirme **Hüseyin Güven**: Yöntem, Denetim, Yazı - Gözden Geçirme ve Düzenleme **Mustafa Evren Erşahin**: Yöntem, Denetim, Yazı – Gözden Geçirme ve Düzenleme **Hale Özgün**: Yöntem, Denetim, Yazı – Gözden Geçirme ve Düzenleme

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Abdelfattah, A., Ali, S. S., Ramadan, H., El-Aswar, E. I., Eltawab, R., Ho, S. H., Elsamahy, T., Li, S., El-Sheekh, M. M., Schagerl, M., Kornaros, M., & Sun, J. (2022). Microalgae-based wastewater treatment: mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. *Environmental Science Ecotechnology 8(13)*. https://doi.org/10.3390/en14082282

Agarwalla, A Komandur, J., & Mohanty, K. (2023). Current trends in the pretreatment of microalgal biomass for efficient and enhanced bioenergy production. *Bioresource Technology 369(2023) 128330*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128330

Alam, M.A., Wan, C., Tran, D.T., Mofijur, M., Ahmed, S. F, Mehmood, M. A., Shaik, F., Vo, D. V. N., & Xu, J. (2022). Microalgae binary culture for higher biomass production, nutrients recycling, and efficient harvesting: a review. *Environmental Chemistry Letters 20 (2022),* 1153–1168. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01363-z

Ardo, F. M., Lim, J. W., Ramli, A., Lam, M. K., Kiatkittipong, W., Abdelfattah, E. A., Shahid, M. K., Usman, A., Wongsakulphasatch, S., & Sahrin, N. T. (2022). A review in redressing challenges to produce sustainable hydrogen from microalgae for aviation industry. *Fuel 33 (2022) 125646*. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125646.

Carneiro, M. L. N. M., Pradelle, F., Braga, S. L., Gomes, M. S., P., Martins, A. R. F. A., Turkovics, F., & Pradelle, R. N. C. (2017). Potential of biofuels from algae: comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). *Renewable and Sustainable Energy Reviews 73(2017),* 632-653. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.152

Chauhan, S.J., Patel, B., Devliya, B., Solanki, H., & Patel, H. D. (2023). Recent advancement in production of bioethanol from waste biomass: A review. *Clean Technology Environmental Policy (2023)*. https://doi.org/10.1007/s10098-023-02710-0

Cherwoo, L., Gupta, I., Flora, G., Verma, R., Kapil, M., Arya, S. K., Ravindran, B., Khoo, K. S., Bhatia, S. K., Chang, S. W., Ngamcharussrivichai, C., & Ashokkumar, V. (2023). Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: a comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments 60(2023) 103503*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103503

Chia, S. R., Ong, H. C., Chew, K. W., Show, P. L., Phang, S. M., Ling, T. C., Nagarajan, D., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2018). Sustainable approaches for algae utilisation in bioenergy production. *Renewable Energy 129(2018),* 838-852. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.001

de Boer, K., Moheimani, N.R., Borowitzka, M.A., & Bahri, P. A. (2012). Extraction and conversion pathways for microalgae to biodiesel: A review focused on energy consumption. *Journal of Applied Phycology 24(2012),* 1681–1698. https://doi.org/10.1007/s10811-012-9835-z

Deepa, P., Sowndhararajan, K., & Kim, S. A. (2023). Review of the harvesting techniques of microalgae. *Water 15(2023) 3074*. https://doi.org/10.3390/w15173074

de Morais, E. G., Sampaio, I. C. F., Gonzalez-Flo, E., Ferrer, I., Uggetti, E., & Garcia, J. (2023). Microalgae harvesting for wastewater treatment and resources recovery: a review. *New Biotechnology 78(2023),* 84-94. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2023.10.002

Ezhumalai, G., Arun, M., Manavalan, A., Rajkumar, R., & Heese, K. A. (2024). Holistic approach to circular bioeconomy through the sustainable utilization of microalgal biomass for biofuel and other value-added products. *Microbial Ecology 87(61).* https://doi.org/10.1007/s00248-024-02376-1

Kabir, F., Gulfraz, M., Raja, G. K., Inam-ul-Haq, M., Awais, M., Mustafa, M. S., Khan, S. U., Tlili, I., & Shadloo, M. S. (2020). Screening of native hyper-lipid producing microalgae strains for biomass and lipid production. *Renewable Energy 160(2020),* 1295-1307. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.004

Kumari, A., Chakraborty, S., Sirotiya, V., Kalita, D., Rai, A., Yadav, K. K., Bhutto, J. K., Vinayak, V. (2024). A review on economical and impact of bioethanol production from microalgae: Current scenario and future prospect, Industrial Crops and Products 222(2024) 119927. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119927.

