GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ

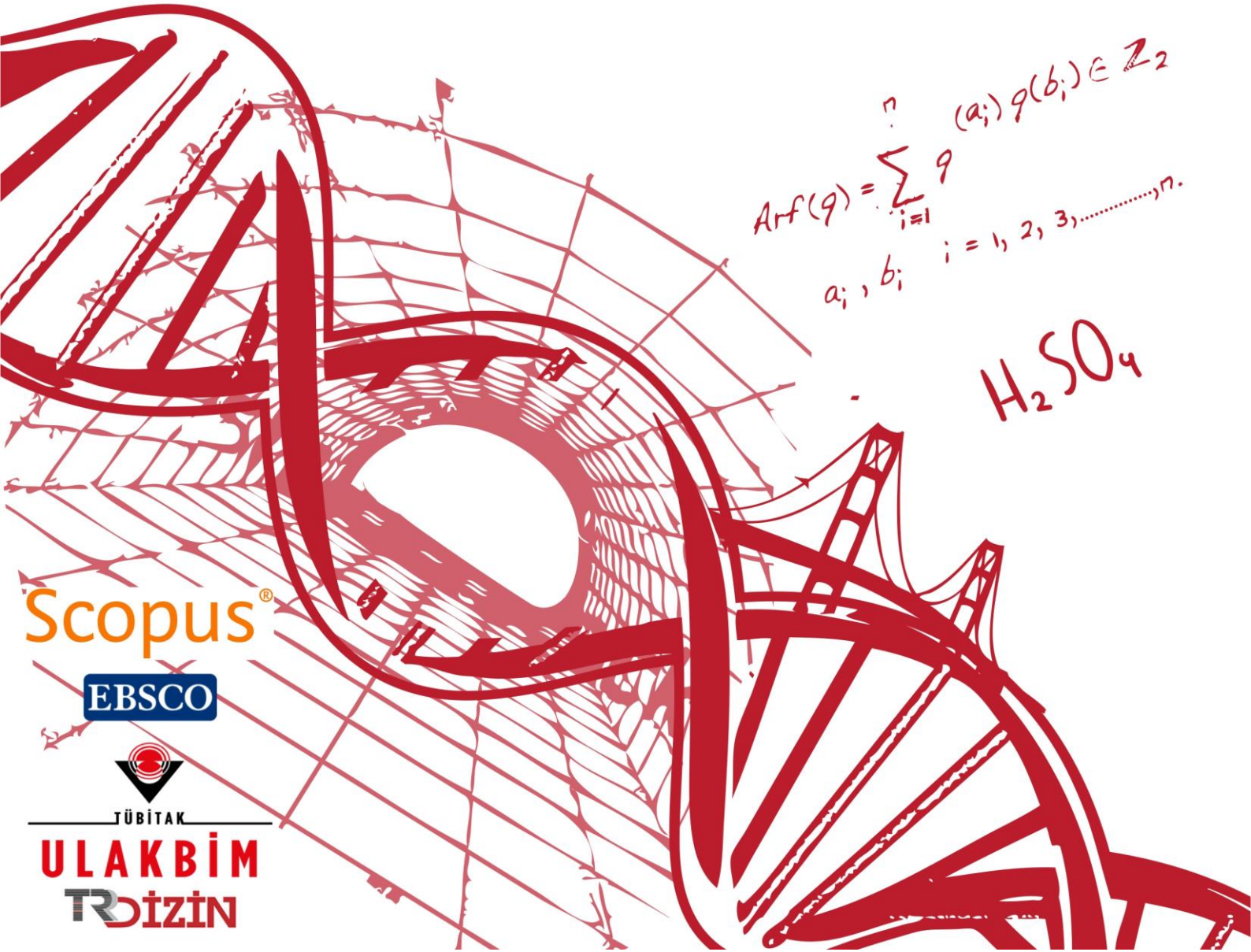
FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Gümüşhane University Journal of Science

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ YAYINI

PUBLISHED BY GÜMÜŞHANE UNIVERSITY

ISSN 2146 - 538X **CILT/VOLUME:** 15 **SAYI/NUMBER :** 2 **YIL/YEAR :** 2025



Scopus®

EBSCO

TÜBİTAK ULAKBİM TR DİZİN

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ
GÜMÜŞHANE UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE
ISSN 2146-538X CİLT / *VOLUME*: 15 SAYI / *ISSUE*: 2 YIL / *YEAR*: 2025

Sahibi / *Owner*
Prof. Dr. Oktay YILDIZ
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 / 06 / 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.

The Gümüşhane University Journal of Science and Technology is a peer-reviewed journal published quarterly online. Studies published in this journal can be referenced in accordance with academic citation standards. The authors are fully responsible for their published studies.

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ
GÜMÜŞHANE UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE
ISSN 2146-538X CİLT / VOLUME: 15 SAYI / ISSUE: 2 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: 2 YIL / YEAR: 2025

İÇİNDEKİLER / *CONTENTS*

Araştırma Makalesi / *Research Article*

Erhan FIRAT
Mehmet SEYHAN
Pasif venturi aktüatörlü bir silindir etrafındaki akış: Reynolds sayısı ve hücum açısının etkileri **331**
Flow past a cylinder with a passive venturi actuator: Effects of Reynolds number and angle of attack

Onur Kazım ATEŞ
Filiz KARABUDAK
Hamid ZAMANLOU
Investigation of mechanical properties of nano-graphene reinforced polymer composites **349**
Nano-grafen takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi

Can ÇİVİ
Recep KARAMAN
Evolvent profilli harmonik iç ve dış dişli temaslarında farklı basınç açıları ve profil kaydırmanın diş dibi ve diş yan yüzey mukavemeti güvenliği üzerindeki etkilerinin incelenmesi **360**
Investigation of the effects of different pressure angles and profile shifting on the tooth root and gear tooth surface strength safety in involute profile harmonic internal and external gear contacts

Mustafa Eren RİZELİ
I-tipi Çaltı Plütonu'na (Kemaliye, Erzincan) ait magmatik kayaçların petrografik ve jeokimyasal özellikleri **380**
Petrographic and geochemical characteristics of magmatic rocks of the I-type Çaltı Pluton (Kemaliye, Erzincan)

Abdurrahman GÜNDAY
Aydın BALABEY
Canberk UTAR
Muhammed DEMİR
Muhammed Mert YILMAZ
Taylan SİPAHİ
Effects of vibration frequency and velocity parameters on Doppler frequency shift in laser Doppler vibrometer systems **397**
Lazer Doppler vibrometre sistemlerinde titreşim frekansı ve hız parametrelerinin Doppler frekans kayması üzerindeki etkileri

Kaya Ali LEKESİZGÖZ
Yasin ŞEHİTOĞLU
Proje yönetiminde proje karmaşıklığı sorunsalına tematik inceleme: bir bibliyometrik analiz **407**
Thematic study on the problem of project complexity in project management: a bibliometric analysis

Şule GÜZEL İZMİRLİ
Farklı bitki türlerinin ağır metal içerikleri üzerine taş ocaklarının etkisinin değerlendirilmesi **432**
Evaluation of the effect of quarries on heavy metal contents of different plant species

Zafer MAŞLAKCI
Theoretical investigation of the effects of large cage guest CF_3Br and small cage guests CH_4, CO_2 and H_2S on the stability of double clathrate hydrates **451**
Büyük kafes konuğu CF_3Br ve küçük kafes konukları CH_4, CO_2 ve H_2S'in çift klatrat hidratların kararlılığı üzerindeki etkilerinin teorik incelenmesi i

Mehmet TÜTÜNCÜ
Nazan YILMAZ
Düşey gravite gradyentinin yersel ve global değişiminin izlenmesi: Sümela Manastırı örneği **463**
Observation of local and global changes of vertical gravity gradient:the case of Sumela Monastery

Yasemin YILMAZER
İsmail Hakkı TEKİNER
Aleyna ÇAVDAR
Sermin DURAK
Rula ABDÜLHAMİTOĞLU
Investigation of protein level, amino acid profile and cytotoxic effects of plant-based proteins and meat analogues **474**
Bitkisel-bazlı proteinler ve et analog ürünlerin protein seviyesi, amino asit profili ve sitotoksik etkilerinin incelenmesi

Bayram ÜRKEK	**Physicochemical, rheological properties, antioxidant activity and mineral amount of the ice cream containing barberry (*Berberis vulgaris* L.)** *Karamuk (Berberis vulgaris L.) ilaveli dondurmanın fizikokimyasal, reolojik özellikleri, antioksidan aktivitesi ve mineral içeriği*	**486**
Ayşenur SÖNMEZ Şeyma DUMAN Muhammed Said FİDAN	**PLA esaslı grafen, kara havuç atığı ve huntit-hidromanyezit takviyeli biyokompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu** *Production and characterization of PLA based graphene, black carrot waste and huntite-hydromagnetite reinforced biocomposites*	**497**
Onur UĞURLU Yeşim AYGÜL	**Büyük ölçekli ağlar için polinom zamanlı kritik düğüm tespiti algoritması** *A polynomial-time algorithm for critical node detection in large-scale networks*	**516**
Büşra ÇİMEN Fırat YILMAZ	**A comparative analysis of microbial, chemical composition, and quality parameters in Kürtün-Araköy and Gümüşhane breads** *Kürtün-Araköy ve Gümüşhane ekmeklerinde mikrobiyal, kimyasal bileşim ve kalite parametrelerinin karşılaştırmalı analizi*	**533**
Özkan BİNGÖL	**Classification of Turkish cuisine food images using transformer-based deep learning models** *Transformer tabanlı derin öğrenme modelleri kullanılarak Türk mutfağına özgü yemek görsellerinin sınıflandırılması*	**545**
Halit ÇETİNER Hakan YÜKSEL	**CBLTwitter: Twitter disaster detection analysis using CNN-BiLSTM deep learning methods** *CBLTwitter: CNN-BiLSTM derin öğrenme yöntemlerini kullanarak Twitter felaket tespiti*	**563**
Mustafa GENÇAY Altuğ BOZKURT Erşan Ömer YÜZER	**Energy efficiency and green transformation: a VFD case study in an industrial facility** *Enerji verimliliği ve yeşil dönüşüm: bir sanayi tesisi VFD örneği*	**577**
M. Kaan YEŞİLYURT Mansur MUSTAFAOĞLU	**A numerical aerodynamic analysis of a vertical axis wind turbine in a wind tunnel** *Dikey eksenli bir rüzgar türbininin rüzgar tünelinde sayısal aerodinamik analizi*	**590**
Mahmut Can ŞENEL Tolgahan ARAPOĞLU	**Hurda alüminyumdan alümina takviyeli Al6013 matrisli kompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması** *Production of alumina reinforced Al6013 matrix composites from scrap aluminum and investigation of their mechanical properties*	**608**
Şule Nilhan OĞUZALP Sıtkı AKKAYA Ulaş EMİNOĞLU	**Güç sistemlerinde harmonik tespiti için gelişmiş meta sezgisel algoritmaların karşılaştırılması** *Comparison of advanced metaheuristic algorithms for harmonic detection in power systems*	**620**

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 331-348 doi: 10.17714/gumusfenbil.1474494 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Pasif venturi aktüatörlü bir silindir etrafındaki akış: Reynolds sayısı ve hücum açısının etkileri

Flow past a cylinder with a passive venturi actuator: Effects of Reynolds number and angle of attack

Erhan FIRAT*[1], Mehmet SEYHAN[2]

[1]*Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 62000, Tunceli, Türkiye*

[2]*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye*

• Geliş tarihi / *Received*: 27.04.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 18.03.2025

Öz

Bu çalışmanın temel amacı, Reynolds sayısı (Re) ve hücum açısının (α) yeni geliştirilen bir akış kontrol yöntemi olan Pasif Venturi Aktüatör'ünü (PVA) içeren bir silindirin aerodinamik karakteristikleri üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu amaçla hem aerodinamik kuvvet ölçümleri hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmanın Reynolds sayıları Re=28000 ile 80000 arasında değişmektedir. Deneysel çalışmanın hücum açıları α=-30° ile +30° arasında değişmektedir. PVA içeren ve içermeyen silindir için HAD benzetimleri Re=36000 ve α=0°'de gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümleri kullanılarak elde edilen bulgular, zaman ortalamalı direnç katsayısı $\overline{C_D}$ ile Re arasında oldukça doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir. α=0° için Re değerinin 28000'den 80000'e arttırılması $\overline{C_D}$ değerinde bir düşüşe neden olmuştur. Sonuçlar, test edilen hücum açısı ne olursa olsun, PVA'lı silindirin PVA'sız silindire kıyasla daha düşük bir $\overline{C_D}$ sergilediğini göstermektedir. Ayrıca PVA'nın benzer Re aralığında test edilen pasif kontrol yöntemlerine kıyasla çok iyi bir direnç performansı sergilediği de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Akış kontrolü, Dairesel silindir, Direnç düşürme, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Pasif venturi aktuatorü (PVA), Rüzgar tüneli

Abstract

The main objective of this study is to investigate the effects of Reynolds number (Re) and angle of attack (α) on the aerodynamic characteristics of a cylinder with a recently developed flow control method, Passive Venturi Actuator (PVA). To this end, both aerodynamic force measurements and computational fluid dynamics (CFD) simulations have been carried out. The Reynolds numbers of the experimental study ranged from Re=28000 to 80000. The attack angles of the experimental study ranged from α=-30° to +30°. For the cylinder with and without PVA, CFD simulations were conducted at Re=36000 and α=0°. Findings based on using the force measurements showed a fairly linear relationship between the time-averaged drag coefficient, $\overline{C_D}$, and Re. For α=0°, an increase in the Re from 28000 to 80000 resulted in a reduction in the $\overline{C_D}$. The results demonstrate that regardless of the attack angle tested, the cylinder with PVA exhibits a lower $\overline{C_D}$ compared to the cylinder without PVA. It has also been shown comparatively that PVA exhibits very good drag performance compared to passive control methods tested with it in a similar Re range.

Keywords: *Flow control, Circular cylinder, Drag reduction, Computational Fluid Dynamics (CFD), Passive venturi actuator (PVA), Wind tunnel*

*Erhan FIRAT; efirat@munzur.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Akış kontrolü, herhangi bir akışkan akışı içerisinde ele alınan bir veya birkaç bölgedeki akışkan davranışını, önceden belirlenmiş bir veya birkaç amaç çerçevesinde (aerodinamik direnci arttırmak ya da düşürmek, ısı transferini iyileştirmek gibi) değiştirmek için yapılan her türlü girişimdir (Gad-el-Hak, 2000). Akış kontrolü, akışkan akışının yer aldığı tüm sistemler için büyük bir öneme sahiptir. Bunun ana nedeni, ilgili sistemle ya da herhangi bir bileşeniyle ilgili bir performans iyileştirme süreci boyunca akış kontrolüne ait uygun en az bir yöntemden faydalanmanın kaçınılmaz olmasıdır. Bununla ilgili olarak, bir yüksek performans spor arabanın aynı dönemeci daha yüksek hızlarda geçmesi amaçlanıyorsa, araç etrafındaki akış yapısını değiştirmek için bir akış kontrol yönteminden faydalanarak araca etkiyen yere basma kuvvetinin arttırılması gerekmektedir. Araç üst kısmından arka kısmına yönelen akışın yapısını değiştiren bir rüzgarlığın (spoiler) ilgili araç üzerinde uygun bir yere konumlandırılmasıyla bu amaç gerçekleştirilebilir.

Akış kontrol yöntemleri (AKY), akış kontrol ekipmanı enerji gereksinim durumuna göre iki gruba ayrılırlar. Enerji gereksinimi olan ekipmanlar aktif akış kontrol yöntemi (AAKY) grubunda, olmayanlar ise pasif akış kontrol yöntemi (PAKY) grubunda yer alırlar (Gad-el-Hak, 2000). İki grubun da birbirlerine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumlar vardır. Bununla birlikte, belirlenen amaç ve hedefler doğrultusunda ilgili sonuca/sonuçlara erişebilmek için hangi gruptan/gruplardan kaç adet akış kontrol yönteminin kullanılması gerektiğine dair ilk tercihler, öncelikli olarak, ele alınan sistem ve onun etrafındaki akış yapısı göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir.

Aerodinamik/hidrodinamik bir kuvvet olan direnç, aynı enerjiyi sarf ederek daha uzun mesafe kat etme amacı taşıyan sistemler için olabildiğince düşürülmeye çalışılan bir parametredir. Bu sebeple, bu düşüşü sağlayacağı düşünülen AKY'ler birçok araştırmacı tarafından test edilmiştir. Bununla ilgili olarak, Darabasz vd. (2023) basitleştirilmiş bir taşıt modeli olan arkası düz Ahmed aracı üzerine etkiyen aerodinamik direnci düşürebilmek amacıyla bu araç arkasına, ince plakalardan oluşan ve alt plakası yerden yukarı 5°'lik bir difüzör açısına sahip bir oyuk (cavity) eklemiş ve bu oyuğun üste kalan plakası üzerinde, derinlik boyunca ve belirli bir derinlikte olacak şekilde çentikler açarak farklı ekipmanlar oluşturmuştur. Araca eklenen bu ekipmanlardan belirli bir derinlik boyunca ve iki adet olarak açılan çentiklerin ilgili model aracın en düşük direnç kuvveti oluşturmasına yol açtığını ve bunu da, bu çentiklerden oluşan uzunlamasına çevrilerin art izi bölgesindeki balans kaçıklığını ortadan kaldırarak sağladığını belirtmişlerdir. Ahmed aracının yüksekliğine dayalı Reynolds sayısının 600000 değerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmaları sonucunda ortalama direnç katsayısında %11.5'lik bir düşüş sağlanabildiğini belirtmişlerdir. Yemenici & Kasap (2023) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada ise HB (hatchback/heçbek) kasa türüne sahip 1:5 ölçekli bir binek otomobilin arka firar kenarı civarına yerleştirilen 8 adet kavisli ve yamuk çevri üreteçlerinin aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkileri sayısal olarak daimi şartlar altında incelenmiştir. Kavisli çevri üreteçleri olan aracın direnç katsayısının olmayana nazaran %2.87 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Test edilen çevri üreteçlerinin araç kaldırma katsayısında hafif bir azalmaya sebep olduğunu da göstermişlerdir. Bununla birlikte, bu değişimlerin altında yatan sebepler açıklanmamıştır. Seyhan & Fırat (2022), sıfır ve sıfırdan farklı sapma açılarında, 1:25 ölçekli otobüs modelinin ön alt yüzeyine paralel ve modele göre daha önde olacak şekilde yerleştirilen düz plakaların model aerodinamik karakteristikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Genişliğe-dayalı Reynolds sayısının 104000±3000 değerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarında genişliği ve yüksekliği, sırasıyla, otobüs modeli genişliğinin 0.7 ve 0.3 katı olan ince bir plakanın otobüs modeli ön alt yüzeyinden 0.16 otobüs genişliği kadar ileriye yerleştirildiği durumda, otobüs modeline etkiyen zaman-ortalamalı direnç katsayısında %7.1'lik bir düşüş elde edildiği ifade edilmiştir. Bu düşüşün altındaki nedenlerin yeterli açıklıkla oraya koyulamadığını da belirtmişlerdir.

Direnç, dairesel ve kare en-kesite sahip sistemlerde/sistem bileşenlerinde (köprü bacağı, sokak lambası, fabrika bacası, yüksek yapılar, sondaj yükselticisi (drilling riser), deniz altı boru hatları gibi) yüksek bir değere sahiptir. Dahası, yüksek genliğe sahip çalkantı kaldırma (fluctuating lift) kuvveti de onunla birlikte görülür. Yüksek direnç ve yüksek genlikli kaldırma kuvveti, ilgili sistemde/sistem bileşenlerinde ciddi yorulma meydana getirdiğinden ve bunun da sistemin servis ömrünün kısalmasına yol açtığı bilindiğinden, olabildiğince eş zamanlı olarak düşürülmeye çalışılan iki parametredir. Bununla ilgili olarak, Zhou vd. (2015) Reynolds sayısının 7400-18000 aralığında gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışma ile silindir yüzeyine onun genişliği boyunca açılan dikdörtgen oyukların o silindirin direnç katsayısı ve o silindir etrafındaki akışın karakteristikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında, aynı Reynolds sayısında test edilen

oyuklu ve düz silindirler için oyuk bulunan silindire etkiyen direncin düz silindire kıyasla %18-28 daha düşük olabileceğini göstermişlerdir. Bunu, oyukların, daha küçük boyutlu ve çevrinti şiddeti çok daha düşük kayma tabakaları oluşturmasına dayandırmışlardır. Gao vd. (2020) ise bir silindirin durma çizgisi üzerine değecek ve serbest akım yönüne paralel olacak şekilde sırayla yerleştirdikleri farklı uzunluklardaki ince plakaların, aerodinamik kuvvetleri düşürebilme kabiliyetlerini Reynolds sayısının 26600 değerinde deneysel olarak test etmişlerdir. Plaka uzunluğunun silindir çapına eşit olduğu durumda plakasız silindire kıyasla ortalama direnç katsayısında %36'lık ve KOK (karelerinin ortalamalarının karekökü) kaldırma kuvvetinin değerinde %63.6'lık bir düşüş sağlanabildiği ifade edilmiştir. Bu düşüşe, plaka ön ucunda oluştuktan sonra plaka yüzeyinden geçip silindir yüzeyine ulaşan çevrilerin, silindirin serbest akış şartlarını değiştirmesinin sebep olduğunu bildirmişlerdir. Deneysel çalışmasının bir amacı da bir silindire etkiyen direnci düşürmek olan Aksoy (2024) ise bunu, o silindirin üzerine farklı açısal konumlara farklı sapma açılarıyla yerleştirdiği çevri üreteçleri ile gerçekleştirmeye çalışmıştır. Reynolds sayısının 8000 değerinde yaptığı çalışması sonucunda direnç katsayısını %33.3 civarında düşürülebildiğini belirtmiştir. Bu düşüşü, ilgili çevri üretecinin, zaman-ortalamalı tekrar dolaşım (recirculation) bölgesinin uzunluğunda yarattığı artışla ilişkilendirmiştir. Lin vd. (2016) de genişliği boyunca genliği sabit tutup dalga boyunu değiştirerek elde ettikleri sinüzoidal yüzeye sahip dairesel silindir art izindeki akış yapısını ve PAKY uygulanmış silindire etkiyen aerodinamik karakteristikleri Reynolds sayısının 3000 değerinde sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, direncin %16 civarında ve KOK kaldırma değerinin ise %93 civarında düşürülebildiğini ifade etmişlerdir. Bu düşüler, dalgalı silindir genişliğince (spanwise) oluşan çevrilerin silindir uzunluğunca (streamwise) oluşan çevriler tarafından zayıflatılmasına dayandırılmıştır. Tunay (2023a) bir silindire, akış doğrultusuyla çakışık olan silindir yatay ekseni boyunca açtığı farklı yüksekliklerdeki yarıkların akış ve aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Büyük burgaç benzetimi (Large Eddy Simulation, LES) türbülans modelini kullandığı ve çapa-dayalı Reynolds sayısının 3900 değerinde gerçekleştirdiği akış benzetimi çalışmaları sonucunda silindir çapının 0.2 katı kadarlık bir yüksekliğe sahip yarığın silindire açılması sonucu zaman-ortalamalı direnç katsayısında %11.3'lük bir düşüşün sağlandığını belirtmiştir. Bu düşüşü silindir arka açıklığından çıkan jetin silindir arka yüzeyindeki düşük basıncı yükseltmesi ile ilişkilendirmiştir. Tunay (2023b) ise bir silindir etrafındaki akışı, onun dış kısmına eşmerkezli olacak şekilde yerleştirdiği gözenekli başka bir silindir vasıtasıyla çapa-dayalı Reynolds sayısının 5000 değerinde kontrol etmiştir. LES türbülans modelini kullandığı üç-boyutlu sayısal çalışmasında gözeneklilik oranını (açıklık bulunan alanların tüm yanal alana oranı) 0.5 değerinde sabit tutmuştur. Gözenekli silindirin eklenmesi sonucunda direnç katsayısında %69'luk bir düşüş olduğu ifade edilmiştir. Eş zamanlı olarak, KOK kaldırma katsayısında ise 7/8'lik bir düşüş elde edildiği gösterilmiştir.

Yukarıda aerodinamik performanslarından bahsedilen AAKY ve PAKY yöntemlerinden her biri tek bir AKY'den meydana gelmektedir. Bazı araştırmacılar, bir amaç uğruna birbiriyle uyumlu çalışabilecek birden çok AKY'nin bir araya getirilmesi ve AKY'ler ile ilgili test parametrelerinin optimize edilmesi sonucunda daha verimli sonuçlar elde edilebileceğini göstermişlerdir. Bununla ilgili olarak, Akbıyık & Akansu (2021), bir dairesel silindire etkiyen ortalama direnci, 3.75 silindir çapına sahip ve silindire arka durma noktasından temas eden ayırıcı plakayı (PAKY) yalnız kullanarak, silindir durma noktasından ±90° konumlandırılan iki adet plazma aktuatörünü (AAKY) yalnız kullanarak ve ayırıcı plaka ile plazma aktuatörünü (PAKY+AAKY) birlikte kullanarak düşürmeye çalışmışlardır. Deneysel çalışmayı gerçekleştirdikleri iki farklı Reynolds sayısında da birlikte kullanılan hibrit AKY ile diğerlerine nazaran çok daha düşük ortalama direnç değerleri elde edebildiklerini göstermişlerdir. Zheng vd. (2021) ise ana ekseni yatay ve düşey pozisyonlarda konumlandırılan iki eliptik silindire etkiyen aerodinamik karakteristiklerde iyileşme yaratmak için yalnız yüzey pürüzlülüğünün (PAKY) ve yüzey pürüzlülüğü ile birlikte yüzeydeki yarıktan yapılan emmenin (PAKY+AAKY) birlikte kullanıldığı durumları deneysel olarak test etmişlerdir. Ana ekseni düşey olan eliptik silindir için hem yalnızca pürüzlü hem de pürüzsüz silindire kıyasla otalama direnç katsayısı, KOK direnç katsayısı ve KOK kaldırma katsayısının her üçünde de ciddi düşüşler sağlanabilmiştir. Galvao vd. (2008) ise arka yüzey üçgen kaplama (PAKY) ve silindir yatay eksenine simetrik yerleştirilen kanat profilleri (PAKY) kullanarak bir çapraz akıştaki bir dairesel silindirin direncini düşürmeyi de amaçlamışlardır. Reynolds sayısının 8500 değerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarında, hem arka yüzey üçgen kaplama hem de simetrik kanatları birlikte kullanmanın (PAKY+PAKY), yalnız üçgen kaplamanın kullanıldığı (dirençte %15 düşüş) ve yalnız simetrik kanatların kullanıldığı (dirençte artış) durumlardan çok daha fazla direnç düşürme kabiliyeti olduğunu (dirençte %48 düşüş) belirtmişlerdir. Sonuç olarak da, cisim etrafında potansiyel akış deseni oluşturma girişiminin cisme etkiyen direnci düşürmek için iyi bir başlangıç yolu olduğunu ifade etmişlerdir. Firat vd. (2024) ise daimi emme ve üflemeyi Venturi etkisi üzerinden bir araya getirdikleri ve Ventüri aktuatörü olarak isimlendirdikleri AKY'yi dairesel silindir üzerinde Reynolds sayısının 28000 değeri

için sayısal olarak test etmişlerdir. Çalışmada, farklı tasarımlara sahip pasif Venturi aktuatörlerinin çeşitli aerodinamik ve akış karakteristikleri üzerindeki etkilerini ölçek-uyarlamalı benzetim (Scale-Adaptive Simulation, SAS) türbülans modelini kullanarak incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, iki yarıklı ve difüzör açısı 6° olan modele ait otalama direnç katsayısı, KOK direnç katsayısı ve KOK kaldırma katsayısının, düz dairesel silindire kıyasla, sırasıyla, %28.6, %58.5 ve %81.2 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Yukarıdaki paragrafta verilen çalışmalardan da anlaşılacağı üzere farklı kontrol yöntemlerinin amaca uygun şekilde bir arada çalışmasını sağlamak, yani hibrit bir akış kontrol yöntemi tasarlamak ve işe yararlığını ilgili parametreler açısından test etmek, arzu edilen amaca daha verimli bir şekilde ulaşılmasına yol açabilmektedir. Firat vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada pasif/aktif ventüri aktuatörleri tanıtılmış ve bir dairesel silindir içerisine gömülmüş 4 farklı pasif ventüri aktuatorünün hücum açısız ve Re=28000 durumunda aerodinamik karakteristikleri ve art izi akış yapıları incelenmiştir. Bu çalışmada da yine Firat vd. (2024) tarafından tasarlanan bir pasif venturi aktuatörü (PVA) türü (iki yarıklı ve difüzör açısı 14° olan) silindirik model içerisine yerleştirilmiştir. Literatürde henüz rastlanılmadığı için mevcut çalışma ile literatüre kazandırılması planlanan durumlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

● Farklı karakteristik uzunluğa sahip cisimler etrafında (anten, köprü bacağı, sokak lambası gibi) farklı Re değerlerine sahip akışlar akar. Reynolds sayısının PVA'lı modele ait aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisi henüz incelenmemiş bir konudur. Burada, Reynolds sayısının PVA'lı model üzerine etkiyen aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisi $28000 \leq Re \leq 80000$ için test edilecektir. Bu inceleme sayesinde farklı Re değerlerindeki aerodinamik etkiler daha belirgin bir şekle okuyucuya sunulacak ve aerodinamik karakteristiklerin değişiminden sorumlu fiziksel olaylar gün yüzüne çıkarılacaktır.

● Atmosferin dinamik bir yapıya sahip olmasından dolayı hücum açısı (α), kara ve özellikle de hava taşıtları açısından çok önemli bir parametredir. Aerodinamik açıdan bu çalışma içerisinde test edilecek olan PVA için hücum açısının hesaba katıldığı bir çalışma henüz mevcut değildir. Burada, hücum açısının PVA'lı model üzerine etkiyen aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisi $-30° \leq \alpha \leq 30°$ için test edilecektir.Bu sayede, PVA'nın aerodinamik açıdan sağladığı avantajların farklı hücum açıları için korunup korunamadığı okuyucuya net bir şekilde sunulacaktır.

Çalışma içerisinde, sırasıyla, aşağıdaki süreçler gerçekleştirilecektir:
● Test edilecek modeller detaylarıyla açıklanacaktır.
● Kullanılan deneysel ve sayısal yöntemler açıklanacaktır.
● Hücum açısız durumda bir Reynolds sayısı aralığı için PVA'nın aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisi değerlendirilecektir.
● Sabit bir Re değerinde bir hücum açısı aralığı için PVA'nın aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisi değerlendirilecektir.
● Bir Reynolds sayısı aralığı için PVA'lı silindirin direnç performansı diğer bazı pasif akış kontrol yöntemleri uygulanmış silindirlerinkilerle kıyaslamalı olarak verilecektir.

Deneysel verilerin akış fiziği ile ilgili bir olguyu açıklamada yetersiz kaldığı yerde benzetim verilerinden destek alınacaktır.

2. Materyal ve yöntem
2. Material and method

Çalışmanın bu bölümü 5 alt bölümden meydana gelmektedir. Bu alt bölümlerde, sırasıyla, çalışmada kullanılan boyutsuz parametreler, test edilen modeller ve üretim yöntemleri, deneysel çalışmanın detayları, sayısal çalışmanın detayları ve sayısal çalışmanın geçerlemesi konularına değinilmiştir.

2.1. Boyutsuz parametreler
2.1. Nondimensional parameters

Deneysel ve sayısal çalışmaların ilgili kısımlarında kullanılan boyutsuz sayılar aşağıda sırayla verilecektir. Bu boyutsuz sayıların ilki çapa-dayalı Reynolds sayısıdır (Re) ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Firat vd., 2024).

$$Re = \frac{\rho \cdot \overline{U_\infty} \cdot D}{\mu} \tag{1}$$

Burada yer alan $\overline{...}$ operatörü içerisine yazılan simgenin zaman-ortalamasını temsil etmektedir. Mevcut araştırmada Reynolds sayısının 28000-80000 aralığı çalışılmıştır. Aerodinamik direnç ve kaldırma katsayılarının (C_D ve C_L) zaman-ortalamalı ve KOK (karelerinin ortalamalarının karekökü) değerleri, sırasıyla, aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır (Firat vd., 2024).

$$\overline{C_D} = \frac{2 \cdot \overline{F_D}}{\rho \cdot \overline{U_\infty}^2 \cdot A_F} \tag{2}$$

$$\overline{C_L} = \frac{2 \cdot \overline{F_L}}{\rho \cdot \overline{U_\infty}^2 \cdot A_F} \tag{3}$$

$$C_{D-KOK} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(C_{D,i} - \overline{C_D}\right)^2} \tag{4}$$

$$C_{L-KOK} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(C_{L,i} - \overline{C_L}\right)^2} \tag{5}$$

Burada yer alan $C_{D,i}$ simgesi hesaplamaya katılan i'inci anlık direnç katsayısının değerini ve $C_{L,i}$ simgesi de hesaplamaya katılan i'inci anlık kaldırma katsayısının değerini temsil etmektedir. Basınç katsayısı (C_P) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Firat vd., 2024).

$$\overline{C_P} = \frac{2 \cdot \overline{\Delta P}}{\rho \cdot \overline{U_\infty}^2} \tag{6}$$

Yarık için hacimsel debi katsayısı (C_Q) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Firat vd., 2024).

$$\overline{C_Q} = \frac{\bar{V} \cdot A_S}{\overline{U_\infty} \cdot A_F} \tag{7}$$

Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) sayısı aşağıdaki gibi ifade edilir (Firat vd., 2024).

$$CFL = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x} \tag{8}$$

Strouhal sayısı (St) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Firat vd., 2024).

$$St = \frac{f \cdot D}{\overline{U_\infty}} \tag{9}$$

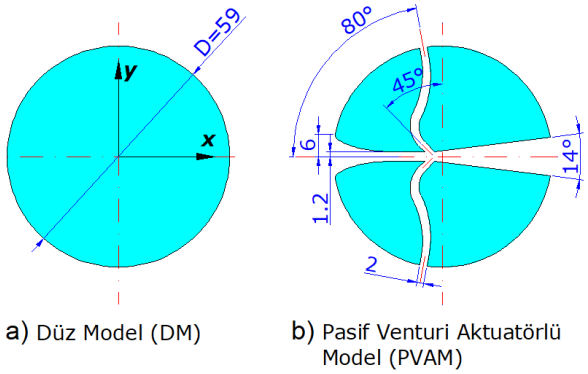
Son olarak da yüzde hata (ε) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Firat vd., 2024).

$$\varepsilon = \frac{|\text{Yeni tahmin} - \text{Mevcut tahmin}|}{|\text{Yeni tahmin}|} \cdot 100 \tag{10}$$

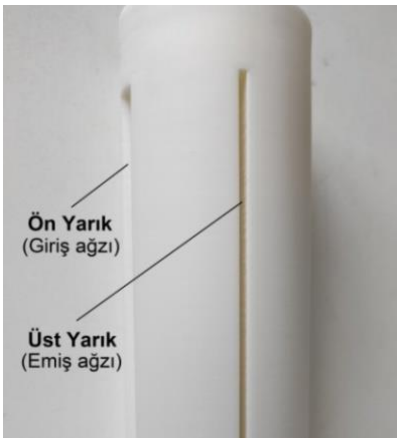
2.2. Modeller
2.2. Models

Mevcut çalışmada 2 adet model test edilecektir (Şekil 1). Bunlardan ilki modifiye edilmemiş düz silindirik modeldir (DM). Bu model hem sayısal modelin geçerleme çalışmalarında hem de ikinci model olan pasif

venturi aktuatörlü modelin (PVAM) aerodinamik performansını ölçmek için referans olarak kullanılacaktır. Modellerin çapları 0.059 m ve iki dairesel uç plaka arasında kalan kısımlarının genişlikleri ise 0.44 m'dir. Yarıklı kısım ise 0.40 m genişliğindedir. Bu durumda modellerin blokaj oranları %10.35 ve şekil oranları da 7.46'dır. Modeller eriyik yığma modelleme (EYM/FDM) teknolojisiyle çalışan bir yazıcıda bastırılmış sonrasında da dış yüzeyleri ince zımpara ile zımparalanarak pürüzsüz hale getirilmiştir (Şekil 2). İç yüzeylere erişimin zor olmasından dolayı buralara pürüzsüzleştirme işlemi yapılamamıştır.

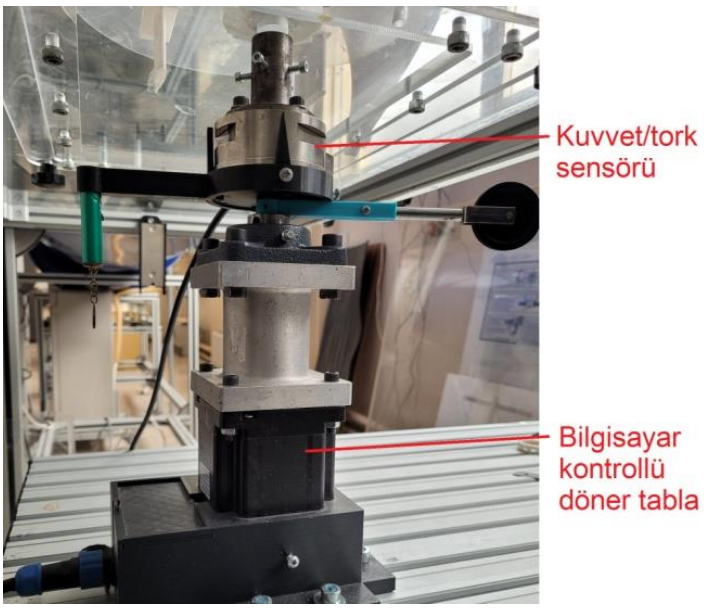


Şekil 1. Test edilecek olan modeller: a) Düz model (DM) ve b) Pasif venturi aktuatörlü model (PVAM; Firat vd., 2024). Tüm ölçüler milimetre cinsindendir. Çapraz akış yönü soldan sağadır.
Figure 1. *Models to be tested: a) Plain model and b) Model with passive venturi actuator (Firat et al., 2024). All dimensions are in milimeters. Cross flow direction is left to right.*



Şekil 2. Üç-boyutlu yazıcıda basıldıktan sonra dış yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiş PVAM.
Figure 2. *PVAM with smooth outer surfaces after printing on a three-dimensional printer.*

Şekil 3. Rüzgar tüneli.
Figure 3. *Wind tunnel.*



Şekil 4. Bütünleşik haldeki aerodinamik kuvvet ölçüm ve açı ayar sisteminin bir görüntüsü.
Figure 4. *A view of the integrated aerodynamic force measurement and angle adjustment system.*

2.3. Deneysel yöntemler
2.3.Experimental methods

Bu araştırmanın deneysel kısmı Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde bulunan 570 mm × 570 mm test bölgesi en-kesit alanına sahip açık çevrim rüzgar tünelinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Tünel daralma konisinin daralma oranı 6.3:1'dir. Aerodinamik direnç ve kaldırma kuvvetlerinin ölçümleri Re=28000-80000 aralığında ve belirlenen bir Re değeri (28000) için -30°'den +30°'ye kadar olan hücum açısı (α) aralığında gerçekleştirilmiştir. Tünel test bölgesi içerisindeki serbest akım hızı $\overline{U_\infty}$=7.4±0.2 m/s (Re=28000'e tekabül etmekte) iken serbest akım türbülans şiddeti yaklaşık %0.5, $\overline{U_\infty}$=21.1±0.6 m/s (Re=80000'e tekabül etmekte) iken serbest akım türbülans şiddeti %0.9 olmakla birlikte aralıktaki değişim neredeyse doğrusaldır. Testler tünel içi serbest akım sıcaklığının 22.5±1 °C ve yerel atmosfer basıncının 101±1 kPa olduğu durumda gerçekleştirilmiştir. Tünel içi serbest akım hızı değeri Pitot-tüplü dijital mikromanometre ile ölçülmüştür (PCE Inst., PCE PFM2). Gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonucunda Re değerindeki belirsizlik değerinin %68.7 güven aralığı için ±800 olduğu hesaplanmıştır (UKAS, 2024).

Test modellerinin alt yüzeyine, onların eksenleriyle çakışık olacak ve rijit bir bağlantı sağlayacak bir saplama çubuğu eklenmiştir. Saplama çubuğunun diğer ucu ise, sırayla, alt taraftaki uç plaka ve rüzgar tüneli test bölgesi alt duvarındaki deliklerden geçerek 6-eksenli kuvvet/tork sensörünün (Schunk, FTD-Gamma SI-32-2.5) üzerindeki mil tutma aparatına yerleştirilmiştir. Bu sensörün alt kısmında laboratuar personeli tarafından tasarlanmış ve imal edilmiş olan bilgisayar kontrollü döner tabla yer almaktadır. En altta ise tüm sisteme zemin olan sabit tabla yer almaktadır (Şekil 4). Kuvvet ölçümlerindeki örnekleme oranı 2000 Hz, örnek alma süresi ise 30 s'dir. Gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonucunda $\overline{C_D}$ ile $\overline{C_L}$ değerlerine ait belirsizlik değerinin %68.7 güven aralığı için aynı ve ±0.04 olduğu hesaplanmıştır (UKAS, 2024).

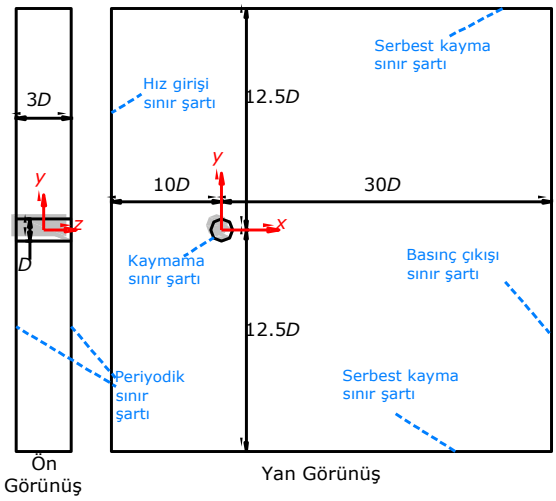
Deneysel çalışmada, yüksek Re değerlerine erişebilmek adına model çaplarının yüksek tutulması neticesinde blokaj oranı kabul edilebilir değerin üzerinde çıkmıştır. Bunu telafi edebilmek adına, deneysel yolla elde edilen direnç ve kaldırma kuvvetlerinden hesaplanan zaman-ortalamalı direnç ve kaldırma katsayılarına ($\overline{C_{D-Den}}$ ve $\overline{C_{L-Den}}$) Allen & Vincenti (1944) tarafından önerilen aşağıdaki düzeltmeler uygulanmıştır.

$$\frac{\overline{C_D}}{\overline{C_{D-Den}}} = 1 - 0.5 \cdot \overline{C_{D-Den}} \cdot \left(\frac{D}{H}\right) - 2.5 \cdot \left(\frac{D}{H}\right)^2 \tag{11}$$

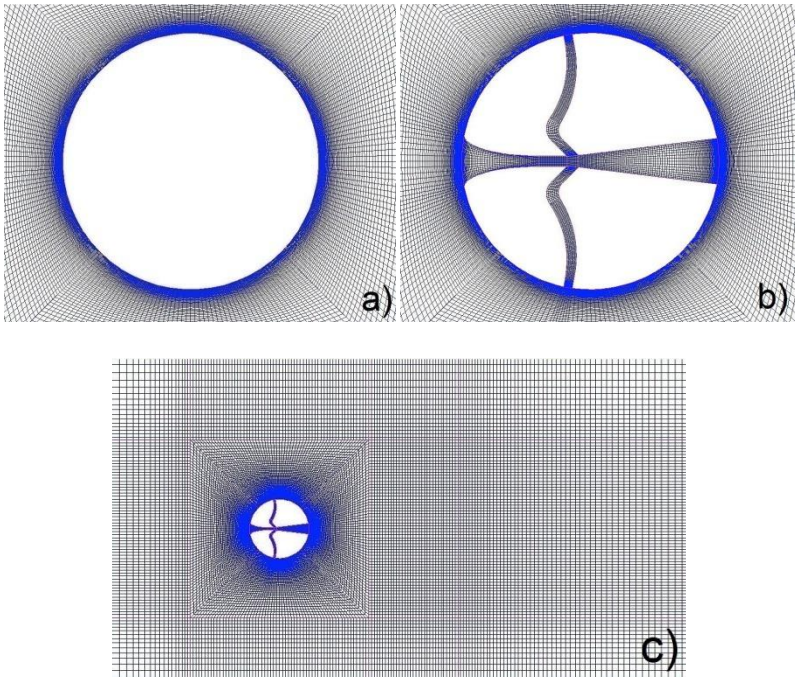
$$\frac{\overline{C_L}}{\overline{C_{L-Den}}} = 1 - 0.5 \cdot \overline{C_{L-Den}} \cdot \left(\frac{D}{H}\right) - 2.5 \cdot \left(\frac{D}{H}\right)^2 \tag{12}$$

2.4. Sayısal yöntemler
2.4. Numerical methods

Modeller etrafındaki akışın benzetimi üç-boyutlu bir hesaplama bölgesi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen prizması şeklindeki hesaplama bölgesinin geometrisine ait detaylar ve sınır şartları Şekil 5'te sunulmuştur. Modellerin merkezi, hız girişi sınır şartının atandığı ön yüzeyden 10D mesafe geride, serbest kayma (free-slip) sınır şartının atandığı üst ve alt yüzeylere eşit ve 12.5D mesafede, basınç çıkışı sınır şartının atandığı arka yüzeyden ise 30D mesafe ileridedir. Bu durumda blokaj oranı %4 olmaktadır ve çoğu sayısal çalışmanınkinden daha düşük olarak alınmıştır (Prsic vd., 2014; Lloyd & James, 2016). Modeller üzerine kaymama (no-slip) sınır şartı atanmıştır. Yanal yüzeylere ise periyodik sınır şartı atanmıştır. Modellerin genişlikleri eşit ve 3D'dir. Bu mesafe literatürle uyum içerisindedir (Cheng vd., 2017).



Şekil 5. Hesaplama bölgesi geometrisi ve sınır şartları.
Figure 5. *Computational domain geometry and boundary conditions.*



Şekil 6. Modellerin yakın ve uzak çevresindeki yapılandırılmış ağların yandan görünümleri: a) DM civarında, b) PVAM civarında, c) PVAM yakın art izinde.
Figure 6. *Side views of structured meshes in the near and far vicinity of the models: a) Near the DM, b) near the PVAM, and c) in the near wake of PVAM.*

Hesaplama bölgesi, yapılandırılmış altı yüzlü ağlarla donatılma maksatlı çeşitli sayıda bloklara bölünmüştür (Şekil 6). Bu işlem esnasında türbülans modeli olarak seçilen büyük burgaç benzetiminin (LES) duvar çözünürlüğü şartları ($\Delta x^+\approx40$, $\Delta y^+\approx1$ ve $\Delta z^+\approx20$) büyük oranda yerine getirilmiştir (Ansys, 2013b). Mevcut çalışmada $\Delta x^+\approx28$, $\Delta y^+\approx1$ ve $\Delta z^+\approx107$'dir.

Modeller etrafındaki daimi olmayan sıkıştırılamaz akışın benzetiminde LES türbülans modeli kullanılmıştır. Süreklilik ve momentum denklemlerinin, karakteristik uzunluğu $\Delta=(\Delta x\cdot\Delta y\cdot\Delta z)^{1/3}$ olan kapalı uzaysal filtre ile filtrelenmiş formları sırasıyla aşağıda verilmiştir (Kim & Menon, 1999).

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{13}$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\tilde{P}}{\rho}\delta_{ij} + \tau_{ij}\right) + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j\, \partial x_j} \tag{14}$$

Ağ-altı ölçek modeli olarak WALE (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity) tercih edilmiştir (Nicoud & Ducros, 1999). Birçok akış türü için tatmin edici sonuçlar vermesinden dolayı WALE sabitinin (C_W) değeri 0.325 olarak atanmıştır. Sayısal çalışmada kullanılan çözücüye dair diğer detaylar Tablo 1'de sunulmuştur. Teorik detaylara ise (Ansys, 2013a; Ansys, 2013b) referanslarından erişilebilir.