Kusmiyati, K., Hadiyanto, H., & Fudholi, A. (2023). Treatment updates of microalgae biomass for bioethanol production: a comparative study. *Journal of Cleaner Production 383(2023) 135236*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135236

Liu, Z., Hao, N., Hou, Y., Wang, Q., Liu, Q., Yan, S., Chen, F., & Zhao, L. (2023). Technologies for harvesting the microalgae for industrial applications: current trends and perspectives. *Bioresource Technology 387(2023) 129631*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129631

Lorenzen, J., Igl, N., Tippelt, M., Stege, A., Qoura, F., Sohling, U., & Brück, T. (2017). Extraction of microalgae derived lipids with supercritical carbon dioxide in an industrial relevant pilot plant. *Bioprocess Biosystems Engineering 40(2017),* 911–918. https://doi.org/10.1007/s00449-017-1755-5

Maity, S., & Mallick, N. (2022). Trends and advances in sustainable bioethanol production by marine microalgae: a critical review. *Journal of Cleaner Production 345(2022) 131153*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131153.

Mehariya, S., Goswami, R.K., Verma, P., Lavecchia, R., & Zuorro, A. (2021). Integrated approach for wastewater treatment and biofuel production in microalgae biorefineries. *Energies, 14(2021) 2282*. https://doi.org/10.3390/en14082282

Milano, J., Ong, H. C., Masjuki, H.H., Chong, W.T., Lam, M. K., Loh, P. K., & Vellayan, V. (2016). Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 58(2016),* 180-197. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.150

Paul, S., Bera, S, Dasgupta, R., Mondal, S., & Roy, S. (2021). Review on the recent structural advances in open and closed systems for carbon capture through algae. *Energy Nexus 4(2021) 100032*. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100032

Pereira, A. S.A. P., Silva, T. A., Magalhaes, I. B., Ferreira, J., Braga, M. Q., Lorentz, J. F., Assemany, P. P., de Aguiar do Couto, E., & Calijuri, M. L. (2024). Biocompounds from wastewater-grown microalgae: a review of emerging cultivation and harvesting technologies. *Science of The Total Environment 920(2024) 170918*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170918

Razzak, S. A., Lucky, R. A., Hossain, M. M., & de Lasa, H. (2022). Valorization of microalgae biomass to biofuel production: A review. *Energy Nexus 7(2022) 100139*. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100139

Tao, Y., Liu, Z., Zheng, J., Zhou, J., He, D., & Ma, J. (2022). Microalgae production in human urine: fundamentals, opportunities, and perspectives. *Frontiers in Microbiology 13(2022), 1067782*. https://doi.org/10.3389%2Ffmicb.2022.1067782

Udayan, A., Sirohi, R., Sreekumar, N., Sang, B., & Sim, S. J. (2022). Mass cultivation and harvesting of microalgal biomass: current trends and future perspectives. *Bioresource Technology 344(2022) 126406*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126406

Velazquez-Lucio J., Colla L. M., Rodríguez-Jasso R. M., Sáenz-Galindo A., Cervantes-Cisneros D. E., Aguilar C. N., Fernandes B. D., & Ruiz H.A. (2018). Microalgal biomass pretreatment for bioethanol production: A review. *Biofuel Research Journal 17(2018),* 780-791. https://doi.org/10.18331/BRJ2018.5.1.5

Xiaogang, H., Jalalah, M., Jingyuan, W., Zheng, Y., Li, X., & Salama, E. S. (2022). Microalgal growth coupled with wastewater treatment in open and closed systems for advanced biofuel generation. *Biomass Conversion and Biorefinery 12(2022),* 1939–1958. https://doi.org/10.1007/s13399-020-01061-w

Yin, Z., Zhu, L., Li, S., Hu, T., Chu, R., Mo, F., Hu, D., Liu, C., & Li, B. (2020). A comprehensive review on cultivation and harvesting of microalgae for biodiesel production: environmental pollution control and future directions. Bioresource Technology 301(2020) 122804. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122804

Zhu, J., Wakisaka, M., Omura, T., Yang, Z., Yin, Y., Fang, W. (2024) Advances in industrial harvesting techniques for edible microalgae: Recent insights into sustainable, efficient methods and future directions. *Journal of Cleaner production 436(2024) 140626*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140626.