Tablo 1. Sayısal çalışmadaki çözücü detayları.
Table 1.*Solver details in the numerical study.*

Ayar yeri	Kullanılan algoritma ve/veya değeri
Çözücü	Basınç-tabanlı algoritma
Türbülans modeli	LES (Large eddy simulation)
Ağ-altı ölçek modeli	WALE (C_W=0.325)
Basınç-hız bağlaşımı	PISO (Pressure-Implicit with splitting of operators)
Gradyan şeması	Ağ-tabanlı en küçük kareler (Least squares cell based)
Basınç ayrıklaştırması	İkinci derece
Momentum ayrıklaştırması	Sınırlandırılmış merkezi farklar (Bounded central differencing, BCD)
Zaman ayrıklaştırması	Sınırlandırılmış ikinci dereceden kapalı (Bounded second order implicit)
Zaman adımı boyutu	0.000012 s
İç iterasyon sayısı	6-8

Tablo 2. Mevcut sayısal çalışmanın diğer deneysel ve sayısal çalışmalarla kıyası.
Table 2. *Comparison of the present numerical study with other experimental and numerical studies.*

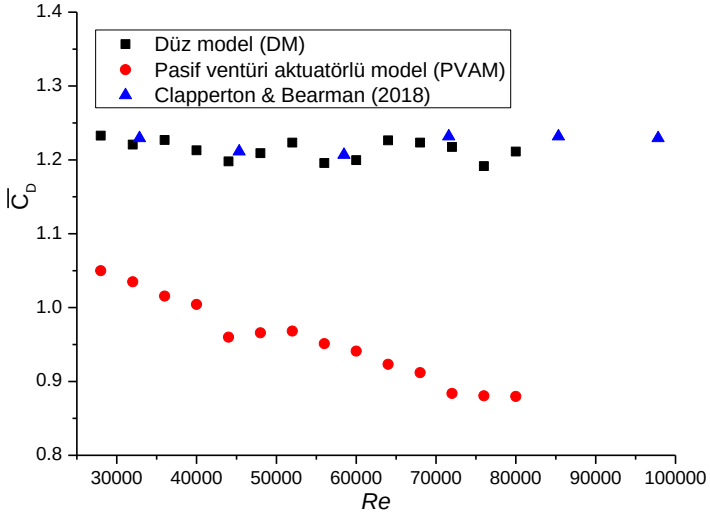
Referans	Re	$\%Tu_x$	$\overline{C_D}$	$C_{L\text{-}KOK}$	St
Gao vd. (2020); Deneysel	26600	0.40	1.22	0.46	0.201
Gao vd. (2022); Deneysel	32000	0.37	1.19	0.54	0.217
Yu vd. (2023); Deneysel	32000	0.40	1.12	0.36	0.222
Fırat vd. (2023); Sayısal (SAS)	32000	0.20	1.16	0.52	0.211
Mevcut çalışma; Deneysel	36000	0.50	1.24	-	0.207
Mevcut çalışma; Sayısal (LES)	36000	0.50	1.26	0.67	0.185
Norberg (2003); Ampirik	36000	-	-	0.49	0.190
Clapperton & Bearman (2018); Deneysel	40000	0.15	1.24	-	0.193
Gu vd. (2012); Deneysel	50000	0.10	1.18	0.47	0.207
Xu vd. (2020); Sayısal (LES)	50000	-	1.23	0.65	0.210

Sayısal çalışmalar Re=36000 değerinde ve sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırma yapan Ansys Fluent 18.2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada kullanılan hava özellikleri (ρ=1.186 kg/m^3 ve μ=0.00001842 kg/m-s), deneysel çalışmada ölçülenle aynı değerlere sahiptir. Sayısal çalışmada hız girişi sınır şartına atanan serbest akım hız değeri 9.47 m/s, türbülans şiddeti %0.5 ve türbülans viskozite oranı da 0.7 olarak atanmıştır (Altair Engineering, 2024). Benzetim, türbülansın akış içerisindeki gelişimini büyük ölçüde tamamlaması adına, ilk olarak, 0.0001 s zaman adım boyutu ile 20000 zaman adımı koşturulmuştur (toplam 2 s). Sonrasında, hem CFL sayısının maksimum değerini 1 civarında tutabilmek hem de kullanılması gereken zaman adımı boyutuna geçişi sağlıklı bir şekilde tamamlayabilmek adına 0.000012 s zaman adımı boyutu ile 10000 zaman adımı daha koşturulmuştur (toplam 2.12 s). Son olarak, akışla ilgili karakteristiklerin zaman-ortalamalı

değerlerini elde edebilmek adına 0.000012 s zaman adımı boyutu ile 80000 zaman adımı daha koşturulmuştur (toplam 3.08 s). Bu son koşu modellerin art izinde 30 çevri dökülme süresinden daha fazla bir süreye tekabül etmektedir ve bu da zaman-ortalamalı istatistik elde etmek için yeterlidir. Her bir zaman adımının kalıntı değere dayalı yakınsama kriteri, süreklilik denklemi için 10^{-3} ve hız bileşenleri için 10^{-6} olarak belirlenmiştir. Benzetimler 40 çekirdekli bir iş istasyonunda paralel işlem yapılarak gerçekleştirilmiştir. En düşük zaman adımı boyutu ile gerçekleştirilen benzetimin 1 saniyesi 6-8 günde tamamlanabilmiştir.

2.5. Geçerleme
2.5. Validation

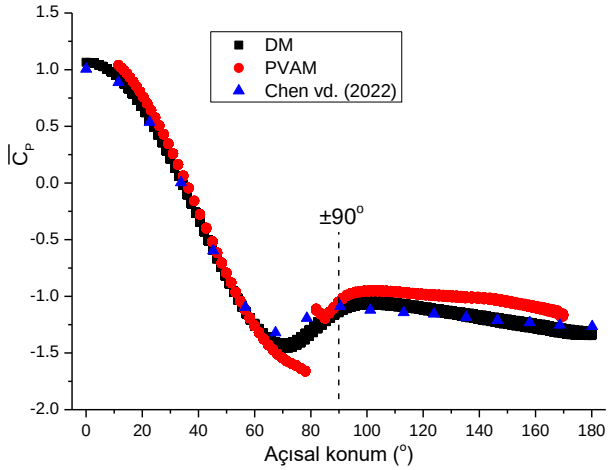
Eldeki hesaplama kaynaklarının ve kullanım süresinin kısıtlı olmasından dolayı sayısal yöntemin doğrulanması (verification) gerek ağdan bağımsızlık gerek de zamandan bağımsızlık şeklinde gerçekleştirilememiştir. DM ve PVAM etrafındaki akışın benzetiminde kullanılan ağ sayıları, sırasıyla, 3424800 ve 3697200'dür. Bunun yanında, her iki model için CFL sayısının hesaplama bölgelerinin %95'inin üzerinde kalacak şekilde 1 değerinden düşük tutulmuş olması, model yüzeylerinde $\Delta x^+ \leq 40$ ve $\Delta y^+ \leq 1$ değerlerinin sağlanmış olması ve ağ geçiş oranlarının 1.2'den büyük olmayacak şekilde tasarlanmış olması durumlarına dayanarak mevcut sayısal modelin yeterince düşük bir hata ile akış benzetimini gerçekleştireceği öngörülmüştür. Yapılan geçerleme çalışması sonuçları bu öngörümüzü doğrular niteliktedir (Tablo 2). Tabloda, $\overline{C_D}$ değerinin hafifçe yüksek tahmin edildiği, $C_{L\text{-}KOK}$ değerinin biraz yüksek tahmin edildiği, St değerinin ise hafifçe düşük tahmin edildiği açıktır.



Şekil 7. Deneysel olarak elde edilen zaman-ortalamalı direnç katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimleri. Clapperton & Bearman'ın (2018) deneysel çalışmasından alınan $\overline{C_D}$ verileri de mevcut deneysel sistemin geçerlemesi için grafiğe eklenmiştir.
Figure 7. *Variations of the experimentally obtained time-averaged drag coefficients with Reynolds number. The* $\overline{C_D}$ *data from the experimental work of Clapperton & Bearman (2018) are also plotted to validate the present experimental system.*

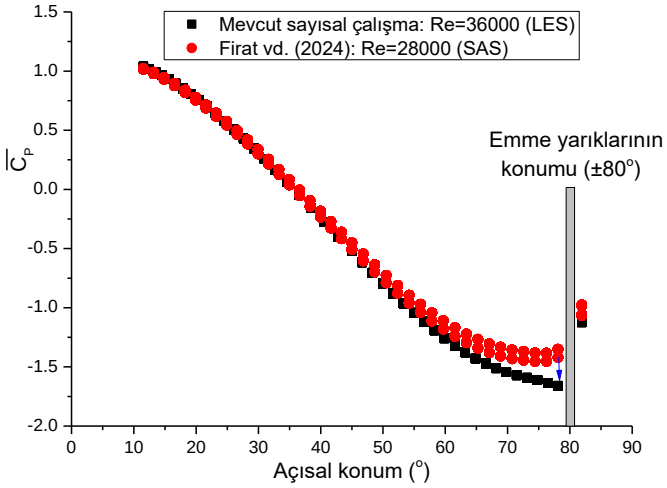
3. Bulgular ve tartışma
3. Results and discussion

Düz modele (DM) ve pasif venturi aktuatörlü modele (PVAM) etkiyen zaman-ortalamalı direnç katsayılarının, $\overline{C_D}$, çapa-dayalı Reynolds sayısına, Re, göre değişimleri Şekil 7 içerisinde verilmiştir. Literatürden, düz dairesel silindirik modele ait $\overline{C_D}$ değerinin alt kritik bölgede yaklaşık Re>10000 için 1.2 civarında sabit kaldığı bilinmektedir. Şekilde ilk göze çarpan durum, mevcut deneysel sistem ile elde edilen $\overline{C_D}$ değerlerinin de 1.2 civarında olduğudur. Dahası, mevcut $\overline{C_D}$ değerleri Clapperton & Bearman'ınkilerle (2018) oldukça uyumludur. Bu da mevcut kuvvet ölçüm sistemin sağlıklı ölçümler aldığını göstermektedir. Diğer göze çarpan ve konuyla direkt alakalı olan durum ise PVAM'ye etkiyen $\overline{C_D}$'nin artan Re ile neredeyse doğrusal olarak azalmasıdır. Test edilen Re aralığı için PVA kullanılarak $\overline{C_D}$ değerindeki en yüksek düşüş Re=80000 değerinde ve %27.3 olarak elde edilmiştir. Bu azalmanın nedenlerini ortaya çıkarmak için yeterli deneysel ve sayısal sistem altyapısı bulunmadığından hem literatür hem de mevcut sayısal çalışmadan faydalanılarak çıkarımlarda bulunulacaktır.



Şekil 8. Sayısal olarak elde edilen zaman-ortalamalı basınç katsayılarının açısal konum ile değişimleri. Chen vd.'nin (2022) Re=38000 değerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmasından alınan $\overline{C_P}$ verileri de mevcut sayısal çalışmanın geçerlemesi için grafiğe eklenmiştir.

Figure 8. *Variations of the numerically obtained time-averaged pressure coefficients with angular position. The* $\overline{C_P}$ *data from the experimental study of Chen et al. (2022) at Re=38000 were also added to the graph to validate the present numerical study.*



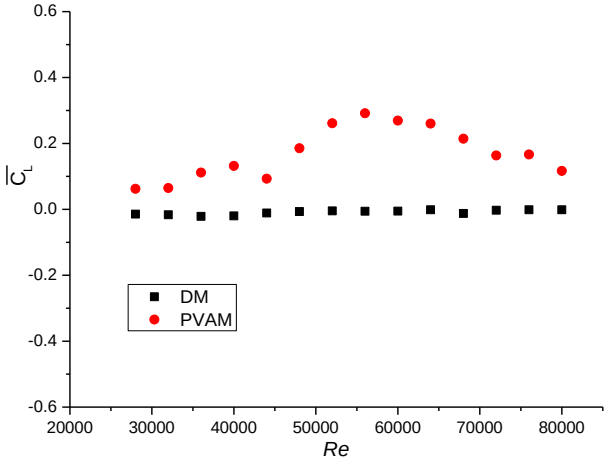
Şekil 9. Farklı Reynolds sayılarında PVAM'lerin yüzeylerindeki zaman ortalamalı basınç katsayısı dağılımları.

Figure 9. *Time-averaged pressure coefficient distributions on the surfaces of the PVAMs at different Reynolds numbers.*

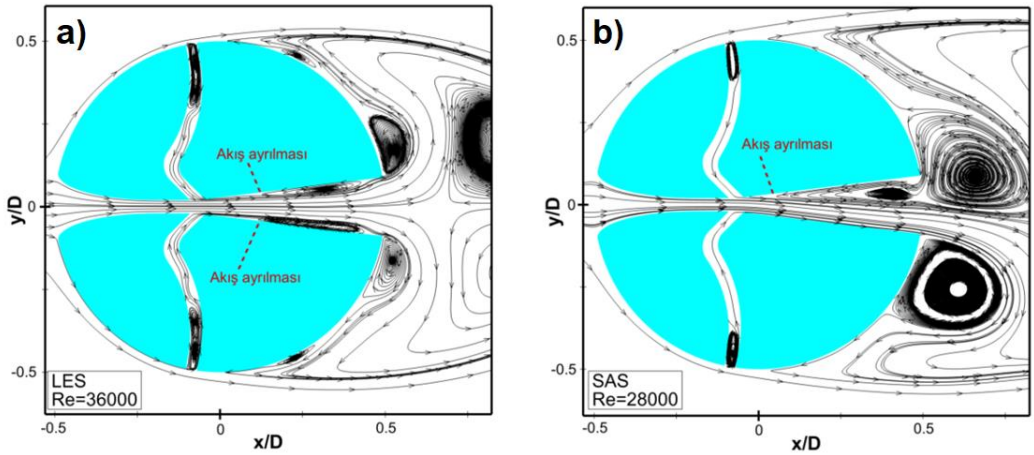
Şekil 8'de, HAD benzetiminden elde edilen DM ve PVAM çevresindeki zaman-ortalamalı basınç katsayısı dağılımları sunulmuştur. Şekil içerisinde, Re=36000 değerinde DM için gerçekleştirilen mevcut sayısal çalışmadan elde edilen $\overline{C_P}$ dağılımı ile Re=38000 değerinde Chen vd. (2022) tarafından deneysel olarak düz silindirik model üzerinde gerçekleştirilen çalışmadaki $\overline{C_P}$ dağılımının iyi bir uyum içerisinde olduğu açıktır. Buna ek olarak, PVAM'nin daha düşük bir $\overline{C_P}$ değerine sahip olması, hem ön yüzeydeki yüksek basıncın emme yarıkları sayesinde düşürebilmesinden (±65°'den ±80°'ye kadar) hem de arka kısımdaki düşük basıncın daralan-genişleyen eksenel yarık sayesinde arttırabilmesinden (±90°'den ±170°'ye kadar) kaynaklanmaktadır (Şekil 8). Bu durum, Firat vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmadaki veriler ve açıklamalar ile uyuşmaktadır. Emme yarıkları öncesi açısal konumlardan yarık sonrası açısal konumlara geçildiğinde PVAM'nin $\overline{C_P}$ dağılımında bir sıçrama gözlemlenmiştir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Yarıklardan yapılan emme, model yüzeyinde gelişen sınır tabakanın alt kısmında yer alan düşük momentumlu kısmı ortadan kaldırmıştır. Kalkan kısmın yerini ise serbest akımla etkileşimde olan ve bu yüzen de daha yüksek momentuma sahip sınır tabakanın üst kısmı almıştır (Gad-el-Hak, 2000). Bu üst kısım ise temas ettiği yüzeye tutunurken basınçta ve sürtünme kuvvetinde bir artış meydana getirmiştir. Yüksek momentumlu bu üst kısım, aynı zamanda, model yüzeyinden ayrılmayı DM'ye göre 5° daha geciktirmiştir.

Artan Reynolds sayısı ile $\overline{C_D}$'deki azalma arasındaki bağlantıyı kurabilmek için Firat vd. (2024) tarafından Re=28000 değerinde gerçekleştirilen sayısal çalışmadaki PVA'lı modele ait $\overline{C_P}$ dağılımı ile Re=36000 değerinde gerçekleştirilen mevcut sayısal çalışmadaki PVA'lı modele ait $\overline{C_P}$ dağılımı kıyaslanmıştır (Şekil 9). Bu kıyaslama, model dış yüzeyi için ve 0°'den ±80°'ye kadar olan aralıkta yapılmıştır. Bunun esas nedeni, bu aralıkta model dış yüzeylerinde laminer sınır tabakanın yer alması ve herhangi bir ayrılmanın gerçekleşmemiş olmasından dolayı da oldukça doğru sonuçlar elde edilebilmesindendir. Şekil 9'da, Firat vd. (2024) tarafından model alt ve üst yüzeyinden elde edilen $\overline{C_P}$ dağılımlarının çakışık olmaması, model içindeki yatay eksene göre asimetrik olan akış yapısının model etrafındaki akışı da yatay eksene göre asimetrik hale getirmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 9'da Re'nin 28000'den 36000'e arttırılması sonucu ön yüzeydeki yüksek basıncın daha da düşürüldüğü görülmektedir. Bu düşüş $\overline{C_D}$ değerinde de düşüşe sebep olmaktadır. Bu düşüş yalnızca emme yarıklarından emilen akışkan debisinin artması sonucunda sağlanabilir. Artan Re ile emme yarığı debisinde gözlemlenen artış ise PVAM'nin boğaz kısmındaki basınç ile dış yüzeydeki basınç arasındaki farkın daha da açılmasıyla açıklanabilir.

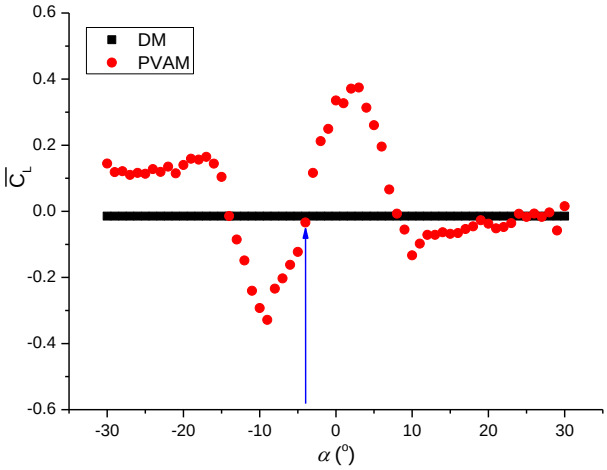
Diğer yandan, PVAM'nin boğaz kısmındaki basınç ile dış yüzeyindeki basınç arasındaki farkın açılması için eksenel yarığa artan Re ile daha fazla debide akışkan girmiş olması gerektiği çıkarımı yapılabilir. Bu akışkan ise arka açıklıktan jet olarak düşük basınç bölgesine yönelerek buradaki basınç değerini artan Re ile daha da arttıracaktır. Bu artış da $\overline{C_D}$ değerinde bir düşüşe sebep olacaktır. Yukarıdaki paragraf ile bu paragrafta açıklanan durumlar artan Re ile neden $\overline{C_D}$ değerinde bir düşüş yaşandığını makul bir şekilde ortaya koymaktadırlar.



Şekil 10. Deneysel olarak elde edilen zaman-ortalamalı kaldırma katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimleri.
Figure 10. *Variations of the experimentally obtained time-averaged drag coefficients with Reynolds number.*

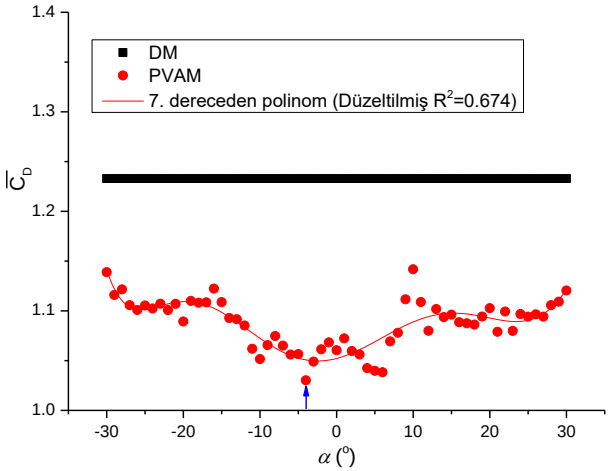


Şekil 11. Orta açıklıkta, z/D=0, zaman-ortalamalı akım çizgisi topolojisinin karşılaştırılması: a) LES türbülans modeli (Re=36000) ve b) SAS türbülans modeli (Re=28000; Firat vd., 2024)
Figure 11. *Comparison of time-averaged streamline topology at the midspan, z/D=0: a) LES turbulence model (Re=36000) and b) SAS turbulence model (Re=28000; Firat et al., 2024)*



Şekil 12. Deneysel olarak elde edilen zaman-ortalamalı kaldırma katsayılarının hücum açısı ile değişimleri.
Figure 12. *Variations of the experimentally obtained time-averaged lift coefficients with attack angle.*

İlgili modellere etkiyen zaman-ortalamalı kaldırma katsayılarının, $\overline{C_L}$, Re ile değişimleri ise Şekil 10 içerisinde verilmiştir. Şekilde, PVAM'ye etkiyen $\overline{C_L}$ değerinin DM'ye etkiyen ve yaklaşık olarak değeri sıfıra eşit olan $\overline{C_L}$ değerinden belirli bir oranda saptığı görülmektedir. Mevcut HAD benzetimi ile elde edilen PVA'lı modelin $\overline{C_L}$ değeri sıfıra oldukça yakın çıkmıştır. Bununla birlikte, kaldırma katsayısındaki bu sapmanın ana nedeninin PVA'nın difüzör kısmındaki akışın yatay eksene göre simetrik yapıda olmamasından kaynaklanabileceği söylenebilir (Şekil 11). Bu çıkarım, Fırat vd.'nin (2024) sayısal çalışmasına dayandırılmıştır. Bunun sebebi, bahsi geçen çalışmada, eksenel yarık difüzör kısmının tek yüzeyinden akış ayrılması gerçekleştiği gösterilmiş ve bunun da $\overline{C_L}$ değerini sıfırdan farklı bir değere kaydırdığı ifade edilmiştir (Şekil 11). Sonuç olarak, deneysel olarak elde edilen $\overline{C_L}$ değerlerinin hücum açısız durumda Re'den bağımsız olarak sıfırdan farklı bir değere sahip olmaları, difüzör kısmındaki tek taraflı akış ayrılmasına dayandırılmıştır.



Şekil 13. Deneysel olarak elde edilen zaman-ortalamalı direnç katsayılarının hücum açısı ile değişimleri.
Figure 13. *Variations of the experimentally obtained time-averaged drag coefficients with attack angle.*

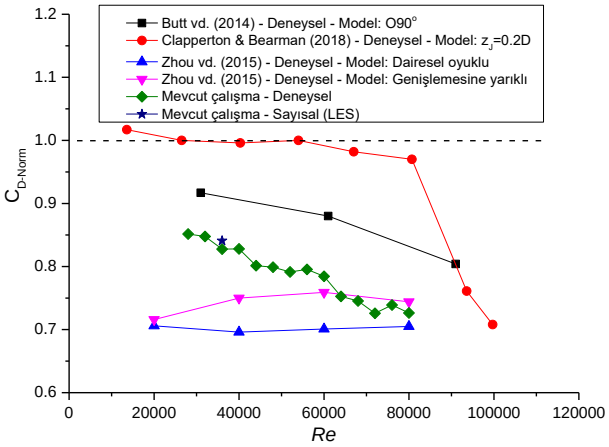
$\overline{C_L}$ dışında diğer bir önemli parametre de $C_{L\text{-}KOK}$ değeridir ve bu parametre yalnızca sayısal olarak elde edilebilmiştir. Bu değerin yüksek olması malzemeye kaldırma doğrultusunda etkiyen dinamik kuvvetin daha büyük genliğe sahip olduğunu ifade eder ki bu da genellikle istenmeyen bir durumdur. DM ve PVAM için bu değerler Re=36000 değerinde, sırasıyla, 0.684 ve 0.406 olarak elde edilmiştir. Bu da PVA'nın $C_{L\text{-}KOK}$ değerini iyi bir oranda düşürdüğünü göstermektedir. Dahası, PVA, $C_{D\text{-}KOK}$ değerinin de ciddi bir oranda (%41) düşmesine sebep olmuştur.

Şekil 12'de verilen, yatay eksene göre simetrik bir model olan PVAM'ye ait $\overline{C_L}$ değerlerinin 0°'lik hücum açısına (α) göre simetrik bir dağılım sergilememeleri tek taraflı akış ayrılması görüşünü desteklemektedir. Buradan, türbülans şiddetinin düşük olduğu yerlerde hızlı bir şekilde daimi ya da daimi olmayan Reynolds-

ortalamalı Navier-Stokes moduna geçiş yapabilen SAS türbülans modelinin eksenel yarık içerisindeki akış davranışını, benzer ağ sayısı için, LES'e göre daha doğru tahmin edebildiği söylenebilir. Şekil 12'deki dağılımda, yaklaşık α=-4° olduğu durumda $\overline{C_L}$=0 olmuştur. $\overline{C_L}$ değerleri -4°'nin ±14° bandında α ile keskin bir değişim sergilemelerine rağmen bu bandın dışında hafif bir değişim sergilemişlerdir. Bu bandın dışındaki $\overline{C_L}$ değerleri arasında oluşmaması beklenen fakat bir şekilde oluşan farkın ne ile ilgili olabileceğine dair bir yaklaşımda bulunulamamıştır. Hücum açısının ±8° gibi düşük bir bantta değiştirilmesi sayesinde $\overline{C_L}$, ±0.4 gibi bir değere ulaşabilmektedir.

Diğer yandan, $\overline{C_L}$ değerinin yaklaşık 0 olduğu α=-4° hücum açısında $\overline{C_D}$ değeri de minimum değerine erişmiştir (Şekil 13). Bu da, PVA'nın direnç performansının en iyi olduğu durumun hücum açısıza denk düştüğünü göstermektedir. Diğer bir deyişle, PVA içindeki yatay eksene göre asimetrik akış yapısının simetriğe dönmesi durumu $\overline{C_D}$ değerini minimuma düşürmüştür. Şekil 13'te $\overline{C_D}$ ile alakalı gözlemlenen diğer bir durum ise test edilen hücum açısı aralığında, PVAM'ye etkiyen direncin DM'ninkinin altında kalmış olmasıdır. Bu da, ilgili pasif kontrol yönteminin ±30° hücum açısı bandında iyi bir direnç performansı sergilediğini göstermektedir.

Mevcut akış kontrol yönteminin direnç performansını benzer Reynolds sayısı aralığında test edilen diğer bazı akış kontrol yöntemleriyle kıyaslamak için normalleştirmeden faydalanmak gerekmektedir. Zaman-ortalamalı direnç katsayısının normalleştirilmiş hali, $C_{D\text{-}Norm}$, ilgili araştırmacılar tarafından ilgili Re değerinde akış kontrol yöntemi uygulanmış modelin $\overline{C_D}$ değerinin uygulanmamış modelin (düz silindir) $\overline{C_D}$ değerine oranlanmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 14. Deneysel olarak elde edilen zaman-ortalamalı direnç katsayılarının hücum açısı ile değişimleri.
Figure 14. *Variations of the experimentally obtained time-averaged drag coefficients with attack angle.*

Şekil 14 içerisinde, Clapperton & Bearman (2018) tarafından deneysel olarak test edilen pasif jetlerin, Butt vd. (2014) tarafından deneysel olarak test edilen dışa çıkıntılı altıgen şekilli yüzey desenlerinin (O90°), Zhou vd. (2015) tarafından deneysel olarak test edilen dairesel oyukların ve genişlemesine yarıkların $C_{D\text{-}Norm}$ değerleri ile hem deneysel hem de sayısal olarak test edilen PVA'nın $C_{D\text{-}Norm}$ değerleri kıyaslanmıştır. Grafikte, dışa çıkıntılı altıgen şekilli yüzey desenlerinin uygulandığı silindirik modelin $\overline{C_D}$ değerinin de PVA uygulanmış silindirik model (PVAM) gibi artan Re ile birlikte düştüğü fakat bunu PVA kadar başarılı gerçekleştiremediği görülmüştür. Silindirik yüzey oyukları ve boylamasına oyuklar uygulanan silindirik modellerin $\overline{C_D}$ değerinin Re'den neredeyse bağımsız olduğu, PVA'lı modelin ise Re=80000 civarında bu pasif akış kontrol yöntemlerinin direnç performansına eriştiği tespit edilmiştir. Diğer yandan, pasif jetlerin Re=80000 civarına kadar direnç performanslarının düşük olduğu fakat Re>80000 için ciddi bir direnç performansı dundukları da gözlemlenmiştir. Daha yüksek Re için testler gerçekleştirilememiş olsa da artan Re ile birlikte, en azından kritik Re değerine kadar (≈200000) PVA'nın $\overline{C_D}$'yi daha da düşüreceği öngörülmektedir.

4. Sonuçlar
4. Conclusions

Bu çalışma, henüz yeni tasarlanan ve pasif Venturi aktuatörü (PVA) olarak isimlendirilen bir pasif akış kontrol yönteminin aerodinamik karakteristikler (direnç katsayısı, kaldırma katsayısı) üzerindeki etkisini henüz test edilmemiş olan Reynolds sayısına (Re) ve hücum açısına (α) bağlı olarak ortaya çıkarmaktır. Bu çalışmada,

PVA uygulanmış (PVAM) ve uygulanmamış (Düz model, DM) modeller hücum açısız durumda (α=0°) bir Reynolds sayısı aralığı (28000≤Re≤80000) için ve Re=28000 durumunda bir hücum açısı aralığı (-30°≤α≤+30°) için aerodinamik açıdan kıyaslamalı olarak rüzgar tünelnde test edilmişlerdir. Rüzgar tüneli ile elde edilemeyecek olan bazı durumları aydınlatmak adına Re=36000 ve α=0° durumunda bir HAD benzetimi de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, aşağıda, maddeler halinde verilmiştir.

● PVA'nın zaman-ortalamalı direnç katsayısını, $\overline{C_D}$, düşürme konusundaki performansı artan Re ile daha da artmakta, Re=80000 değerinde bu oran %27'lere ulaşmaktadır. Dahası, test edilen Re aralığı için PVAM'ye ait $\overline{C_D}$ değeri DM'ye ait değerin üzerine hiç çıkmamaktadır. PVA'nın bu başarısı, emme yarıklarından çekilen akışkanın debisinin artan Re ile daha da artması ve bu artışın da ön yüzeyde daha fazla basınç düşüşü yaratmasıyla ilgili olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında, model eksenel yarığından geçen akışkan debisinin artan Re ile artması sayesinde model arka yüzeyindeki düşük basıncın daha da yükselmesinin de $\overline{C_D}$'deki düşüşe katkı sağladığı belirtilmiştir.

● Test edilen α aralığı için PVAM'ye ait $\overline{C_D}$ değeri DM'ye ait değerin üzerine hiç çıkmamaktadır. Bu da PVA'nın geniş bir hücum açısı aralığı için iyi bir direnç performansı sergilediğini göstermektedir.

● Re=100000 civarına kadar direnç performansları test edilmiş olan bazı pasif akış kontrol yöntemlerine kıyasla PVA'nın direnç performansının iyi bir noktada olduğu belirlenmiştir.

● Test edilen PVAM, içerisinde akış ayrılması gerçekleşecek kadar geniş bir difüzör açısına (14°) sahip olmasından dolayı hücum açısız durumda bile zaman-ortalamalı kaldırma katsayısı, $\overline{C_L}$, değeri sıfırdan farklı olmaktadır. Test edilen Re aralığında, hücum açısı sıfır olmasına rağmen $\overline{C_L}$ değeri sıfırdan farklıdır. Dahası, düşük hücum açısı aralığındaki değişimler PVAM'nin ciddi bir $\overline{C_L}$ oluşturmasına sebep olmaktadır.

Bu çalışmadan sonra, PVA'lı modellerle ilgili olarak yapılması planlanan çalışmalarda ise aşağıdaki hususların ele alınması planlanmaktadır.

● Mevcut çalışmada emme yarıklarının açısal konumu ±80°'de sabit tutulmuştur. Farklı yarık açısal konumlarının aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkileri incelenmek üzere ele alınacaktır.

● PVA'lı modelin ön kısmındaki giriş ağzının yüksekliğinin (12 mm) boğaz kısmının yüksekliğine (2.4 mm) oranı 5'tir. Bu oranın farklı değerlerinin aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkileri incelenmek üzere ele alınacaktır.

● Mevcut çalışmadaki emme yarıkları 2mm'lik sabit genişliğe sahiptir. Farklı yarık genişliklerinin aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkileri incelenmek üzere ele alınacaktır.

Semboller
Symbols

A_F : Dairesel silindirin ön görünüş alanı [m^2]
A_S : Yarık içinde akan akışkan doğrultusuna dik yarık kesit alanı [m^2]
C_D : Direnç katsayısı [-]
$C_{D\text{-}Den}$: Blokaj düzeltmesi uygulanmamış direnç katsayısı [-]
$C_{D\text{-}KOK}$: Direnç katsayısı değerlerinin karelerinin ortalamalarının karekökü [-]
$C_{D\text{-}Norm}$: Normalleştirilmiş direnç katsayısı [-]
CFL : Courant-Friedrichs-Lewy sayısı
C_L : Kaldırma katsayısı [-]
$C_{L\text{-}Den}$: Blokaj düzeltmesi uygulanmamış kaldırma katsayısı [-]
$C_{L\text{-}KOK}$: Kaldırma katsayısı değerlerinin karelerinin ortalamalarının karekökü [-]
C_P : Basınç katsayısı [-]
C_Q : Hacimsel debi katsayısı [-]
D : Silindir çapı [m]
f : Çevri dökülme frekansı [Hz]
F_D : Direnç kuvveti [N]
F_L : Kaldırma kuvveti [N]

H : Test bölgesi genişliği [m]
n : Hesaplamaya katılan toplam anlık değer sayısı [-]
P : Statik basınç [Pa]
t : Zaman [s]
Tu_x : Serbest akım türbülans şiddeti [-]
Re : Reynolds sayısı [-]
U_∞ : Tünel test bölgesi içerisindeki serbest akım hızı [m/s]
U : Hız [m/s]
V : Yarık içinde akan akışkan hızı [m/s]
x : Akış doğrultusu [m]
y : Akışa dik doğrultu [m]
z : Genişlik doğrultusu [m]
α : Hücum açısı [°]
δij : Kronecker delta
ΔP : Model yüzeyinde ve serbest akım içerisinde bulunan noktalar arasındaki basınç farkı [Pa]
Δt : Zaman adımı boyutu [s]
Δx : x'deki ağ boyutu [m]
Δx^+ : Yüzey üzerindeki ağın akış doğrultusundaki boyutsuz uzunluğu [-]
Δy : y'deki ağ boyutu [m]
Δy^+ : Yüzey üzerindeki ağın akışa dik doğrultudaki boyutsuz yüksekliği [-]
Δz : z'deki ağ boyutu [m]
Δz^+ : Yüzey üzerindeki ağın genişlik doğrultusundaki boyutsuz genişliği [-]
ε : Yüzde hata [-]
μ : Hava viskozitesi [kg/m-s]
ν : Hava kinematik viskozitesi [m^2/s]
ρ : Hava yoğunluğu [kg/m^3]
τ_{ij} : Çözümlenemeyen ağ-altı ölçeği (sub-grid scale) gerilme tensörü [m^2/s^2]
$\overline{...}$: Zaman-ortalaması alma operatörü
$\widetilde{...}$: Uzaysal filtreleme operatörü

Yazar katkısı
Author contribution

Erhan FIRAT: Konunun kavramsallaştırılması, Literatür taraması (%50), Makalenin yazılması (%50), Makalenin gözden geçirilmesi ve yeniden düzenlenmesi (%50), Sayısal çalışmaların gerçekleştirilmesi, Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi (%50), Veri analizi (%50). Mehmet SEYHAN: Literatür taraması (%50), Makalenin yazılması (%50), Makalenin gözden geçirilmesi ve yeniden düzenlenmesi (%50), Test modellerinin imal ettirilmesi, Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi (%50), Veri analizi (%50).

Etik beyanı
Declaration of ethicalcode

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

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Allen, H. J., & Vincenti, W. G. (1944). *Wall interference in a two-dimensional-flow wind tunnel, with consideration of the effect of compressibility*. NACA, 1944, Report No 782. https://ntrs.nasa.gov/citations/19930091861

Altair Engineering, Inc. (2024, February 2). *Inlet turbulence parameters.* https://help.altair.com/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/training_manual/inlet_turb_params_r.htm

Akbıyık, H., & Akansu, Y. E. (2021). Effective flow control around a circular cylinder by using both a splitter plate and plasma actuators as passive and active control methods. *Journal of Thermal Science and Technology, 41*(1), 133-140. https://doi.org/10.47480/isibted.979377

Aksoy, M. H. (2024). Flow characteristics and passive flow control of circular cylinders with triangular vortex generators: An experimental investigation. *Applied Ocean Research, 142*, 103836. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103836

ANSYS, Inc. (2013a). ANSYS Fluent User's Guide, Release 15.0 [PDF slides]

ANSYS, Inc. (2013b). ANSYS Fluent Theory Guide, Release 15.0 [PDF slides]

Butt, U., Jehring, L., & Egbers, C. (2014). Mechanism of drag reduction for circular cylinders with patterned surface. *International Journal of Heat and Fluid Flow,45*, 128-134. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.10.008

Cheng, W., Pullin, D. I., Samtaney, R., Zhang, W., & Gao, W. (2017). Large-eddy simulation of flow over a cylinder with $Re=3.9\times10^3$ to 8.5×10^5: a skin-friction perspective. *Journal of Fluid Mechanics, 820*, 121-158. https://doi.org/10.1017/jfm.2017.172

Chen, W.-L., Min, X.-W., & Guo, Y.-J. (2022). Performance of seal vibrissa-inspired bionic surface in suppressing aerodynamic forces and vortex shedding around a circular cylinder. *Ocean Engineering, 260*, 112032. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112032

Clapperton, B. L., & Bearman, P. W. (2018). Control of circular cylinder flow using distributed passive jets *Journal of Fluid Mechanics, 848*, 1157-1178. https://doi.org/10.1017/jfm.2018.399

Darabasz, T. Bonnavion, G., Cadot, O., Goraguer, Y., & Borée, J. (2023). Drag reduction using longitudinal vortices on a flat-back Ahmed body. *Experiments in Fluids, 64*, 20. https://doi.org/10.1007/s00348-022-03555-x

Fırat, E., Seyhan, M., & Sarıoğlu, M. (2023). SAS türbülans modeli performansının bazı dış akış durumları için kıyaslamalı incelenmesi. Çoğun, H., Parlar, İ., & Üzmuş, H. (Editörler). *Doğa ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar 8*, (ss. 77-92), Bilgin Kültür Sanat Yayınları. https://www.bidgecongress.org/wp-content/uploads/2023/07/Doga-ve-Muhendislik-Bilimlerinde-Guncel-Tartismalar-8-11.pdf

Firat, E., Seyhan, M., & Ozkan, G. M. (2024). Aerodynamic drag improvements on a circular cylinder using passive Venturi actuators. *Physics of Fluids, 36*, 025168. https://doi.org/10.1063/5.0188890

Gad-el-Hak, M. (2000). *Flow Control: Passive, Active and Reactive Flow Management* (1st ed.). Cambridge University Press.

Galvao, R., Lee, E., Farrell, D., Hover, F., Triantafyllou, M., Kitney, N., & Beynet, P. (2008). Flow control in flow-structure interaction. *Journal of Fluids and Structures, 24*(8), 1216-1226. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2008.07.006

Gao, D., Chang, X., Tursuntohti, V, Yu, H., & Chen, W.-L. (2022). Modification of subcritical cylinder flow with an upstream rod. *Physics of Fluids, 34*, 015107. https://doi.org/10.1063/5.0075167

Gao, D.-L., Chen, G.-B., Huang, Y.-W., Chen, W.-L., & Li, H. (2020). Flow characteristics of a fixed circular cylinder with an upstream splitter plate: On the plate-length sensitivity. *Experimental Thermal and Fluid Science, 117*, 110135. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110135

Gu, F., Wang, J. S., Qiao, X. Q., & Huang, Z. (2012). Pressure distribution, fluctuating forces and vortex shedding behavior of circular cylinder with rotatable splitter plates. *Journal of Fluids and Structures, 28*, 263–278. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.11.005

Kim, W.-L. & Menon, S. (1999). An unsteady incompressible Navier–Stokes solver for Large Eddy Simulation of turbulent flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids, 31*, 983-1017. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0363(19991130)31:6%3C983::AID-FLD908%3E3.0.CO;2-Q

Lloyd T. P., & James, M. (2016). Large eddy simulations of a circular cylinder at Reynolds numbers surrounding the drag crisis. *Applied Ocean Research, 59*, 676-686. https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.11.009

Lin, Y. F., Bai, H. L., Alam, M. M., Zhang, W. G., & Lam, K. (2016). Effects of large spanwise wavelength on the wake of a sinusoidal wavy cylinder. *Journal of Fluids and Structures, 61*, 392-409. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.12.004

Nicoud, F., & Ducros, F. (1999). Subgrid-Scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow, Turbulence and Combustion, 62*, 183-200. https://doi.org/10.1023/A:1009995426001

Norberg, C. (2003). Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. *Journal of Fluids and Structures, 17*, 57–96. https://doi.org/10.1016/S0889-9746(02)00099-3

Prsic, M. A., Ong, M. C., Pettersen, B., & Myrhaug, D. (2014). Large Eddy Simulations of flow around a smooth circular cylinder in a uniform current in the subcritical flow regime. *Ocean Engineering, 77*, 61-73. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.10.018

Seyhan, M., & Fırat, E. (2022). Yan rüzgar koşullarında ön kısmı düz plakalı bir otobüs modeli üzerindeki aerodinamik direncin düşürülmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11*(4), 1163-1171. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1141511

Tunay, T. (2023a). Large Eddy Simulation of the Biased Wake Flow Downstream of Circular Cylinders with a Slit. *OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 6*(2), 1481-1499.

Tunay, T. (2023b). Numerical Investigation of the Passive Flow Control Around a Circular Cylinder. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38*(1), 243-252.

UKAS (2024). The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement (M3003), Edition 5 [PDF Slides] https://www.ukas.com/wp-content/uploads/2023/05/M3003-The-expression-of-uncertainty-and-confidence-in-measurement.pdf

Xu, F., Chen, W.-L., Duan, Z.-D., & Ou, J.-P. (2020). Large eddy simulation of passive jet flow control on the wake of flow around a circular cylinder. *Computers and Fluids, 196*, 104342. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2019.104342

Yemenici, O., & Kasap, H. (2023). Farklı girdap üreteçlere sahip bir aracın aerodinamiğinin sayısal incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12*(2), 581–587. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1232871

Yu, H., Gao, D., Chen, W.-L., & Deng, Z. (2023). Effects of a pair of adjacent rods on circular cylinder flow. *Journal of Visualization, 26*, 1037–1053. https://doi.org/10.1007/s12650-023-00919-1

Zheng, C., Sun, K., & Zhang, W. (2021). Effects of passive and combined aerodynamic control on the aerodynamic characteristics of an elliptical cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 218*, 104779. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104779

Zhou, B., Wang, X., Guo, W., Gho, W. M., & Tan, S. K. (2015). Experimental study on flow past a circular cylinder with rough surface. *Ocean Engineering, 109*, 7–13. http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.062

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 349-359 doi: 10.17714/gumusfenbil.1479429 Research Article

Investigation of mechanical properties of nano-graphene reinforced polymer composites

Nano-grafen takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi

Onur Kazım ATEŞ[1], Filiz KARABUDAK*[1], Hamid ZAMANLOU[2]

[1]*Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane*

[2]*Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25000, Erzurum*

• Received: 06.05.2024 • Accepted: 18.03.2025

Abstract

The demand for lightweight and durable materials in industries such as automotive, aerospace, and chemical engineering has driven research into advanced composite materials. This study investigates the interaction between nano-graphene and polymer matrices, focusing on how varying concentrations of nano-graphene can optimize mechanical properties and potentially revolutionize the design of structural components. Polymer composite materials were produced using glass fiber fabric and an epoxy resin system employing the hand lay-up method. Nano-graphene was incorporated into the matrix at weight percentages of 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1%.Notably, the addition of 1% nano-graphene resulted in a significant tensile strength increase, achieving a maximum value of 186.73 MPa, compared to the control group at 53.71 MPa. This enhancement is attributed to the improved stress transfer mechanisms facilitated by the nano-graphene's high surface area and exceptional mechanical properties. However, an unexpected decrease in bending strength was observed, with the glass fiber control group composites exhibiting the highest bending strength of 404.75 MPa. This trend suggests that while nano-graphene enhances tensile properties, it may introduce interfacial weaknesses or disrupt fiber alignment in bending scenarios. These findings reveal the complex nature of nano-graphene reinforcement, emphasizing the need for tailored formulations to balance tensile and bending performance. Further investigation into the interfacial bonding and distribution of nano-graphene within the polymer matrix is warranted to develop optimized composite materials for structural applications.

Keywords: Bending, Nano-graphene, Polymer Composite, Tensile

Öz

Otomotiv, havacılık ve kimya mühendisliği gibi sektörlerde hafif ve dayanıklı malzemelere olan talep, araştırmaları ileri kompozit malzemelere yönlendirmiştir. Bu çalışma, nano-grafen ve polimer matrisler arasındaki etkileşimi araştırarak, değişen nano-grafen konsantrasyonlarının mekanik özellikleri nasıl optimize edebileceğine ve yapısal bileşenlerin tasarımında potansiyel olarak devrim yaratabileceğine odaklanıyor. Polimer kompozit malzemeler, cam elyaf kumaş ve epoksi reçine sistemi ile elle yatırma yöntemi kullanılarak üretildi. Nano-grafen matrise %0,2, %0,4, %0,6, %0,8 ve %1 ağırlık yüzdelerinde dahil edildi. Özellikle %1 nano-grafen ilavesi, 53,71 MPa'lık kontrol grubuyla karşılaştırıldığında maksimum 186,73 MPa değerine ulaşarak önemli bir çekme mukavemeti artışıyla sonuçlandı. Bu gelişme, nano-grafenin yüksek yüzey alanı ve olağanüstü mekanik özelliklerinin kolaylaştırdığı gelişmiş stres transfer mekanizmalarına bağlanıyor. Ancak cam elyaf kontrol grubu kompozitlerinin en yüksek bükülme mukavemetini 404,75 MPa ile sergilemesiyle bükülme mukavemetinde beklenmedik bir azalma gözlendi. Bu eğilim, nano-grafenin gerilme özelliklerini artırırken, arayüzey zayıflıkları oluşturabileceğini veya bükme senaryolarında fiber hizalamasını bozabileceğini öne sürüyor. Bu bulgular, nano-grafen takviyesinin karmaşık doğasını ortaya koyuyor ve çekme ve bükülme performansını dengelemek için özel formülasyonlara duyulan ihtiyacı vurguluyor. Yapısal uygulamalar için optimize edilmiş kompozit malzemelerin geliştirilmesi için nano-grafenin polimer matris içindeki arayüzey bağlanması ve dağılımına ilişkin daha fazla araştırma yapılması garanti edilmektedir.

Anahtar kelimeler: *Eğme, Nano-grafen, Polimer kompozit, Çekme*

*Filiz KARABUDAK; filizkarabudak@gumushane.edu.tr

1. Introduction

High-performance polymer composite materials that have lower weight compared to metallic materials; It is widely used as a structural material in engineering applications under working conditions in the automotive, aerospace and chemical industries (Bhong et al., 2023). To ensure economic efficiency and safety, low specific gravity, unique mechanical and tribological properties, and high resistance to degradation are required (Bello et al., 2015). Nano- or micro-sized inorganic particles added homogeneously to the polymer matrix contribute to the production of light and durable composite materials (Ray & Easteal, 2007).

Composite materials are materials created by combining two or more different materials, each of which preserves its own properties and works together to gain new and superior properties (Erdogdu, 2020).

Composite materials consist of two main components: reinforcement material and matrix material. The reinforcement material is a material with high tensile strength that increases the strength, stiffness and flexibility of the composite. The matrix material is the material that holds the reinforcement material together, distributes the load evenly and enables the shaping of the composite (Khakzad, 2017).

The key advantages of composite materials include high strength, low density, hardness, resistance to abrasion, efficient heat transfer, corrosion resistance, electrical conductivity, flexibility, and impact resistance (Adem & Uyaner, 2019).

Fiber materials such as glass, carbon, aramid and natural fibersfiber are generally used as reinforcement materials of composite materials. Fiber materials have properties such as high strength, low density, high flexibility and high thermal conductivity. The sizes of fiber materials can be classified as micro, nano and macro. Nano-sized fiber materials are called nanofibers. Nanofibers are fiber materials with a diameter of less than 100 nm (Murat et al. 2022, Akcan, 2023).

There are various studies in the literature in which different amounts of carbon nanotubes and nano-graphene particles are added to the matrix material to increase the durability of composite materials.

Graphene's unique 2D honeycomb lattice structure not only makes it the thinnest and strongest material in the universe (up to 100 times stronger than steel), but also gives it many excellent chemical and physical properties, such as high levels of flexibility (Li et al., 2016).

In Muharrem (2019) study; microstructure, hardness and wear were used to determine the mechanical properties of Al 2024 composites produced at different rates (0.5%-1.0%-2.0%-4.0%) reinforced with carbon nanotube (CNT) and nano graphene (G) made the analyses. In addition, machinability experiments were carried out with a cutting speed of 200 m/min, feed rates of 0.10 - 0.15 and 0.30 mm/rev and depth of cut of 1.0 mm. During the machining experiments, surface roughness was measured and the wear conditions of the cutting tools were examined under a microscope. According to the test results, the most appropriate values of nano material ratios in composites were determined. The study concluded that nanomaterial addition improved the hardness, wear and machinability properties of composites, but as the amount of nanomaterial increased, the surface roughness of the composites also increased.

İlhan & Feyzullahoglu (2019) investigated in their study how different natural fibers and fillers affect the properties of FRP composite materials. They concluded that the addition of natural fibers and fillers improves the properties of FRP composites, but can also have negative effects in some cases.

Aswathnarayan et al., (2020) investigated in their study how nano graphene affects the mechanical properties of glass-epoxy composites. In the study, pure epoxy and glass-epoxy composites containing 1% and 2% nano graphene were compared. These materials were prepared by the vacuum bag method. Mechanical performances were measured with tensile, bending and impact tests. Additionally, their crystal structures were analyzed by X-ray diffraction. As a result, nano-graphene additives significantly improved the mechanical behavior of glass-epoxy composites. It was concluded that this development is related to the homogeneous distribution of nano graphene and its good bonding with the glass fabric. This has made nanocomposites more durable. SEM images confirmed the compatibility between nano graphene and glass fabric.

Mishra et al., (2020) In their study, they investigated how glass/epoxy polymer composites can be improved with graphene. The research has shown that graphene is a nano-sized carbon material and shows wonderful properties such as high strength and flexibility. In his study, mechanical tests were carried out by adding 0%, 1%, 2% and 3% graphene to glass fiber epoxy composites. The tests were performed with two different layer layouts [(0/90)12s and (0/90/±45)6s]. It was applied on prepared glass/epoxy nano composite sheets. As a result of the test, it was observed that graphene-added composites provided a significant improvement in tensile, bending and impact strengths compared to composites without graphene. Additionally, it was found that the highest value of mechanical properties was reached with the addition of 2% graphene for both layer arrangements. Additionally, it was observed that the (0/90/±45)6s layer layout performed better than the (0/90)12s layer layout. His research has revealed that graphene is an effective nanofiller for glass fiber epoxy composites and may play an important role in the development of polymer composites.