YAZAR REHBERİ

1. KAPSAM ve GENEL BİLGİ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi (GUFBD), Gümüşhane Üniversitesi'nin yayın organıdır. Dergi kapsamında bütün Fen, Teknoloji, Mühendislik, Tarım ve Mimarlık Alanlarında daha önce başka yerlerde yayınlanmamış, özgün, araştırma makaleleri, derlemeler ve editöre mektuplar yayınlanır (Anket çalışmaları dergimizin konu kapsamına uygun değildir).
Dergi bilimsel ve hakemli bir dergi olup, Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında olmak üzere yılda dört kez çevrimiçi ortamda yayımlanır.
Derginin amacı araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin bilimsel yayına dönüştürülmesi, ulusal ve uluslararası indekslere girerek evrensel bilime katkı sağlamaktır.

2. YAYIN DİLİ ve ANLATIM

Dergide yayınlanacak tüm yazılar için yayın dili Türkçe ve İngilizce'dir. Anahtar kelimeler alfabetik sıralamaya uygun olarak verilir. İngilizce anahtar kelimeler (Keywords) ise yine bu sıralama dikkate alınarak yazılır.

Makale içerisinde yazar tarafından gerçekleştirilen çalışmalara yönelik (Deneysel çalışmalar, analizler vb) anlatımlarda üçüncü şahıs kullanılmaya özen gösterilmelidir.

3. ELEKTRONİK ORTAMDA BAŞVURU

Dergi ile ilgili tüm yazışmalarda DergiPark tarafından sağlanan arayüz kullanılmalıdır. Dergi yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış makaleler, basılı kopyaya gerek olmaksızın, Ulakbim Dergipark üzerinden https://dergipark.org.tr/tr/pub/gumusfenbil/ adresi kullanılarak gönderilmelidir. Dergiye makale göndermek isteyen yazarların yazım kuralları ile birlikte "Gönderi Kontrol Listesi"ndeki her maddeyi de kontrol etmeleri gerekmektedir. Makaledeki bilgilerin doğruluğunun sorumluluğu yazar(lar)a aittir.

Yayınlanacak makalelerde, araştırma ve yayın etiğine uygunluk esastır. "Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu" doldurulup bütün yazarlar tarafından imzalanmalıdır. Yayın ile ilgili işlemler bu formun teslimiden sonra başlar. Bu formun farklı kopyaları başka şehirlerde yaşayan yazar(lar) tarafından ayrı ayrı imzalanıp gönderilebilir. Dergi ana sayfasında yer alan "Etik İlkeler ve Yayın Politikası" yazarlar tarafından önemle dikkate alınmalıdır.

Hayvanların veya zararlı maddelerin kullanıldığı araştırmalarda "Etik Kurul İzin Belgesi"nin makaleye eklenmesi gerekir. İnsanların denek olarak kullanıldığı araştırma sonuçlarını içeren makalelerde yazar(lar), "insan denemeleri üzerinde yetkili kurul" etik standartlarına ve gözden geçirilmiş Helsinki bildirgesi 1983'e uygunluğunu belgelemeleri gerekir.

4. DEĞERLENDİRME SÜRECİ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi'ne iletilen yazılar öncelikle dergi baş editörünün yönlendireceği alan editörü tarafından konu başlığı ve anahtar kelimelere dayanılarak biçimsel açıdan değerlendirilir. Ön kontrol aşamasında öncelikle intihal tespit yazılımları kullanılarak benzerlik raporları oluşturulur. Aday yayının benzerlik raporu toplamda %20 den az olmalı ve tek bir kaynaktan ise %4 oranından fazla olmamalıdır. Daha sonra incelenecek yayının dergi formatına uygun olup olmadığına karar verilir. "Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu" olmayan veya eksik olan aday yayınlar ile benzerlik oranı sınırlarını aşan aday yayınlar ön incelemeye alınmaz. Öninceleme aşamasını geçen yazılar dergi baş editörü tarafından inceleme sürecinin gerçekleştirilmesi için ilgili alan editörüne yönlendirilir.

Alan editörü bilimsel içerik bakımından değerlendirilmek üzere aday yayını, konusuna uygun olarak en az üç hakeme yönlendirir. Hakem seçiminde öncelikle konu ile ilgili dergi yayın danışma kurulu üyelerinden ya da alanında uzman başka bir bilim insanından yararlanılır. Hakemler değerlendirmeleri sonucunda, uygun, düzeltilerek yayınlanabilir, düzeltildikten sonra tekrar görmek isterim, istediğim düzeltmelerin kontrolünü derginin uzman bilimsel ekibi tarafından yapılması uygundur veya yayınlanamaz şeklinde kararları verebilirler.

Düzeltme istenen yazılarla ilgili olarak yazar gerekli düzeltmeleri yapar. Ayrıca katılmadığı hususlarla ilgili olarak gerekçeli yazısını dergiye gönderir.