Murat et al., (2022) experimentally investigated the mechanical properties and buckling behavior of E-glass fiber reinforced polymer composites by reinforcing them with Al2O3 and TiO2 nanoparticles. For this purpose, three types of pure, e-glass fiber reinforced composite plates with 2% Al2O3 addition and 2% TiO2 addition were prepared by vacuum-assisted resin infusion technique. The buckling behavior of the produced composite plates was determined by a four-point bending test. In addition, the hardness and tensile properties of the composite plates were measured. The article concluded that nanoparticle additive increases the buckling load, hardness and tensile strength of composite plates, but reduces the residual strength after buckling.

Seeli et al., (2023) focused on the mechanical and thermal behavior of E-glass fiber reinforced composites and prepared composites reinforced with nanographene and an E-glass layer at different weight ratios using mechanical mixing and hand-laying techniques. Nanocomposites have three different formulations: 1%, 2% and 3% by weight of nanomaterials. Mechanical parameters of nanocomposites such as bending strength, tensile strength, TGA, DTA, DSC and hardness were tested and the effect of nanofillers was compared. As a result, the results showed that nanographene (NG) composites are an effective method to increase mechanical performance, compared to plain E-glass composites, were obtained by experimentally examining the values of 1, 2 and 3% by weight of nanographene in the E-glass fabric reinforced composite. It was also found that the mechanical and thermal properties of nanographene decreased with the addition of nanomaterial after reaching the optimum weight ratio.

Recent studies have explored various aspects of nano-graphene reinforced composites:
Kumar et al. (2021) studied the effect of nano-graphene on the mechanical and thermal properties of epoxy-based composites. They found that adding 0.5% to 1% nano-graphene improved tensile strength and thermal conductivity, attributing this to the effective load transfer and thermal path networks created by the graphene.

Zhang et al. (2022) examined the impact resistance of carbon fiber composites with nano-graphene reinforcement. Their research demonstrated that the addition of 1% by weight nano-graphene enhanced the impact strength by 15%, primarily due to the graphene's ability to dissipate energy and prevent crack propagation.

Jiang et al. (2023) investigated hybrid composites containing both carbon nanotubes (CNTs) and nano-graphene. Their findings revealed that a combination of these nanomaterials resulted in synergistic effects, leading to improvements in tensile strength, modulus, and fracture toughness compared to using either reinforcement alone.

Zhao et al. (2020) focused on the electrical and mechanical properties of glass fiber/epoxy composites enhanced with nano-graphene. They reported a significant increase in tensile strength (by 25%) and electrical conductivity, suggesting that nano-graphene could be a promising additive for multifunctional composite materials.

Kumar & Kaur (2021) explored the fatigue behavior of nano-graphene reinforced epoxy composites and observed that the fatigue life of the composites increased by 30% with the incorporation of 0.75% nano-graphene. They attributed this to the improved crack-bridging and load-bearing capacity of the nano-graphene particles.

These studies illustrate the diverse benefits of incorporating nano-graphene into composite materials, such as improved mechanical properties, enhanced thermal and electrical performance, and increased durability under various loading conditions.

In line with the literature research reviewed; It is seen that the durability of composite materials varies depending on the type and amount of nanoparticle powders.

The aim of this study is to investigate the effect of nano-graphene reinforcement at varying weight percentages (0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1%) on the mechanical properties of glass fiber polymer composites, using tensile and three-point bending tests. The study seeks to understand how the addition of nano-graphene particles influences the tensile strength and bending strength of the composites, offering insights into the optimization of nano-reinforced polymer composites for engineering applications.

The novelty of this study lies in its detailed analysis of the mechanical behavior of glass fiber composites reinforced with nano-graphene particles at different concentrations. Unlike previous studies, this research provides a comprehensive comparison of tensile and bending properties, revealing a contrasting behavior—where tensile strength increases, and bending strength decreases with higher concentrations of nano-graphene. This unexpected behavior contributes to the broader understanding of the interactions between nano-reinforcements and polymer matrices, particularly in the context of mechanical performance under different loading conditions.

2. Materials and methods

2.1. Composite plate production

In this study, nano-particle reinforced glass fiber composite sheets were prepared with the hand lay-up technique, as seen in Figure 1. Hexion Epikote Resin MGSLR 635\Hexion Epikure Curing Agent MGH LH 635 epoxy hardener polymeric system (Tila Kompozit, Türkiye) was chosen as the matrix material. Spherical nano-graphene powders (Nanografi, Türkiye) of different amounts, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% by weight, were used as nanoparticle reinforcers (Table 1).

Figure 1. a) Preparation of nano-graphene particle reinforced resin/hardener polymeric system, b) brushing process and fiber laying

Table 1. Technical properties of the nanoparticles

Additive material	Grain size(nm)	Purity (%)	Diameter	Colour
Graphene powder	3 nm	99	1.5 µm	Black

To prepare 6-layer sheets, 6 pieces of 300gr/m² woven glass fiber fabric was cut into equal sizes with a cutting tool. The epoxy/hardener matrix material was obtained by mixing 70/30 by weight for 1 minute at room temperature. Then, in order to prevent agglomeration and obtain a homogeneous mixture, nano graphene powders were added to the epoxy hardener mixture we prepared by stirring in a 3000-rpm magnetic stirrer for 5 minutes, and the mixing process continued until a homogeneous mixture was obtained. Then, a transparent non-stick nylon fabric was placed on the marble plate. The nanoparticle reinforced epoxy resin mixture was first spread evenly on the nylon with a brush, and then it was reapplied with 1 piece of glass and 1 piece of glass fiber fabric resin in the determined proportions between nano graphene powders and 1 piece of glass fiber fabric, respectively, to prepare a total of 6-layer sheets. After brushing and fabric placement, the boards were covered with fireproof nylon. The boards were placed on a hard object to remove air bubbles and excess resin and were left to dry. This process; a total of 6 groups of reinforced polymer composite sheets were produced by repeating separately for the control group and 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% nano-graphene added glass fibers by weight. After the drying process was completed, as shown in Figure 1, the sheets were cleaned of resin residues and burrs.

2.2. Creating test samples

In this study, tensile test samples were cut in 25x250 mm dimensions according to ASTM D 3039/D standard (ASTM, 2008) and three-point bending test samples were cut in 12.7x125 mm dimensions in accordance with ASTM D790 standard (ASTM, 1997) by water jet cutting method (Figure 2). After the samples were cut, they were wiped clean with a dry, clean cloth. The thickness of each sample was measured to be approximately 3 ± 0.2 mm. After the samples were cut, they were arranged by wiping them with a dry, clean cloth.

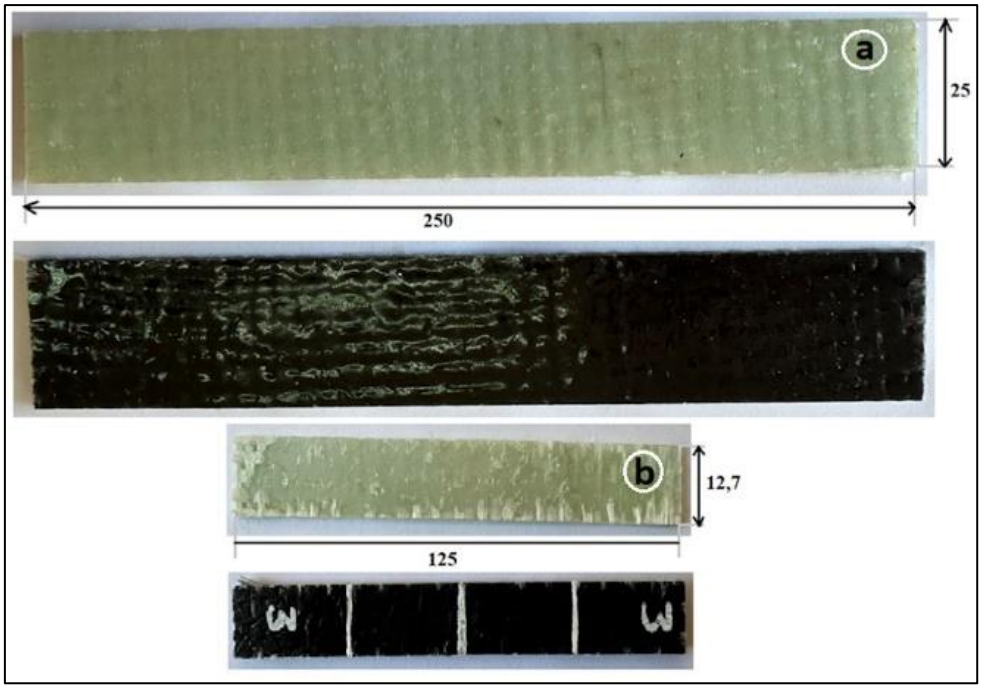


Figure 2. Cutting and classification of composite plates a) tensile b) three-point bending (dimensions in mm)

2.2.1. Tensile and three-point bending bending testing devices

In this study, tensile samples were tested with a Besmak Bmt 200es model testing machine with 12-480 bar hydraulic pressure and ± 20 kN tensile strength, at room temperature and 2 mm/min tensile speed. Bending tests were carried out at room temperature with a Shimadzu AGS-X universal testing device at a bending speed of 1 mm/min (Figure 3).

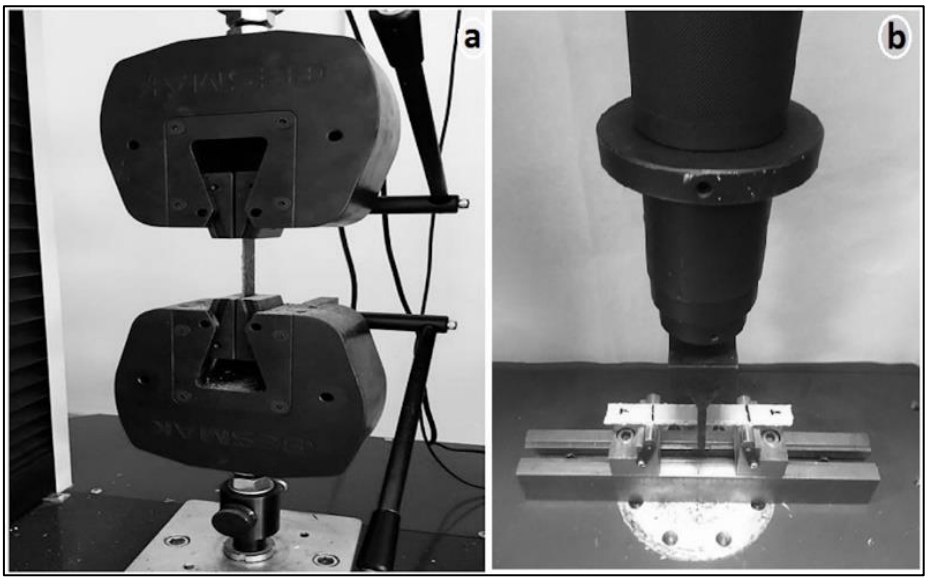


Figure 3. a) Tensile and b) bending testing devices

3. Results and discussion

The control group and composites reinforced with 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1% by weight of graphene nanoparticles were subjected to tensile and three-point bending tests. At least 6 samples of the same dimensions were produced from each plate group for tensile and bending tests.

3.1. Tensile test

Figure 4. Damage images of tensile test samples of a) control group and b) 0.2%, c) 0.4%, d) 0.6%, e) 0.8% and f) 1% graphene nano-particle reinforced composites by weight

Figure 4 shows the damage mechanisms seen in the control group and 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% by weight graphene nanoparticle reinforced polymer composite under tensile load. It is observed that there are matrix and fiber fractures in all six groups. Fiber grooves, which are predicted to occur by the separation of epoxy and fiber in line with the literature, indicate a sawtooth damage mechanism (Hu & Zhang, 2004; Gao et al., 2022; Fan et al., 2024).

Saw teeth are damage mechanisms that occur perpendicular to the fiber direction and are one of the most important fractographic features seen in composites (Brockmann & Salviato, 2023; Abdullah et al., 2024).

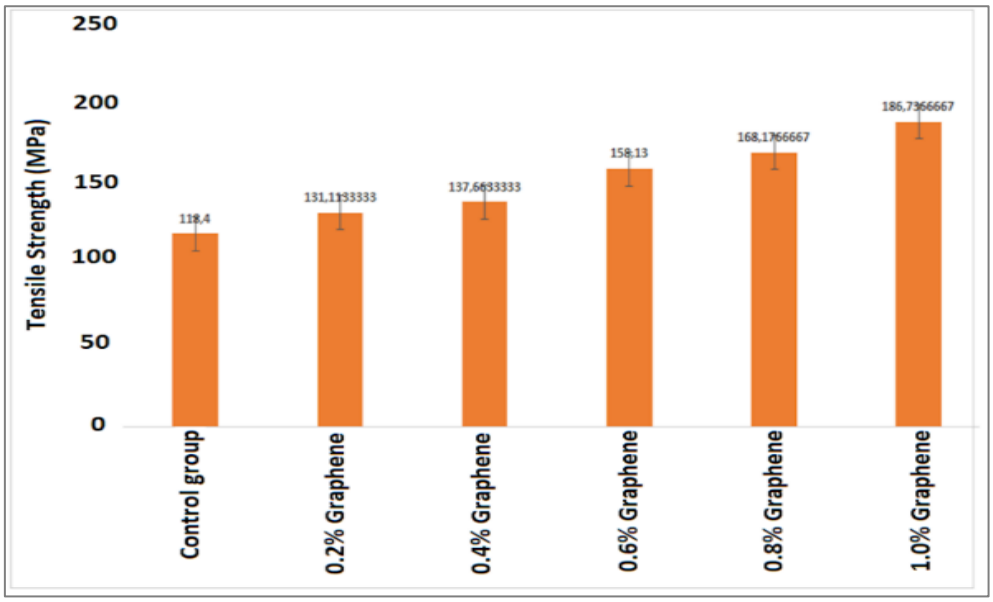


Figure 5. Average tensile strengths of the control group and 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% by weight graphene nano-particle reinforced composites

The average tensile strengths of the control group and 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% by weight graphene nanoparticle reinforced composites are given in Figure 5. According to this; The average tensile strengths of the control group, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% Graphene nanoparticle reinforced composites were determined as 118.4, 131.11, 137.66, 158.13, 168.17, and 186.73 MPa, respectively. The highest contribution to tensile strength occurred in 1 wt% Graphene nanoparticle reinforced composites, as predicted.
When evaluated compared to the control group, there was an increase of 10.98%, 16.52%, 33.84%, 42.03% and 57.71%, respectively, in 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% Graphene Nanoparticle reinforced composites, and as the weight amount of graphene nanoparticle reinforcement increased, the tensile strength of the composites increased. A significant increase in strength was observed.

Representative tensile stress and displacement curves of these samples are shown in Figure 6.

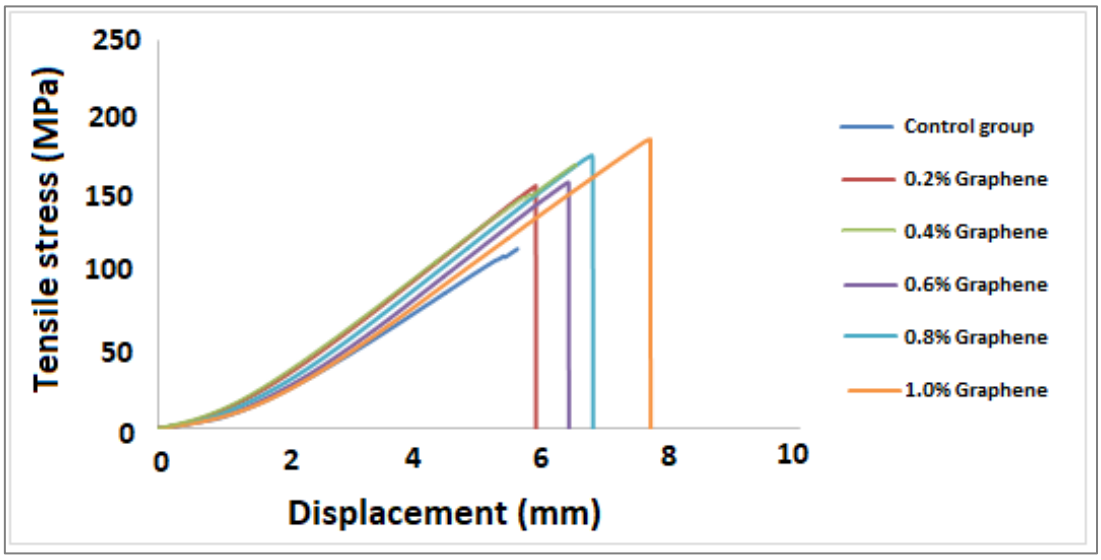


Figure 6. Tensile stress/Displacement diagram of control group and 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% by weight Graphene Nanoparticle reinforced composites

3.2. Three-point bending test

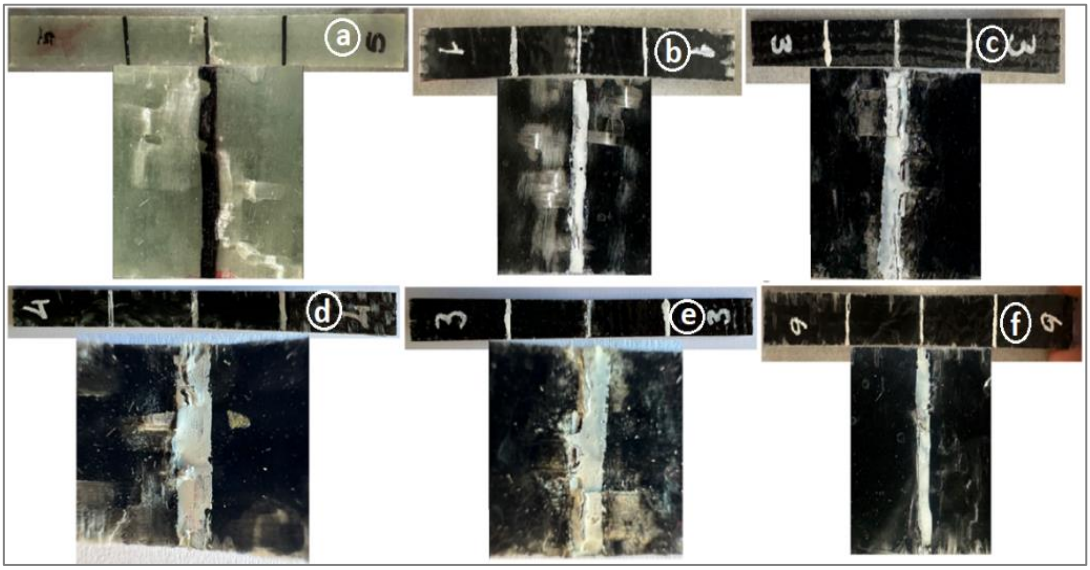


Figure 7. Damage images of bending test samples of a) Control group and b) 0.2%, c) 0.4%, d) 0.6%, e) 0.8% and f) 1% Graphene Nanoparticle reinforced composites by weight

Figure 7 shows the damage mechanisms seen in the polymer composite with graphene nanoparticle addition at different weight ratios under bending load. In all 6 groups, including the control group, plate integrity was lost as a result of sudden breakage after carrying some more load with the breakage of the matrix at the middle interface. Under the stresses occurring in all plates, first the upper layer and then the lower layer broke.

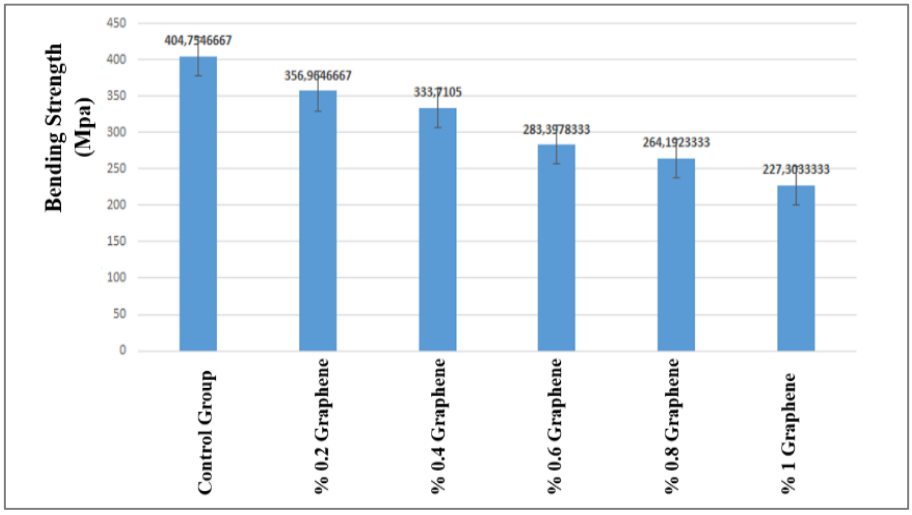


Figure 8. Average bending strengths of the control group and 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% by weight Graphene Nanoparticle reinforced composites

The average flexural modul of graphene nanoparticle reinforced composites are shown in Figure 8. According to this; The average bending strengths of the control group 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% by weight Graphene Nanoparticle reinforced composites were found to be 404.75, 356.96, 333.71, 283.39, 264.19 and 227.30 MPa, respectively.

It should be noted that different amounts of graphene nanoparticle reinforcement resulted in a significant decrease in the average bending strength of the composites. In this context; When evaluated compared to the control group, there was a decrease of 11.80%, 17.55%, 29.98%, 34.72% and 43.84%, respectively, in 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% Graphene Nanoparticle reinforced composites. As the weight amount of graphene nanoparticle reinforcement increased, the bending strength of the composites decreased, contrary to

expectations (Seeli, 2023). In their study, they concluded that the bending strength decreased with nano graphene reinforcement to glass fiber. They explained this by saying that Nano-graphene's huge surface area, atomic structure and lack of functionality are likely responsible for this phenomenon. Representative force and displacement curves of these samples are shown in Figure 9.

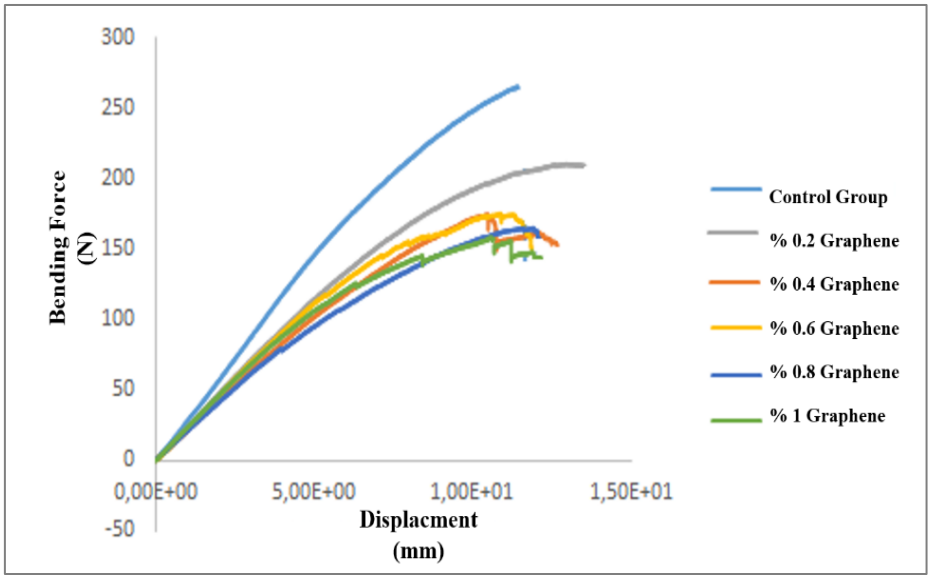


Figure 9. Bending Force/Displacement diagram of the control group and 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% by weight Graphene Nanoparticle reinforced composites

This study investigated the effect of nano-graphene reinforcement on the mechanical properties of glass fiber polymer composites. Nano-graphene particles were added at varying weight percentages (0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1%) to analyze changes in tensile and bending strengths. The tensile test results showed a significant enhancement in tensile strength with increasing concentrations of nano-graphene. The composites with 1% nano-graphene exhibited the highest tensile strength of 186.73 MPa, a 57.71% improvement compared to the control group (118.4 MPa). Each increase in the concentration of nano-graphene led to a proportional increase in tensile strength, indicating a strong reinforcing effect.

Conversely, the three-point bending test revealed an unexpected trend where the bending strength decreased with higher nano-graphene content. The highest bending strength was observed in the control group (404.75 MPa), while the composites with 1% nano-graphene showed the lowest strength (227.30 MPa), marking a 43.84% decrease. This decline suggests that the addition of nano-graphene may have impacted the integrity of the composite under bending stress, leading to early failure.

The contrasting behaviors observed in tensile and bending tests underscore the complexity of interactions between nano-reinforcements and polymer matrices. While nano-graphene significantly improves tensile properties by enhancing load transfer and crack resistance, its influence on bending performance may be attributed to changes in the stress distribution and potential microstructural weaknesses. Future studies could explore optimizing the dispersion and bonding of nano-graphene within the matrix to mitigate the decline in bending strength, enabling more effective use of nano-reinforcements in composite materials.

4. Conclusions

The following results were obtained based on the tensile and 3-point bending test values of 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% Graphene Nanoparticle reinforced composites by weight:

The maximum enhancement in tensile strength was seen in composites with 1% by weight graphene reinforcement, achieving 186.73 MPa—an increase of 53.71% compared to the control group.

In the bending test, unlike the tensile test, the highest increase was observed in the glass fiber control group composites at 404.75 MPa. It has been shown that bending strength decreases with increasing weight percentage of nano-graphene reinforcement.

According to the findings of the tensile test damage images, interlayer separation (delamination) along with matrix and fiber fractures were observed in all plate types.

When the three-point bending test damage images findings were evaluated, plate integrity was lost as a result of sudden fracture after carrying some more load with the breakage of the matrix in the middle interface in all 6 groups, including the control group.

As a result, it has been determined that graphene reinforcement at different weight ratios causes a significant increase in tensile strength but a decrease in bending strength, in parallel with the increase in weight.

Acknowledgement

The study is related to a portion of Onur Kazım ATEŞ's Master's thesis. Tkanks for all valuable comments from editors and reviewers, which helped us improve the quality of the manuscript.

Author contribution

FK: supervision, article administration, and resources. FK and OKA; methodology and writing-original draft preparation. OKA and HZ; writing, reviewing, and editing.

Declaration of ethical code

The authors declare that all of the rules stated to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" were followed, and none of the actions specified under the title of "Actions Contrary to Scientific Research and Publication Ethics" have been carried out.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

Abdullah, S., Bokti, S., Wong, K., Johar, M., Chong, W., & Dong, Y. (2024). Mode I And Mode Iıı Delamination Of Carbon Fiber/Epoxy Composite Laminates Subjected To A Four-Point Bending Mechanism. *Composites Part B: Engineering*, 270, 111110. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111110

Adem, Y., & Uyaner, M. (2019). Nano Elyaf Takviyeli Nanokompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 1(1), 10-19.

Akcan, H. (2023). *Grafit Ve B4c Dolgulu Cam Ve Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik, Tribolojik Ve Delme Performanslarının İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi]

Aswathnarayan, M., Muniraju, M., Reddappa, H., ve Rudresh, B. (2020). Synergistic Effect Of Nano Graphene On The Mechanical Behaviour Of Glass-Epoxy Polymer Composites. *Materials Today: Proceedings*, 20, 177-184. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.166

Bello, S. A., Agunsoye, J. O., Hassan, S. E. A., & Kana, M. Z. (2015). Epoxy resin based composites, mechanical and tribological properties: A review. *Tribology in Industry*, 37(4), 500.

Bhong, M., Khan, T. K., Devade, K., Krishna, B. V., Sura, S., Eftikhaar, H. K., ... & Gupta, N. (2023). Review of composite materials and applications. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.026

Brockmann, J., & Salviato, M. (2023). The Gap Test–Effects Of Crack Parallel Compression On Fracture İn Carbon Fiber Composites. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 164, 107252. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107252

Erdoğdu, Y. (2020). *Doğal Lif Takviteli Partikül Dolgulu Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Ve Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi* [Doktora Tezi, İnönü Üniveritesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Fan, T., Wang, Y., Liu, C., Li, Y., & Liu, S. (2024). Damage Failure Prediction Study Of Carbon Fiber Metal Laminates İn Hot Stamping Process. Advanced Composite Materials, 1-29. https://doi.org/10.1080/09243046.2024.2308983

Gao, T., Li, C., Wang, Y., Liu, X., An, Q., Li, H., Et Al. (2022). Carbon Fiber Reinforced Polymer İn Drilling: From Damage Mechanisms To Suppression. *Composite Structures*, 286, 115232. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115232

Hu, N., & Zhang, L. (2004). Some Observations İn Grinding Unidirectional Carbon Fibre-Reinforced Plastics. *Journal Of Materials Processing Technology*, 152(3), 333-338. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.374

İlhan, R., & Feyzullahoğlu, E. (2019). Cam Elyaf Takviyeli Polyester (Ctp) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaflar Ve Dolgu Maddeleri. *El-Cezeri*, 6(2), 355-381. https://doi.org/10.31202/ecjse.519072

Jiang, X., Li, Y., & Wang, Z. (2023). Hybrid composites with carbon nanotubes and nano-graphene: Synergistic effects on mechanical properties. Materials Science and Engineering: A, 854, 143-155. https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144251

Kumar, S., Singh, A., & Verma, P. (2021). Influence of nano-graphene on the thermal and mechanical properties of epoxy composites. *Polymer Composites, 42*(9), 3890-3898. https://doi.org/10.1002/pc.26134

Kumar, R., & Kaur, S. (2021). Fatigue behavior of nano-graphene reinforced epoxy composites. *Journal of Composite Materials, 55*(3), 467-480. https://doi.org/10.1177/0021998320983738

Khakzad, F. (2017). *Grafen Katkılı Cam/Epoksi Nanokompozit Plakaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Li, X., Yu, J., Wageh, S., Al-Ghamdi, A. A., & Xie, J. (2016). Graphene in photocatalysis: a review. *Small*, 12(48), 6640-6696. https://doi.org/10.1002/smll.201600382

Mishra, B., Mishra, D., & Panda, P. (2020). An Experimental İnvestigation Of The Effects Of Reinforcement Of Graphene Fillers On Mechanical Properties Of Bi-Directional Glass/Epoxy Composite. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5429-5441. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.154

Muharrem, P. (2019). Karbon Nanotüp (Cnt) Ve Nano Grafen (G) Takviyeli Al 2024 Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretilerek Aşınma Ve İşlenebilme Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal Of Engineering Research And Development*, 11(1), 370-382. https://doi.org/10.29137/umagd.493868

Murat, K., Mustafa, Ö., Güven, C., & Demircan, G. (2022). Al2o3 Ve Tio2 Nanopartikül Katkısının Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Ve Burkulma Davranışına Etkisi. Harran Üniversitesi *Mühendislik Dergisi*, 7(3), 161-172. https://doi.org/10.46578/humder.1148418

Ray, S., & Easteal, A. J. (2007). Advances in polymer-filler composites: Macro to nano. *Materials and manufacturing processes*, 22(6), 741-749. https://doi.org/10.1080/10426910701385366

Seeli, H., Prasad, V. V. S., & Venkatesh, M. (2023). Nano-graphene E-glass fibre epoxy polymer composite thermal and mechanical characteristics study. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.341

Standart ASTM Committee D-30 on Composite Materials. (2008). *3039. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.* ASTM international.

Standart A. S. T. M. (1997). *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM D790*. Annual book of ASTM standards.

Zhang, H., Liu, B., & Chen, Y. (2022). Impact resistance enhancement in carbon fiber composites using nano-graphene reinforcement. *Composites Part B: Engineering, 238*, 110843. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110843

Zhao, L., Yu, T., & Wang, M. (2020). Enhancing mechanical and electrical properties of glass fiber/epoxy composites with nano-graphene. *Journal of Materials Science, 55*(22), 14430-14442. https://doi.org/10.1007/s10853-020-04964-5

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 360-379 doi: 10.17714/gumusfenbil.1488267 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Evolvent profilli harmonik iç ve dış dişli temaslarında farklı basınç açıları ve profil kaydırmanın diş dibi ve diş yan yüzey mukavemeti güvenliği üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Investigation of the effects of different pressure angles and profile shifting on the tooth root and gear tooth surface strength safety in involute profile harmonic internal and external gear contacts

Can ÇİVİ*[1], Recep KARAMAN[1]

[1]*Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 45100, Manisa*

• Geliş tarihi / *Received*: 22.05.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 18.03.2025

Öz

Bu çalışmada, tek kademede yüksek çevrim oranı sağlamak üzere 60-58 ve 60-57 diş sayıları içeren, evolvent profil yapısında rijit harmonik redüktörler tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında, dişli çiftleri farklı basınç açılarında (15°, 20°, 25° ve 30°), farklı diş başı modifikasyonlarında, profil kaydırma yapılmadan ve ayrıca profil kaydırma yapılarak ayrı ayrı tasarlanmış ve oluşan diş dibi güvenlik değerleri ile diş yan yüzey mukavemet güvenlik değerlerinin değişimi incelenmiştir. Bu vesileyle, 16 model arasından en uygun tasarımın oluşturulması hedeflenmiştir. Sistem tasarımında KISSsoft® yazılımı kullanılmış ve optimum sistemin üretimi, harmonik hareketi doğrulamak üzere 3D yazıcı ile yapılmıştır. Çalışma sonucunda, gerçekleştirilen diş profil modifikasyonlarıyla tek kademede 29 çevrim oranına harmonik hareketi başarıyla uygulayarak ulaşılabildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Evolvent profil, Harmonik redüktör, KISSsoft®

Abstract

In this study, rigid harmonic reducers with involute profile structure containing 60-58 and 60-57 teeth numbers were designed to provide high conversion ratio in a single stage. Within the scope of the study, gear pairs were designed separately at different compression angles (15°, 20°, 25° and 30°), with different tooth head modifications, without profile shifting and also with profile shifting, and the changes in the resulting tooth bottom safety values and tooth side surface stress safety values were examined. On this occasion, it was aimed to create the most suitable design among 16 models. KISSsoft® software was used in the system design and the production of the optimum system was carried out with a 3D printer to verify harmonic motion. As a result of the study, it was seen that with the tooth profile modifications, 29 ratio could be achieved in a single stage by successfully applying harmonic motion.

Keywords*: Harmonic gearbox, Involute profile, KISSsoft®*

*Can ÇİVİ; can.civi@cbu.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Tarih boyunca insanlar, farklı yöntemlerle hareket enerjisi üretmeye ve bu enerjiyi belirli amaçlar için kullanmaya çalışmışlardır. Geçmişten günümüze bu sürece baktığımızda, hareket enerjisinin büyük bir kısmının genellikle dönme hareketine dayandığı görülmektedir. Bu bağlamda türbinler, yel değirmenleri, motorlar ve su değirmenleri gibi örnekler vermek mümkündür. Dönme hareketinin makinelerde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için enerjiyi iletecek dişli mekanizmaları geliştirilmiştir. Bu ihtiyaçtan dolayı, geçmişte binlerce farklı amaç için çeşitli dişli mekanizmaları ortaya çıkmıştır.

Diş dibi (diş kökü) güvenliği ve yan yüzey güvenliği, dişli çark tasarımı ve analizinde dikkate alınması gereken önemli hususlardır. Kök güvenliği, dişli çarkın diş kökünün yüklere ve gerilmelere karşı arıza olmadan dayanma kabiliyetini ifade eder. Diğer yandan yan yüzey güvenliği, dişli çarkın diş yanağının aşınma, yorulma ve çalışma sırasındaki diğer hasar biçimlerine karşı direnciyle ilgilidir. Hem kök güvenliği hem de yan yüzey güvenliği, çeşitli uygulamalarda dişli çarkların güvenilirliğini, dayanıklılığını ve performansını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Dişli çarklarda yük taşıma kapasitesinin belirlenmesinde, önemli bir faktör olarak kabul edilen, bir dişte meydana gelen gerilme miktarıdır. Diş üzerindeki gerilme az olursa, dişli çarkın yük taşıma kapasitesi artar. Dişlilerde bu kapasiteyi artırmak için yapılan çalışmalar, dişlinin geometrisine bağlı parametrelerin değiştirilmesi ile diş üzerindeki gerilmelerin azaltılmasını amaçlanır (Doğan vd., 2018).

Dişli tasarımının önemli bir bileşeni diş kısmının dibinde meydana gelen eğilme gerilmesi ve bu gerilmenin değişken olması sebebiyle diş dibinin yorulma mukavemetinin tam olarak tanımlanabilmesi ve diş dibi güvenlik değerlerinin belirlenebilmesidir (Bonaiti & Gorla, 2022). Diş dibi eğilmesinin neden olduğu yorulma hasarını önlemek için tasarımcılar uluslararası düzeyde standartlaşmış hesaplama tekniklerini kullanırlar (Bonaiti & Gorla, 2021). Ayrıca dişli çarklarda meydana gelen diğer önemli hasar mekanizması da dişli yüzeylerinde meydana gelen basma şeklindeki Hertz gerilmeleridir (Güllü & Yilmaz, 2017; W. Li & Liu, 2018). Her iki gerilmenin hesabında da tasarımcılar, KISSSoft® gibi, her tasarım değişikliği için tüm gerilim değerlerinin hızlı bir şekilde elde edilmesini sağlayan önemli tasarım araçlarını kullanabilmektedirler. Literatürdeki çalışmalar, KISSSoft® programı ile, maksimum %8'e kadar düşük sapmalarla doğru sonuca yakın sonuçlar elde edilebildiğini göstermektedir (Irsel, 2021).

Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, problem, "mesh" olarak tabir edilen ve birbirine bağlı sonlu sayıda eleman topluluğuna bölünür ve belirli sınır şartlar altında uygulanır. Çözümün sonucunda modelin davranışı simülasyon ortamında incelenir, böylece üretimi yapılmadan önce varsa problemler öngörülmüş olur ve problemlerin giderilmesi için tasarım değişikliğine gidilir. Dişli çarkların diş profilleri ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Fetvacı ve İmrak (2004) çalışmasında, dişli çarklarda diş sayısı ve diş kalınlığı için optimum parametreleri belirlemiş ve yaptıkları analizler sonucunda diş dibi gerilmelerini hesaplamak için bir ifade oluşturmuşlardır (Fetvacı & İmrak, 2004).

Buckingham (1949), yazdığı kitapta çeşitli dişli sistemlerinin temaslarını ve diş profillerini incelemiştir (Buckingham, 1949). Colbourne (1987), kitabında farklı türdeki evolvent profil yapısındaki dişlilerin denklemlerini ifade etmiştir (Colbourne, 1987). Litvin ve Fuentes (2004), yapmış oldukları çalışmada dişli gerilmelerinin sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmasını detaylı bir şekilde açıklamışlardır ve ayrıca dişli çarklar için tasarım ve üretim metotları ayrıntılı bir şekilde anlatmışlardır (Litvin & Fuentes, 2004).

Dişli çarkların diş dibi gerilme hesaplamalarında, DIN, ISO, AGMA gibi çeşitli standartlarda analitik, deneysel ve sayısal yöntemler bulunmaktadır. Jammi (2013), çalışmasında dişli çarklardaki gerilmeleri hesaplamak için AGMA standartlarını ve sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Aynı zamanda, kavrama rijitliği ve statik iletim hatası değerlerini de hesaplamıştır. Yapılan analizlerde, AGMA ve sonlu elemanlar yöntemi arasında %10 ile %15 arasında farklılık olduğu görülmüştür. Dişlinin yük taşıma kapasitesini artırmak için, dişin sağ ve sol taraflarında farklı basınç açıları kullanarak kritik diş kalınlığını artırma yöntemine dayanan bir yaklaşım önerilmiştir. Simetrik olan 20° basınç açısı daha büyük bir açı ile değiştirildiğinde dişin dayanımının arttırıldığı gözlemlenmiştir (Jammi, 2013). Çavdar vd. (2005), yaptıkları çalışmada dişli çarkların yük taşıma kapasitesini

arttırmak için asimetrik dişli profilleri kullanmışlardır ve diş dibi gerilmesinin hesaplanmasında yeni bir yöntem önerilmiştir. Kullandıkları metodu bilgisayar programına dönüştürülerek elde edilen sonuçlar standartlar ile kıyaslanmıştır ayrıca sonlu elemanlar yöntemi ile analiz sonuçlarını doğrulamışlardır. Yaptıkları çalışmada basınç açısı ile kavrama oranı arasındaki değişimi de incelemişlerdir (Çavdar vd., 2005).

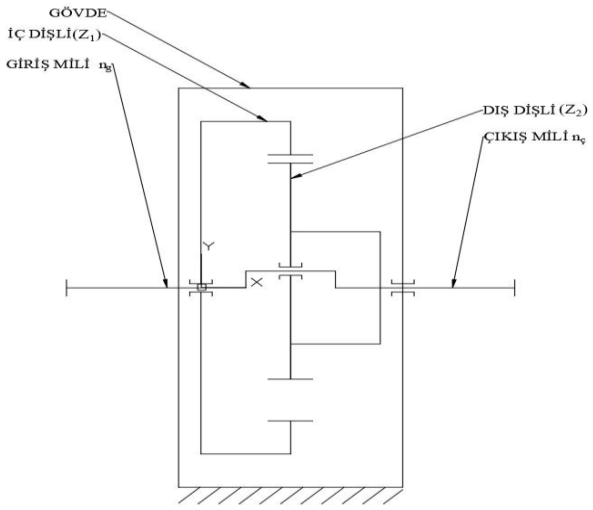
Flodin ve Andersson (2013), çalışmalarında toz metal yöntemiyle imal edilen dişli çarklarda diş dibinde meydana gelen gerilimi azaltmak amacıyla kesici takım uç yarıçapı optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, standart, tam yuvarlak, optimize edilmiş ve asimetrik kök şekilleri için sonlu elemanlar analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Optimize edilen kök bölgesi, statik gerilmelerde %18 ve dinamik gerilmelerde %22 oranında azalma sağlayarak standart dişlilere göre daha iyi bir performans sergilemiştir (Flodin & Andersson, 2013).

Dişli çarklardaki diş dibi gerilme hesapları deneysel olarak hesaplanabilmektedir. Lisle vd. (2017), yaptıkları çalışmada Özel bir aparat kullanarak 50 mm modüllü tek bir diş üzerinde oluşan gerilmeleri ölçmüşlerdir. Ölçüm noktaları, ISO ve AGMA standartlarına uygun şekilde belirlenmiştir. Ayrıca yapılan deneyler, ANSYS® sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak tekrarlanmış ve deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır (Lisle vd., 2017).

Patil vd. (2016), yaptıkları çalışmada çalışan dişlilerde oluşan temas gerilmelerini ölçmek amacıyla özel bir test düzeneği oluşturmuş ve bu test düzeneği ile elde edilen değerleri sonlu elemanlar yöntemi analizleri ile karşılaştırmışlardır. Kritik kesitin tespiti için fotoelastik yöntemden faydalanmışlardır (Patil vd., 2016).

Wang (2003), çalışmasında dişli üzerindeki maksimum eğilme gerilmesi ve diş dibindeki kök yarıçapında oluşan kritik kesiti dijital fotoelastik sistem kullanarak gerçek zamanlı olarak hesaplamıştır. Farklı hızlar, torklar ve temas noktaları için eğilme gerilmesinin davranışını incelemiştir. Elde ettiği sonuçları literatürdeki değerlerle karşılaştırmış ve AGMA standartlarına uyumlu olduğunu tespit etmiştir (Wang, 2003).

Bu çalışmada, ilk aşamada KISSsoft® paket programı kullanılarak Z_1:60, Z_2:58 ve Z_1:60, Z_2:57 diş sayıları için 15°, 20°, 25° ve 30° kavrama açılarına sahip dişli çiftleri hem profil kaydırma yapılmadan hem de profil kaydırmalı tasarımları yapılmıştır. İkinci aşamada ise KISSsoft® paket programında bulunan modül içerisinde sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, harmonik hareket vasıtasıyla tek kademede yüksek çevrim oranlarının elde edilebilmesidir. İkincil amaç da tasarlanan harmonik dişli mekanizmasında meydana gelen diş gerilmelerinin tespiti, emniyet incelemeleri ve gerçekleştirilen profil modifikasyonlarıyla optimize edilmesidir.



Şekil 1. Tasarlanan harmonik redüktör mekanizması
Figure 1. *Designed harmonic reducer mechanism*

Çalışma kapsamında incelenen harmonik redüktör mekanizması Şekil 1'de gösterilmiştir. Redüktör, temel olarak bir adet iç dişli ve bir adet dış dişlinin eksantrik bir dönüş sağlayarak yüksek bir çevrim oranına sahiptir.

Z_1 = İç dişli diş sayısı
Z_2 = Dış dişli diş sayısı

$i_{12} = \frac{Z_2}{Z_1 - Z_2}$ çevrim oranı, Denklem 1'de ifade edilen bağıntıdan hesaplanmaktadır. (1)

Buna göre $Z_2 = 58$, $Z_1 = 60$ dişli çiftinde çevrim oranı Denklem 2'deki bağıntıdan hesaplanmıştır.

$i_{12} = \frac{Z_2}{Z_1 - Z_2} = \frac{58}{60-58} = 29$ bulunmuştur. (2)

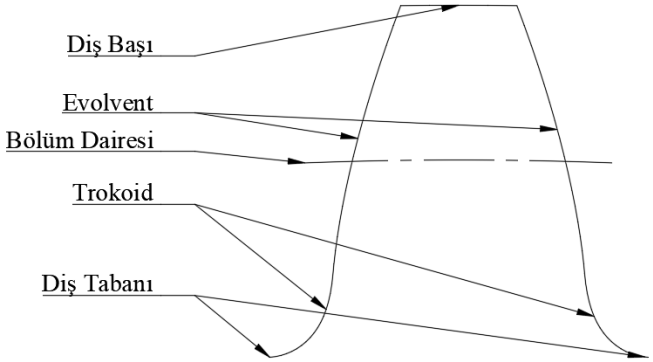
Buna göre $Z_2 = 57$, $Z_1 = 60$ dişli çiftinde çevrim oranı Denklem 3'deki bağıntıdan hesaplanmıştır.

$i_{12} = \frac{Z_2}{Z_1 - Z_2} = \frac{57}{60-57} = 19$ bulunmuştur. (3)

2. Materyal ve yöntem
2. Material and method

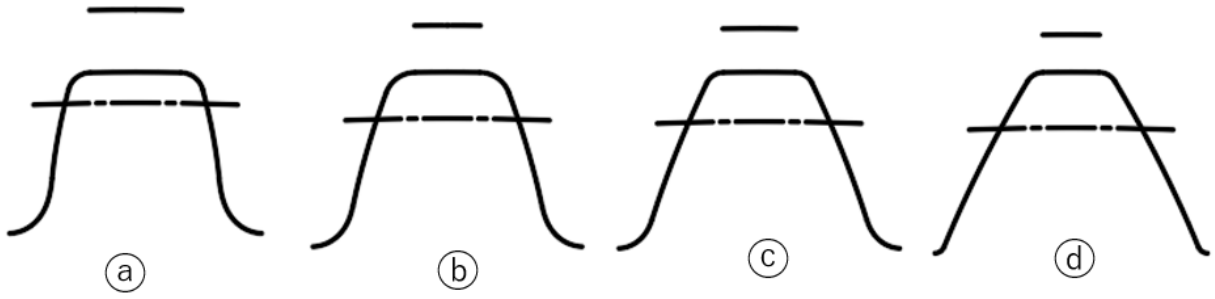
2.1. Diş geometrisinin KISSsoft® programında oluşturulması
2.1. Creating tooth geometry in KISSsoft® program

Çalışmada, dişli geometrisinin oluşturulması temel olarak profil kaydırmasız ve profil kaydırmalı grup olmak üzere iki kısımda incelenmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere, evolvent profil yapısına sahip dişli geometrisi, birbirinden farklı eğrilerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır.

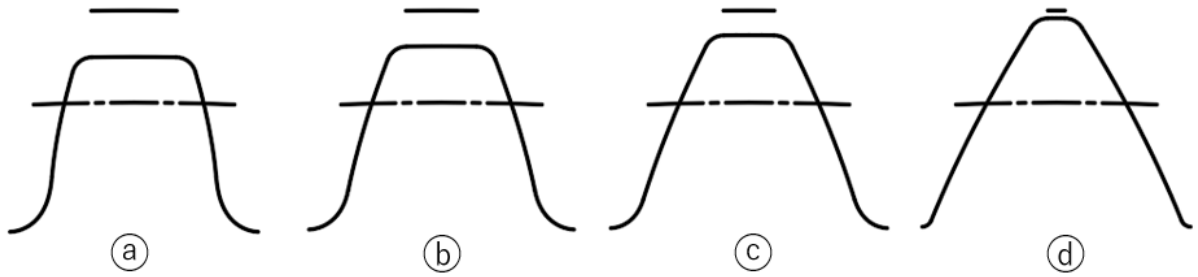


Şekil 2. Evolvent profilli diş geometrisi (Fetvacı & İmrak, 2004).
Figure 2. *Involute profiled tooth geometry* (Fetvacı & İmrak, 2004).

İlk grupta Z58 pinyon dişlinde profil kaydırma yapılmadan basınç (kavrama) açıları sırasıyla 15°, 20°, 25°, 30° olduğu durumlarda oluşan dişli geometrileri Şekil 3'te verilmiştir. Aynı şekilde Z57 pinyon dişli içinde profil kaydırma yapılmadan basınç açıları sırasıyla 15°, 20°, 25°, 30° olduğu durumlarda oluşan dişli geometrileri Şekil 4'te verilmiştir.