Hakem kurulu tarafından farklı türde değerlendirilen yazılar için alan editörü kendi görüşünü de ekleyerek değerlendirmenin sonuçlandırılması için baş editöre iletir. Değerlendirmede son karar baş editöre aittir. Baş editör gerekli görürse yeni bir hakem tayin eder veya yazı ile ilgili kararını sonuçlandırır.

Tüm değerlendirmeler sonucunda kabul ya da red kararı gerekçeleri ile birlikte DergiPark üzerinden yazışmadan sorumlu yazara iletilir.

Değerlendirme sonucu kabul kararı verilecek makaleler yazım ve dil editörüne yönlendirilerek ilgili makalenin yazım ve dil yönünden incelemesi ile dergi yazım kuralları açısından uygunluğu sağlanır. Kabul edilen makaleler dergi sekreteryası tarafından esasa bağlı kalınarak yayına uygun formata dönüştürülür.

Dergide yayımlanan makaleler başka hiç bir yerde yayımlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz. Kısmen veya tamamen yayımlanan makaleler kaynak gösterilmeden hiçbir yerde kullanılamaz. Dergiye gönderilen makalelerin içerikleri özgün, daha önce herhangi bir yerde yayımlanmamış veya yayımlanmak üzere gönderilmemiş olmalıdır. Değerlendirmeye sunulacak çalışmaların bir başka dergiye gönderilmediği veya basılmadığı ön yazı ile belirtilmelidir.

Makale basım için kabul edilmezse “Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu” nun yasal bir önemi kalmaz ve hükümsüz olarak kabul edilir. Bu formun imzalanması ile yazarlar, makalenin “Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi” dergisi ve web sayfasında yayınlamasına ilaveten makalenin tamamı veya bir kısmının yasal olarak çoğaltılması ve dağıtılması hakkını Gümüşhane Üniversitesi’ne devrederek, kendi haklarından feragat etmektedirler.

5. MAKALE TÜRLERİ

Dergide yayınlanan farklı yayın formatları ile ilgili bilgiler ve yazı türlerine göre yazarların dikkat etmeleri gereken hususlar şu şekildedir:

5.1 Araştırma Makaleleri: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Yazarlar, Adresler, Türkçe Öz, Türkçe Anahtar Kelimeler, İngilizce Öz, İngilizce Anahtar Kelimeler, Giriş, Amaç, Gereç ve Yöntem, Bulgular, Tartışma ve Sonuçlar, gerekli ise Etik konular, Katkı Belirtme ve Teşekkür, Kaynaklar, Şekil ve Tablolarla ilgili açıklamalar içermelidir. Makale konunun uzmanları tarafından tekrarlanabilecek şekilde yeterli bilgiyi içermelidir. Bu tür makalelerde ana metin 3500-4000 kelime arası olmalı, kaynak sayısı 40’ı aşmamalıdır.

5.2 Derlemeler: Yazar(lar)ın uzmanlık alanında yapılmış eski araştırmaların derlenip eleştirel bir şekilde yorumlanıp ortaya yeni bir görüş ileri süren çalışmaları kapsamalıdır. Bu tür makale öneren yazar(lar)ın en az 10 SCI-Expanded makalesi bulunmalı ve bunların en az 5 tanesi derleme yaptığı alanda olmalıdır. Derlemeler, Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Yazarlar, Adresler, Türkçe Öz, Türkçe Anahtar Kelimeler, İngilizce Öz, İngilizce Anahtar Kelimeler, Giriş, Ana Bölümler, Alt Bölümler, Sonuç, Katkı Belirtme ve Teşekkür, Kaynaklar, Şekil ve Tablolarla ilgili açıklamalar içermelidir. Ana metin en fazla 5000 kelime olup kaynak sayısında bir kısıtlama yoktur. Bu tür çalışmalar literatürle ilgili geniş bir tartışma ortaya koymalı ve kaynak sayısı en az 40 olmalıdır.

5.3 Editöre Mektup: Dergide yayınlanmış makaleler hakkında veya ilgili diğer konularda soru sormak, görüş bildirmek isteyenlerin yazıları bu türde değerlendirilir. Bu tür yazılarda kapsam ve etik kavramlar göz önünde bulundurulur. Ana metin en fazla 1000 kelime olup kaynak sayısı 10’u geçmemelidir.

6. MAKALENİN HAZIRLANMASI

Dergiye değerlendirilmek üzere yayın gönderecek yazarların GUFBD makale şablonu dosyasını dikkate alarak yayınlarını hazırlamaları ve gerekli olan diğer belgelerle birlikte sisteme yüklemeleri gerekmektedir.