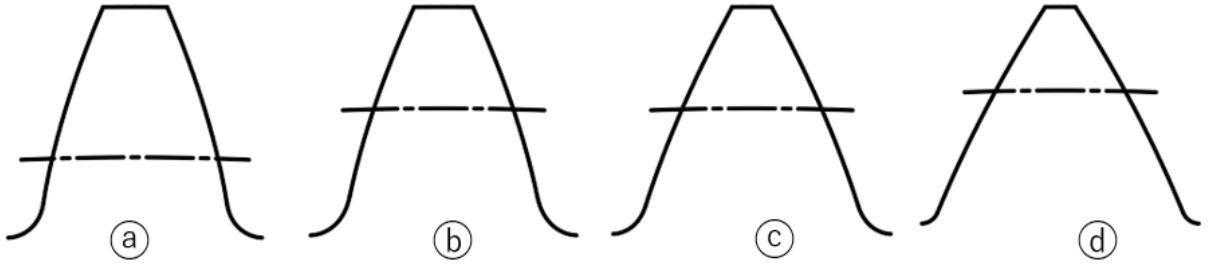


Şekil 3. Z58 pinyon dişlide profil kaydırmasız dişli geometrileri. (a) 15° dişli geometrisi. (b) 20° dişli geometrisi. (c) 25° dişli geometrisi. (d) 30° dişli geometrisi.
Figure 3. *Gear geometries without profile shifting in Z58 pinion gear. (a) 15° gear geometry. (b) 20° gear geımetry. (c) 25° gear geometry. (d) 30° gear geometry.*

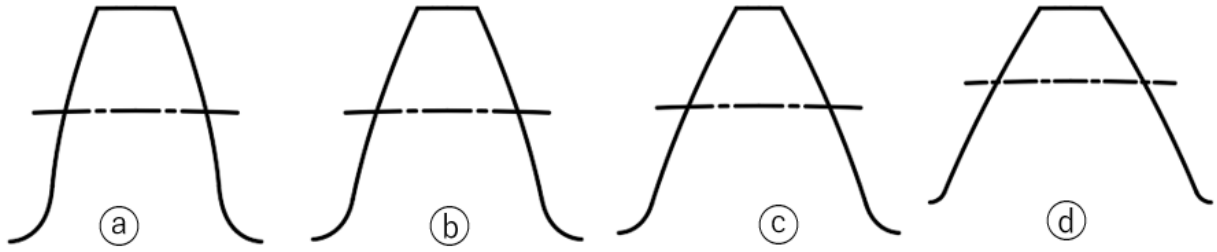


Şekil 4. Z57 pinyon dişlide profil kaydırmasız dişli geometrileri. (a) 15° dişli geometrisi. (b) 20° dişli geometrisi. (c) 25° dişli geometrisi. (d) 30° dişli geometrisi.
Figure 4. *Gear geometries without profile shifting in Z57 pinion gear. (a) 15° gear geometry. (b) 20° gear geımetry. (c) 25° gear geometry. (d) 30° gear geometry.*

Profil kaydırma yapılan Z58 pinyon dişlide, basınç açıları sırasıyla 15°, 20°, 25°, 30° olduğu durumlarda oluşan dişli geometrileri Şekil 5'te verilmiştir. Profil kaydırma yapılan Z57 pinyon dişlide, basınç açıları sırasıyla 15°, 20°, 25°, 30° olduğu durumlarda oluşan dişli geometrileri ise Şekil 6'da verilmiştir.

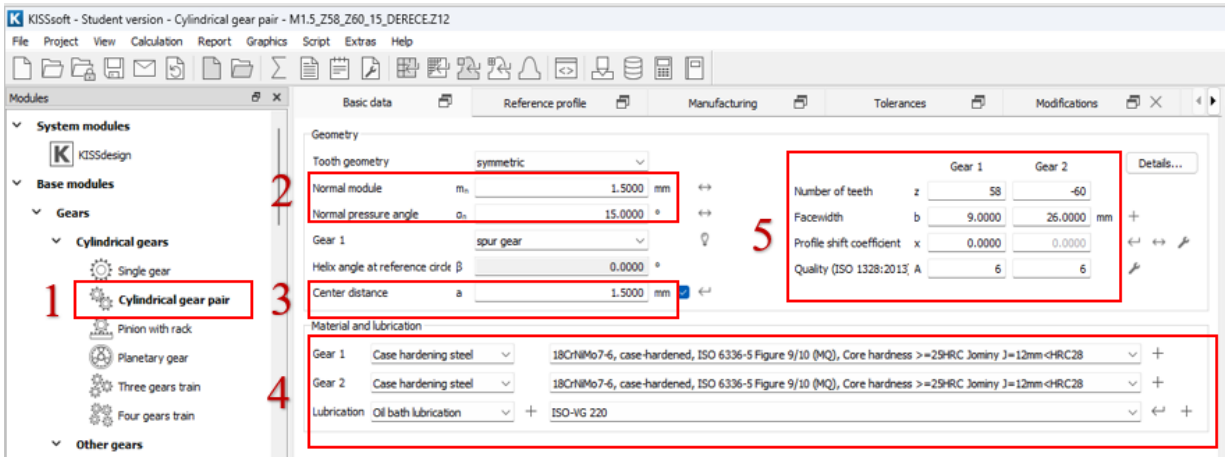


Şekil 5. Z58 pinyon dişlide profil kaydırmalı dişli geometrileri (a) 15° dişli geometrisi. (b) 20° dişli geometrisi. (c) 25° dişli geometrisi. (d) 30° dişli geometrisi.
Figure 5. *Gear geometries with profile shift in the Z58 pinion gear (a) 15° gear geometry. (b) 20° gear geımetry. (c) 25° gear geometry. (d) 30° gear geometry.*



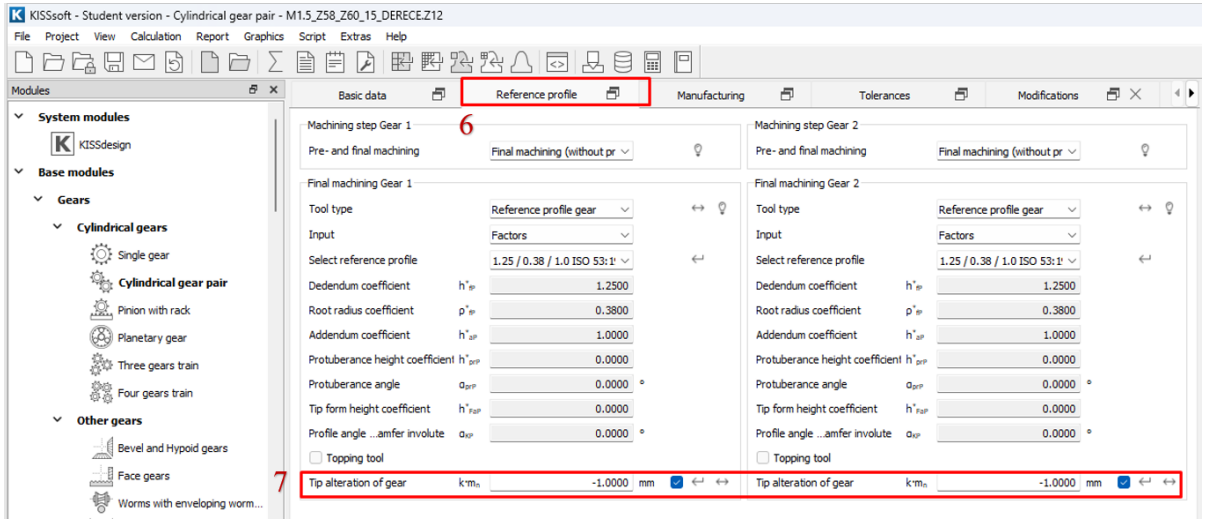
Şekil 6. Z57 pinyon dişlide profil kaydırmalı dişli geometrileri (a) 15° dişli geometrisi. (b) 20° dişli geometrisi. (c) 25° dişli geometrisi. (d) 30° dişli geometrisi.
Figure 6. *Gear geometries with profile shift in the Z57 pinion gear (a) 15° gear geometry. (b) 20° gear geımetry. (c) 25° gear geometry. (d) 30° gear geometry.*

KISSsoft® programında dişli geometrisinin oluşturulması Şekil 7'de gösterilmiştir. 1 numaralı bölümden çalışılacak dişli tipi olarak "Cylindrical gear pair" (silindirik dişli çifti) seçilmiştir. 2 numaralı bölümden modül (m=1,5 mm) ve basınç açısı (α=15°) seçilmiştir. 3 numaralı bölümden dişliler arası eksen mesafesi hesaplatılmıştır. 5 numaralı bölümden pinyon dişli Z_1=58 diş sayısı ve iç dişli Z_2=60 diş sayısı ile dişli kalınlık değerleri girilmiştir. 4 numaralı bölümden dişli malzemeleri olarak sementasyon çeliği AISI 4820, yani 18CrNiMo7-6 malzemesi seçilmiştir.



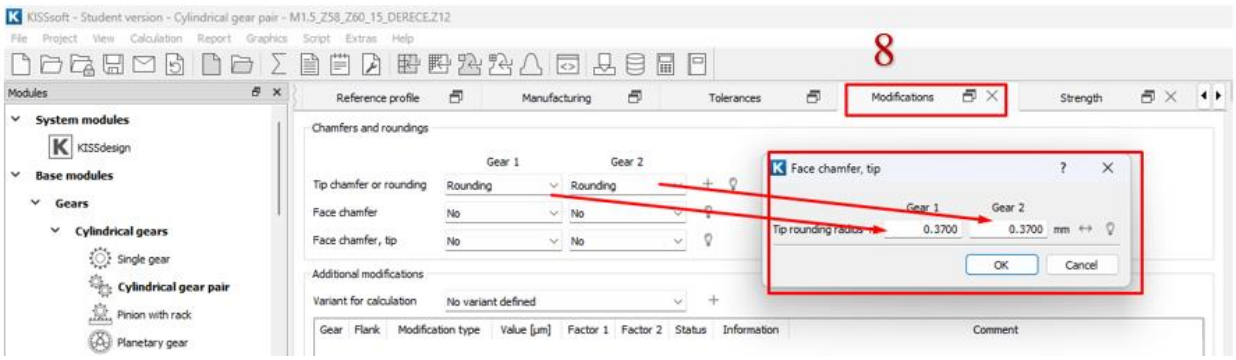
Şekil 7. Dişli geometrisinin KISSsoft® programında oluşturulması: 1. Adım
Figure 7. *Creation of the gear geometry in KISSsoft® program: Step 1*

Şekil 8'de verilen Reference profil kısmından, 7 numaralı bölümden (Z_1) ve (Z_2) için -1 mm uç değişikliği tanımlanmıştır. Bu çalışmada hem profil kaydırmasız hem de profil kaydırmalı durumlar incelenmiştir. Profil kaydırma yapılmayan durumlarda, diş uçlarından kesme yapılmıştır.



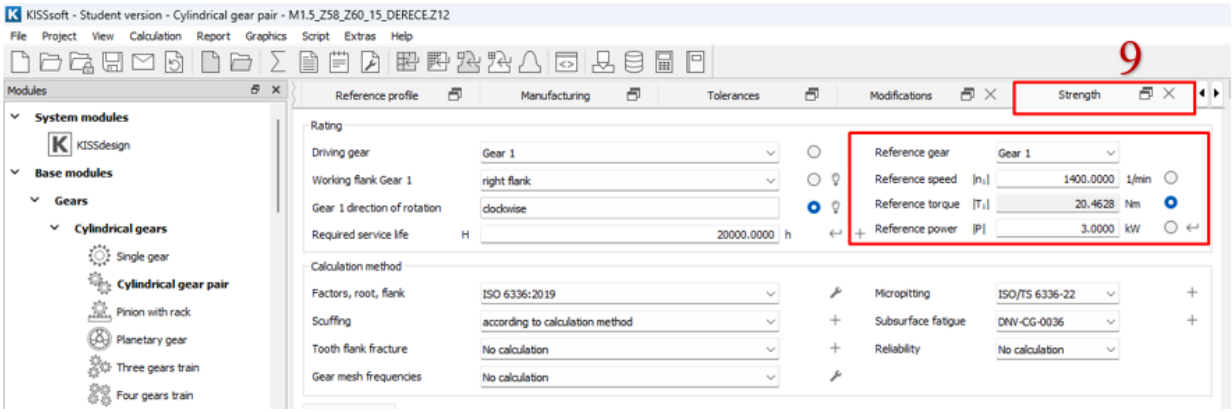
Şekil 8. Dişli geometrisinin KISSsoft® programında oluşturulması: 2. Adım
Figure 8. *Creation of the gear geometry in KISSsoft® program: Step 2*

Şekil 9'da verilen Modifications kısmından, 8 numaralı bölümden (Z_1) ve (Z_2) için diş uçlarına 0,370 mm'lik bir radius tanımlanmıştır.



Şekil 9. Dişli geometrisinin KISSsoft® programında oluşturulması: 3. Adım
Figure 9. *Creation of the gear geometry in KISSsoft® program: Step 3*

Bu çalışmada, redüktör için kabul edilen motor devri 1400 dev/dak ve 3 kW'lık piyasada bulunabilen motora göre değerler kabul edilmiştir. Şekil 10'da verilen Strength kısmından, 9 numaralı bölümden (Z_1) pinyon dişliye 1400 dev/dak ve 3 kW'lık devir ve güç tanımlanmıştır.



Şekil 10: Dişli geometrisinin KISSsoft® programında oluşturulması: 4. Adım
Figure 10: *Creation of the gear geometry in KISSsoft® program: Step 4*

Bu çalışma kapsamında tasarımı yapılan dişli çiftlerine ait sayısal veriler Tablo 1'de yer almaktadır. İlk grupta, profil kaydırma yapılmadan durum incelenmiştir ve bu durumda diş üstü çaplarından kesme uygulanmıştır. Ayrıca, profil kaydırma yapıldığı durumlarda profil kaydırma değerleri de Tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Harmonik redüktör tasarım bilgileri
Table 1. *Design information of harmonic reducer*

Grup No	Model	Profil Basınç Açısı (°)	İç Dişli (Z_2)	Dış Dişli (Z_1)	Profil Kaydırma (Z_1)	Profil Kaydırma (Z_2)	Dişli Uç Değişikliği (mm) (Z_1)	Dişli Uç Değişikliği (mm) (Z_2)	Dişliler Arası Eksantriklik Mesafesi (mm)	Çevrim Oranı
1. Grup	Model 1	15	60	58	0	0	-1	-1	1,5	29
	Model 2	20			0	0	-0,75	-0,75	1,5	
	Model 3	25			0	0	-0,70	-0,70	1,5	
	Model 4	30			0	0	-0,60	-0,60	1,5	
	Model 5	15	60	57	0	0	-0,75	-0,75	2,25	19
	Model 6	20			0	0	-0,58	-0,58	2,25	
	Model 7	25			0	0	-0,40	-0,40	2,25	
	Model 8	30			0	0	-0,1250	-0,1250	2,25	
2. Grup	Model 9	15	60	58	0,528	-1,2	0	0	1,99	29
	Model 10	20			0	-0,5578	0	0	2	
	Model 11	25			0	-0,4324	0	0	1,955	
	Model 12	30			-0,093	-0,2073	0	0	1,86	
	Model 13	15	60	57	0	-0,5515	0	0	2,71	19
	Model 14	20			0	-0,3923	0	0	2,6555	
	Model 15	25			0	-0,2471	0	0	2,55	
	Model 16	30			0,05	-0,05	0	0	2,25	

2.2. Diş mukavemet hesaplarının yapılması
2.2. Performing of gear stress calculations

Dişlilerin mukavemet hesaplarında standartların belirttiği üzere, incelenmesi gereken önemli parametreler; diş dibi (diş kökü) güvenlik değeri ve dişli yan yüzey mukavemet güvenlik değeridir. Dişliler, üzerine gelen diş eğilme gerilmeleri dolayısıyla ani şekilde kırılabilirler ya da dişlilerin çalışma koşulları nedeniyle belirli bir süreden sonra yüzeylerinde oluşan ezilmeden dolayı çukurcuk (pitting) hasarı oluşabilir. Bu nedenle, bu iki parametre dişlilerin tasarımında büyük önem taşımaktadır.

Dişlilerde mukavemet hesaplamaları için DIN, ISO, AGMA, TGL, EN gibi birçok standart bulunmaktadır. ISO standardının dişli çark hesaplamalarında yaygın şekilde kullanıldığı ve pratik verilerin standart çerçevesinde gerçekleştirilen hesap değerlerini doğruladığı bilinmektedir (Uzay & Geren, 2017). Bu çalışma kapsamında, dişlilerin mukavemet hesaplamaları ISO 6336:2019 standardı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mukavemet hesaplarının yanı sıra, sonlu elemanlar analizleri de çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Dişli çarklarda mukavemet hesaplamalarında, yüzey basıncı (Hertz gerilmesi) ve diş dibi gerilmesine göre iki temel kriter üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

2.2.1. Diş dibi gerilmesine göre mukavemet hesaplamaların yapılması
2.2.1. Stress calculations according to tooth root stress

Diş dibi gerilmesine göre ISO 6336:2019 standardına uygun mukavemet hesaplarında kullanılan bağıntılar Denklem 5 ile Denklem 13'de ifade edilmiştir.

$\sigma_{F0}=\frac{F_t}{b.m}.Y_F.Y_S.Y_\beta$ nominal diş dibi gerilme bağıntısı Denklem 4'te ifade edilmiştir. (4)

$\sigma_F=\sigma_{F0}.K_A.K_V.K_{Fb}.K_{Fa}\le\sigma_{FP}$ diş dibi gerilme bağıntısı Denklem 5'de ifade edilmiştir. (5)

Dişli form faktörü Y_F, diş formu ve diş sayısına bağlı bir katsayıdır ve Denklem 6'da ifade edilmiştir.

$$Y_F=\frac{\frac{6.h_{Fe}}{m_n}.\cos a_{Fen}}{\left(\frac{s_{Fn}}{m_n}\right)^2.\cos a_n} \quad (6)$$

Diş dibi çentik faktörü Y_S, değerinin hesaplanması, Denklem 7 ve Denklem 8'de verilmiştir.

$$Y_S=(1{,}2+0{,}3.L).q_s^{\left[1{,}21+\frac{2{,}3}{L}\right]^{-1}} \quad (7)$$

$$L=\frac{s_{Fn}}{h_{Fe}},\qquad q_s=\frac{s_{Fn}}{2\rho_F} \quad (8)$$

Taşlanmış dişliler için Y_{Sg}, değerinin hesaplanması, Denklem 9'da verilmiştir.

$$Y_{Sg}=\frac{1{,}3.Y_S}{1{,}3-0{,}6.\sqrt{\frac{t_g}{r_g}}} \quad (9)$$

Müsaade edilen diş dibi gerilmesi σ_{FP}, hesaplanması Denklem 10'da verilmiştir.

$$\sigma_{FP}=\frac{\sigma_{Flim}.Y_{ST}.Y_{NT}}{S_{Fmin}}.Y_{\delta relT}.Y_{RrelT}.Y_X=\frac{\sigma_{FG}}{S_{Fmin}} \quad (10)$$

Burada kritik olan minimum diş dibi katsayısı (Minimal Root Safety) değeridir. S_{Fmin} değerini çektiğimizde oluşan ifade Denklem 11'de verilmiştir.

$$S_{Fmin} = \frac{\sigma_{FG}}{\sigma_{FP}} \tag{11}$$

Diş dibi emniyeti (Root Safety) değeri S_F değerinin hesaplanmasında kullanılan ifade, Denklem 12'de verilmiştir.

$$S_F = \frac{\sigma_{FG}}{\sigma_F} \tag{12}$$

Denklemlerdeki K Katsayıları;
Uygulama Katsayısı K_A
Dinamik yük katsayısı K_V
Helis yönünde yük dağılım faktörleri; $K_{H\beta}$ (Diş yüzeyi), $K_{F\beta}$ (Diş dibi)
Profil yönünde yük dağılım faktörleri; $K_{H\alpha}$ (Diş yüzeyi), $K_{F\alpha}$ (Diş dibi)
olarak ifade edilmektedir. Denklemdeki diğer unsurlar semboller kısmında verilmiştir.

2.2.2. KISSsoft® programından diş dibi gerilmesine göre hesaplanan değerler
2.2.2. Calculated values according to tooth root stress from KISSsoft® program

Yapılan analizlerde diş dibi gerilmesine göre mukavemet değerlerinin KISSsoft® programından elde edilen sonuçları, Tablo 2'de paylaşılmıştır.

Tablo 2. Diş dibi gerilmesine göre analiz sonuçları
Table 2. *Analysis results according to tooth root stress*

	F_t (N)	σ_{F0} (MPa)	σ_F (MPa)	σ_{FP} (MPa)	σ_{FG} (MPa)	σ_{Flim} (MPa)	S_{Fmin}	S_F
Model 1	470,4	111,38	201,82	553,78	719,91	430	1,3	3,567
Model 2		102,42	195,03	555,08	721,6			3,7
Model 3		96,19	187,7	556,36	723,26			3,853
Model 4	478,7	166,98	333,67	591,44	768,87			2,304
Model 5		125,93	231,71	553,73	719,85			3,107
Model 6		115,61	217,47	555,03	721,54			3,318
Model 7		107,71	207,43	556,31	723,2			3,486
Model 8	470,4	171,57	342,76	591,4	768,81			2,243
Model 9		128,22	261,36	557,46	724,69			2,773
Model 10		105,94	241,36	555,08	721,6			2,99
Model 11		95,11	207,21	556,36	723,26			3,49
Model 12	478,7	99,73	202,26	562,52	731,28			3,616
Model 13		76,89	216,4	553,73	719,85			3,327
Model 14		96,47	251,37	555,03	721,54			2,87
Model 15		87,78	205,82	556,31	723,2			3,514
Model 16		108,23	214,65	562,75	731,58			3,408

2.2.3. Yüzey basıncı (Hertz Gerilmesi) kontrolü
2.2.2. Surface pressure (Hertz stress) control

Yüzey basıncı sonucu oluşan Hertz gerilmeleri ve pitting hasarı kontrolüne ilişkin ISO 6336:2019 standardına göre yapılan mukavemet hesaplamalarında kullanılan formül, Denklem 13 ile Denklem 16'de ifade edilmiştir.

$$\sigma_H = Z_B.\sigma_{HO}.\sqrt{K_A.K_V.K_{H\beta}.K_{H\alpha}} \pounds \sigma_{HP} \qquad \sigma_{HO} = Z_H.Z_E.Z_\varepsilon.Z_\beta.\sqrt{\frac{F_t}{d_1.b}.\frac{u+1}{U}}$$

σ_H = Yüzey gerilmesi (MPa) (13)

σ_{HO} = Taksimat dairesindeki yüzey gerilmesi (MPa)

Müsaade edilen yüzey gerilemesinin σ_{HP}, hesaplanmasında kullanılan formül Denklem 14'de verilmiştir.

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim}.Z_{NT}}{S_{Hmin}}.Z_L.Z_V.Z_R.Z_W.Z_X = \frac{\sigma_{HG}}{S_{Hmin}} \quad (14)$$

Kritik olan minimum yan yüzey güvenliği (Minimal Flank Safety) $S_{H\,min}$, değerinin hesaplanmasında kullanılan bağıntı Denklem 15'de verilmiştir.

$$S_{Hmin} = \frac{\sigma_{HG}}{\sigma_{HP}} \quad (15)$$

Yan yüzey güvenliği (Flank Safety) S_{HBD}, değerinin hesaplanmasında kullanılan formül Denklem 16'da verilmiştir.

$$S_{HBD} = \frac{\sigma_{HG}}{\sigma_{HBD}} \quad (16)$$

Denklemdeki diğer unsurlar semboller kısmında verilmiştir.

2.2.4. KISSsoft® programında yüzey basıncına göre (Hertz Gerilmesi) göre hesaplanan değerler
2.2.4. Calculated values according to surface pressure (Hertz stress) in KISSsoft® program

Yüzey basıncına göre KISSsoft® programında elde edilen mukavemet değerleri sonuçları Tablo 3'te paylaşılmıştır.

Tablo 3. Yüzey basıncına göre analiz sonuçları
Table 3. *Analysis results according to surface pressure*

	σ_{Hlim} (MPa)	σ_H (MPa)	σ_{HBD} (MPa)	σ_{H0} (MPa)	σ_{HP} (MPa)	σ_{HG} (MPa)	$S_{H\,min}$	S_H
Model 1	1500	105,44	114,25	75,97	1511,31	1435,74	0,95	12,567
Model 2		95,68	104,27	67,01	1522,58	1446,46		13,872
Model 3		88,97	96,81	61,38	1531,2	1454,64		15,025
Model 4		84,96	91,25	57,73	1538,08	1461,18		16,013
Model 5		132,56	162,25	94,68	1493,71	1419,02		8,746
Model 6		118,7	138,58	83,51	1504,85	1429,61		10,316
Model 7		110,26	125,02	76,36	1513,37	1437,7		11,5
Model 8		103,24	112,09	69,64	1520,17	1444,16		12,883
Model 9		54,52	181,96	36,41	1562,81	1484,67		8,159
Model 10		56,87	188,92	35,73	1564,45	1486,23		7,867
Model 11		58,36	149,41	37,46	1564,04	1485,84		9,945
Model 12		60,7	123,24	40,42	1561,79	1483,7		12,039
Model 13		81,77	81,77	46,01	1534,99	1458,24		17,8331
Model 14		84,3	226,71	49,31	1534,68	1457,95		6,431
Model 15		87,11	169,04	53,77	1532,71	1456,07		8,614
Model 16		104,58	114,04	71,03	1520,17	1444,16		12,664

KISSsoft® programına göre, metal malzemeler için ISO/DIN normlarına ve AGMA normlarına uygun olarak kabul edilen güvenli değerler Tablo 4 ve Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 4. ISO/DIN standartlarına göre belirlenen emniyet değerleri
Table 4. Safety values according to ISO/DIN standards

	m<= 0,5	m=1	m>=2
Root Safety (Diş Dibi Güvenliği)	0,6	1,2	1,4
Flank Safety (Yan Yüzey Güvenliği)	0,6	0,9	1

Tablo 5. ISO standartlarına göre belirlenen emniyet değerleri
Table 5. Safety values according to ISO standards

	m<= 0,5	m=1	m>=2
Root Safety (Diş Dibi Güvenliği)	0,43	0,85	1
Flank Safety (Yan Yüzey Güvenliği)	0,6	0,9	1

Dişli çarkların analizlerinde kullanılan malzeme olarak sementasyon çeliği olarak bilinen DIN 1.6587 (18CrNiMo7-6) seçilmiştir. Bu malzemenin mekanik özellikleri Tablo 6'da yer almaktadır.

Tablo 6. 18CrNiMo7-6 malzeme özellikleri
Table 6. *18CrNiMo7-6 material properties*

Yüzey Sertliği	HRC 61
Diş dibi gerilmesi için sonsuz ömür dayanımı (MPa)	430
Hertz basıncı için sınır dayanımı (MPa)	1500
Young Modülü (MPa)	206000
Poisson Oranı	0,3
Çekme Dayanımı (MPa)	1200
Akma Dayanımı (MPa)	850

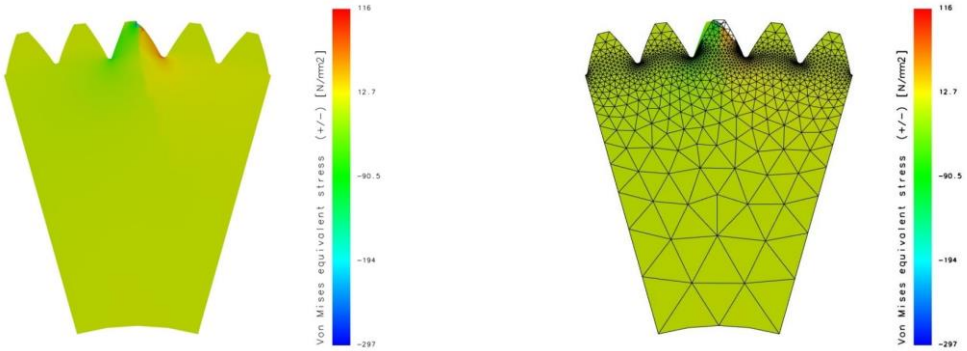
Sonlu elemanlar analizlerinde mesh doğruluğu yapmak için model 1'de kaba, orta ve ince mesh olmak üzere 3 farklı mesh tipinde analiz yapılmış ve sonuçları Tablo 7'de paylaşılmıştır. Tablo 7'deki sonuçlar incelendiğinde mesh tipi değiştiğinde analiz sonuçlarında çok küçük değişiklikler olduğu görülmüştür ve bu çalışma kapsamında tüm sonlu elemanlar analiz sonuçları ince mesh parametrelerinde yapılmıştır.

Tablo 7. Model 1 sonlu elemanlar mesh doğrulama analiz sonuçları
Table 7. *Model 1 finite element mesh validation analysis results*

	Kaba Mesh	Orta Mesh	İnce Mesh
Düğüm Sayısı	5037	5229	5409
Eleman Sayısı	2376	2468	2554
σ_{max} (MPa)	109,28	109,43	109,06
σ_{min} (MPa)	-124,05	-124,73	-124,14

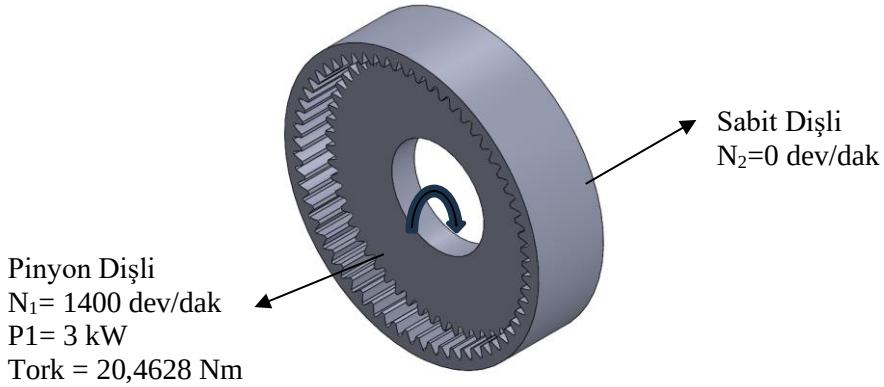
KISSsoft® programında sonlu elemanlar analizleri de dişliler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Program, Quadratic mesh yapısı kullanmaktadır. Quadratic mesh yapısı diğer mesh tiplerine göre daha yüksek doğruluk sağlarlar. Her bir elemanın daha fazla dengesi ve daha yüksek dereceli polinomlar kullanarak daha hassas sonuçlar verirler. Karmaşık geometri ve dinamik problemler için daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmeyi sağlar. Örnek bir tasarım için mesh yapısı ve Von Mises gerilme dağılımları (Model 16) Şekil 11'de sunulmuştur. Bu analizlere göre, tasarımların tümünde ISO 6336 standardı kapsamında yapılan hesaplara paralel şekilde, emniyetli değerler içerisinde kalındığı görülmüştür. Analiz sonuçlarında en yüksek gerilme değerleri, 16 nolu modelde -275,57 MPa (basma şeklinde) olarak hesaplanmıştır. 18CrNiMo7-6 malzemesinin akma dayanımı 850 MPa ve diş dibi gerilmesi için sonsuz ömür dayanımı değeri olan 430 MPa değerinin çok altında değerler

elde edilmiştir. Gerçekleştirilen tüm tasarımlarda sonlu eleman analizlerinde emniyetli bölge içerisinde kalındığı belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında yapılan diğer modeller için de yapılan sonlu elemanlar analiz sonuçları Tablo 8'de paylaşılmıştır.



Şekil 11. Sonlu elemanlar analiz resmi (Model 1)
Figure 11. *Image of finite element analysis (Model 1)*

Sonlu eleman analiz parametreleri Şekil 12'de ifade edilmiştir. Pinyon dişliye n_1=1400 dev/dak devir ve $Tork_1$= 20,4628 Nm'lik değer tanımlanmıştır. İç dişli sabit olarak kabul edilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri statik analiz olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 12. Sonlu elemanlar model parametreleri
Figure 12. *Finite element model parameters*

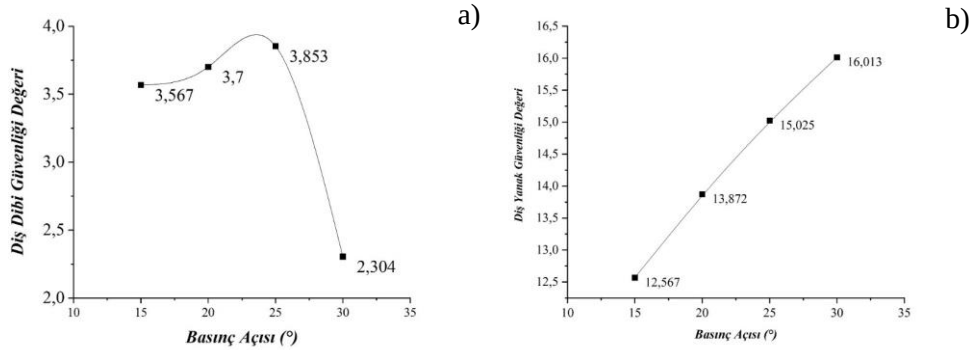
Tablo 8. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları
Table 8. *Finite element analysis results*

	Model Adı	σ_{Max} MPa	σ_{Min} MPa	Mesh Tipi (Quadratic) Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı
Z58-Z60 Profil Kaydırmasız Çifti	Model 1 (15°)	109,06	-124,14	5409	2554
	Model 2 (20°)	96,84	-118	5143	2434
	Model 3 (25°)	176,36	-151,65	5634	2537
	Model 4 (30°)	130,99	-181,15	7011	3340
Z57-Z60 Profil Kaydırmasız Dişli Çifti	Model 5 (15°)	121,81	-140,18	5385	2540
	Model 6 (20°)	108,84	-131,84	5240	2471
	Model 7 (25°)	101,37	-130,9	5326	2519
	Model 8 (30°)	137,01	-189,24	6885	3282
Z58-Z60 Profil Kaydırmalı Dişli Çifti	Model 9 (15°)	119,09	-142,48	4662	2225
	Model 10 (20°)	99,84	-121,69	4316	2059
	Model 11 (25°)	90,6	-117,38	5977	2870
	Model 12 (30°)	102,68	-143,21	5098	2441
Z5-Z60 Profil Kaydırmalı Dişli Çifti	Model 13 (15°)	54,08	-61,31	4019	1912
	Model 14 (20°)	92,6	-112	4392	2095
	Model 15 (25°)	85,79	-112,15	5955	2858
	Model 16 (30°)	156,09	-275,57	5828	2771

Tablo 9. Diş dibi ve yüzey basıncı hesap sonuçları
Table 9. *Results of the root and flank safety*

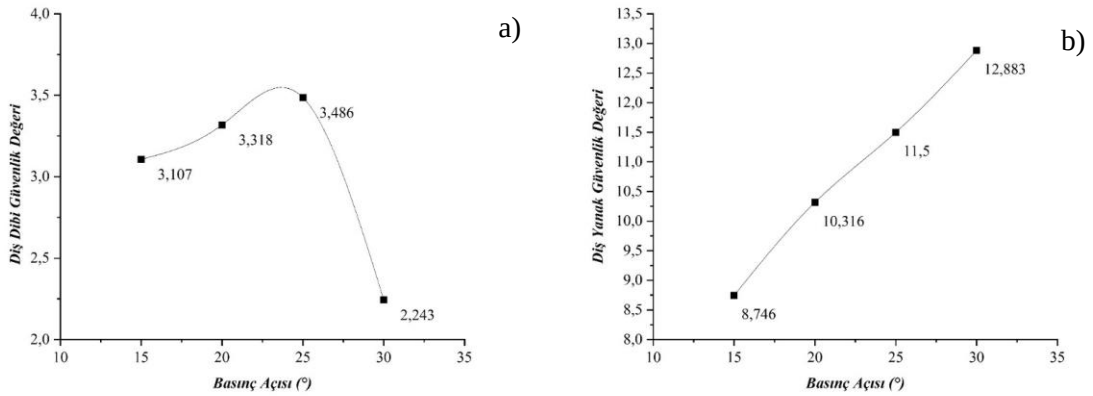
	Model Adı	Basınç Açısı (°)	Root Safety (Diş Dibi Güvenliği)	Flank Safety (Yan Yüzey Güvenliği)
Z58-Z60 Profil Kaydırmasız Dişli Çifti	Model 1	15	3,567	12,567
	Model 2	20	3,7	13,872
	Model 3	25	3,853	15,025
	Model 4	30	2,304	16,013
Z57-Z60 Profil Kaydırmasız Dişli Çifti	Model 5	15	3,107	8,746
	Model 6	20	3,318	10,316
	Model 7	25	3,486	11,5
	Model 8	30	2,243	12,883
Z58-Z60 Profil Kaydırmalı Dişli Çifti	Model 9	15	2,773	8,159
	Model 10	20	2,99	7,867
	Model 11	25	3,49	9,945
	Model 12	30	3,616	12,039
Z57-Z60 Profil Kaydırmalı Dişli Çifti	Model 13	15	3,327	17,8331
	Model 14	20	2,87	6,431
	Model 15	25	3,514	8,614
	Model 16	30	3,408	12,664

Tablo 9'da bütün modeller için diş dibi (kök) güvenlik değeri (Root Safety) ve diş yan yüzey güvenlik değeri (Flank Safety) sonuçları verilmiştir. ISO/DIN normlarına göre ve AGMA normlarına göre bakıldığında kök güvenlik değerleri ve yan yüzey güvenlik değerleri yüksek çıktığı görülmektedir.



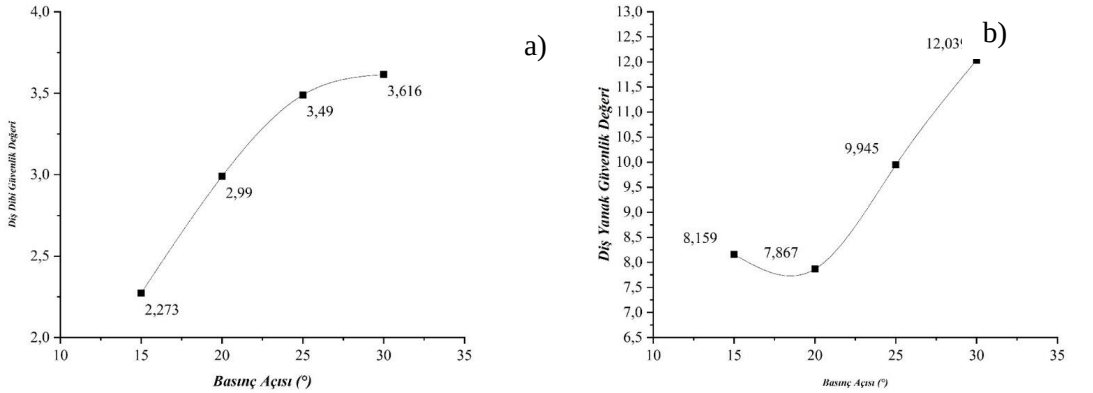
Şekil 13. Z58 – Z60 profil kaydırmasız dişli çiftinde diş dibi güvenlik değeri ve diş yan yüzey güvenlik değerlerinin basınç açısına göre grafikleri. (a) Diş dibi güvenlik değerinin basınç açısına göre grafiği. (b) Diş yan yüzey güvenlik değerinin basınç açısına göre grafiği.
Figure 13. *Graphs of tooth bottom safety value and tooth sidewall safety values according to pressure angle for the Z58 - Z60 profile non-profile shifted gear pair. (a) Graph of tooth bottom safety value according to pressure angle. (b) Graph of tooth sidewall safety value according to pressure angle.*

Z58 – Z60 dişli çiftinde profil kaydırma yapılmadığı durumu özelinde incelendiğinde, Şekil 13'te görüldüğü üzere analiz sonuçlarına göre yan yüzey güvenlik değerleri ile basınç açısı arasında doğrusal bir artış görülmektedir. Basınç açısı arttıkça yan yüzey güvenlik değerleri de artış göstermektedir. Diş dibi güvenlik değerlerine baktığımızda ise, 15°, 20° ve 25° için basınç açısının artmasıyla diş dibi güvenlik değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ancak, 30° için elde edilen 2,304 değeri, ISO/DIN standartlarıyla karşılaştırıldığında yüksek emniyetli bir değer olduğu gözlemlenmektedir.



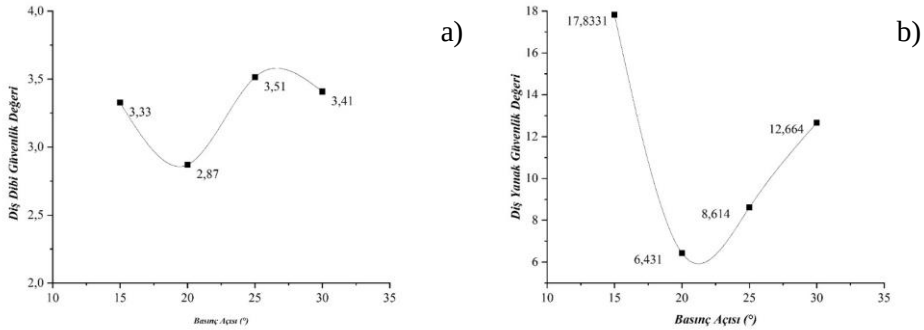
Şekil 14. Z57 – Z60 profil kaydırmasız dişli çiftinde diş dibi güvenlik değeri ve diş yan yüzey güvenlik değerlerinin basınç açısına göre grafikleri. (a) Diş dibi güvenlik değerinin basınç açısına göre grafiği. (b) Diş yan yüzey güvenlik değerinin basınç açısına göre grafiği.
Figure 14. *Graphs of tooth bottom safety value and tooth sidewall safety values according to pressure angle for the Z57 - Z60 profile non-profile shifted gear pair. (a) Graph of tooth bottom safety value according to pressure angle. (b) Graph of tooth sidewall safety value according to pressure angle.*

Z57 – Z60 dişli çiftinde profil kaydırma yapılmadığı durumu özelinde incelendiğinde, Şekil 14'te görüldüğü üzere analiz sonuçlarına göre yan yüzey güvenlik değerleri ile basınç açısı arasında doğrusal bir artış gözlemlenmektedir. Basınç açısı arttıkça yan yüzey güvenlik değerleri de artmaktadır. Diş dibi güvenlik değerlerine baktığımızda ise, 15°, 20° ve 25° için basınç açısının artmasıyla diş dibi güvenlik değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ancak, 30° için elde edilen 2,243 değeri, ISO/DIN standartlarıyla karşılaştırıldığında yüksek emniyetli bir değer olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 15. Z58 – Z60 profil kaydırmalı dişli çiftinde diş dibi güvenlik değeri ve diş yan yüzey güvenlik değerlerinin basınç açısına göre grafikleri. (a) Diş dibi güvenlik değerinin basınç açısına göre grafiği. (b) Diş yan yüzey güvenlik değerinin basınç açısına göre grafiği.
Figure 15. *Graphs of tooth bottom safety value and tooth sidewall safety values according to pressure angle in Z58 - Z60 profile shifted gear pair. (a) Graph of tooth bottom safety value according to pressure angle. (b) Graph of tooth sidewall safety value according to pressure angle.*

Z58 – Z60 dişli çiftinde profil kaydırma yapıldığı durumu özelinde incelendiğinde, Şekil 15'te görüldüğü üzere analiz sonuçlarına göre yan yüzey güvenlik değerleri ile basınç açısı arasında 20° basınç açısında bir düşüş olduğu gözlemlenmektedir. Ancak, değerler standartlarla kıyaslandığında yüksek çıkmaktadır. Diş dibi güvenlik değerlerine baktığımızda ise, basınç açısı arttıkça diş dibi güvenlik değerlerinin de arttığı görülmektedir. ISO/DIN standartlarına göre kıyaslandığında, bu değerlerin yüksek emniyetli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 16. Z57 – Z60 profil kaydırmalı dişli çiftinde diş dibi güvenlik değeri ve diş yan yüzey güvenlik değerlerinin basınç açısına göre grafikleri. (a) Diş dibi güvenlik değerinin basınç açısına göre grafiği. (b) Diş yan yüzey güvenlik değerinin basınç açısına göre grafiği.
Figure 16. *Graphs of tooth bottom safety value and tooth sidewall safety values according to pressure angle in Z57 - Z60 profile shifted gear pair. (a) Graph of tooth bottom safety value according to pressure angle. (b) Graph of tooth sidewall safety value according to pressure angle.*

Z57 – Z60 dişli çiftinde profil kaydırma yapıldığı durumu özelinde incelendiğinde, Şekil 16'da görüldüğü üzere analiz sonuçlarına göre yan yüzey güvenlik değerleri ile basınç açısı arasında 20° basınç açısında bir düşüş olduğu gözlemlenmektedir. Ancak, değerler standartlarla kıyaslandığında yüksek çıkmaktadır. Diş dibi güvenlik değerlerine baktığımızda ise, basınç açısı arttıkça diş dibi güvenlik değerlerinin de arttığı görülmektedir. ISO/DIN standartlarına göre kıyaslandığında, bu değerlerin yüksek emniyetli olduğu anlaşılmaktadır.

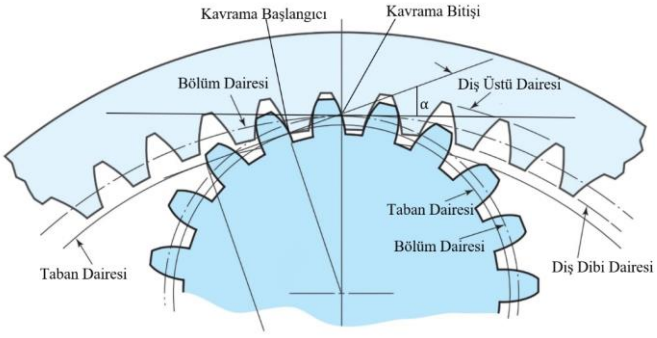
2.3. Kavrama oranlarının basınç açısına göre değişiminin incelenmesi
2.3. Investigation of the change of contact ratios according to pressure angle

Kavrama oranı, dişlilerde önemli bir parametredir ve kavrama boyunun dişli taksimatına oranı olarak ifade edilebilir. Dişlilerde kavrama oranı arttıkça, daha fazla dişin temas etmesi anlamına gelir ve bu durum güç iletimini artırır. Kavrama oranı, dişli çarkın dayanıklılığı ve performansını etkiler. Kavrama oranının düşük olduğu durumlarda, diş dibinden kırılma ihtimali yüksektir. Dolayısıyla, hareketin ve verimliliğin yüksek olması istenilen yerlerde kavrama oranının da yüksek olması arzu edilir. Tablo 8'de, KISSsoft® programında hesaplatılan kavrama oranları verilmiştir.

Düz dişliler için kavrama oranının hesaplanmasında kullanılan bağıntı Denklem 18'de verilmiştir (Şeber, 2002).

$$\text{Kavrama oranı, } \varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{r_{k1}^2 - r_{g1}^2} + \sqrt{r_{k2}^2 - r_{g2}^2} - a\sin\alpha_b}{\pi\, m \cos\alpha_0} \quad (18)$$

r_g = referans yarı çapı (mm), r_k = diş üstü yarı çapı (mm), a = merkez mesafesi (mm), α_b = çalışma basınç açısı (°)
α_0 = referans basınç açısı (°), m= modül

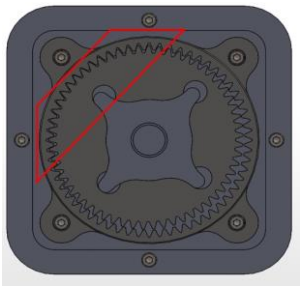


Şekil 17. Dişlilerde kavrama oranı ilişkisi (Budynas & Nisbett, 2014).
Figure 17. *Profile shifting ratio relationship in gears* (Budynas & Nisbett, 2014).

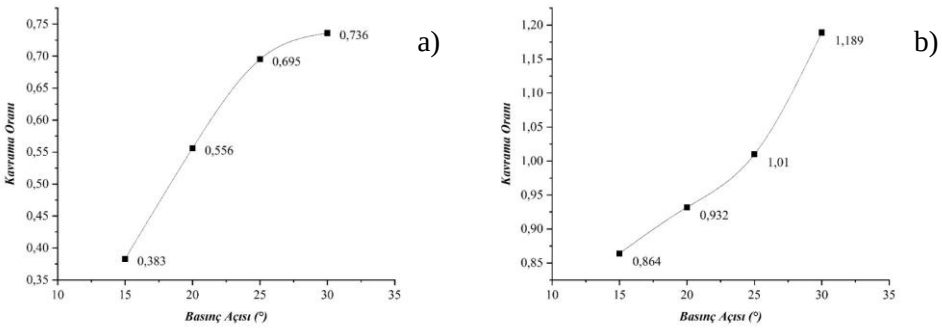
Tablo 10. Kavrama oranının, basınç açısıyla olan ilişkisi.
Table 10. *Relationship between contact ratio and pressure angle.*

	KISSsoft® Kavrama Oranı	Toplam Kavrama Oranı
Model 1 (15°)	0,383	6,894
Model 2 (20°)	0,556	10,008
Model 3 (25°)	0,695	12,51
Model 4 (30°)	0,736	13,248
Model 5 (15°)	0,864	15,552
Model 6 (20°)	0,932	16,776
Model 7 (25°)	1,01	18,18
Model 8 (30°)	1,189	21,402
Model 9 (15°)	1,579	28,422
Model 10 (20°)	1,641	29,538
Model 11 (25°)	1,523	27,414
Model 12 (30°)	1,39	25,02
Model 13 (15°)	2,031	36,558
Model 14 (20°)	1,816	32,688
Model 15 (25°)	1,613	29,034
Model 16 (30°)	1,076	19,368

KISSsoft® programı, sadece temas noktasının olduğu yerleri hesapladığı için hesaplamalar düşük çıkmaktadır. Ancak, bu redüktörün çalışma yapısı gereğince, kavrama anında 18 dişlinin kavradığı Şekil 18'de görülmektedir. Dolayısıyla redüktörde gerçekte oluşan kavrama oranı yaklaşık 18 kat daha fazla olmaktadır. Gerçekte kabul edilmesi önerilen kavrama oranı değerleri de Tablo 8'de verilmiştir.

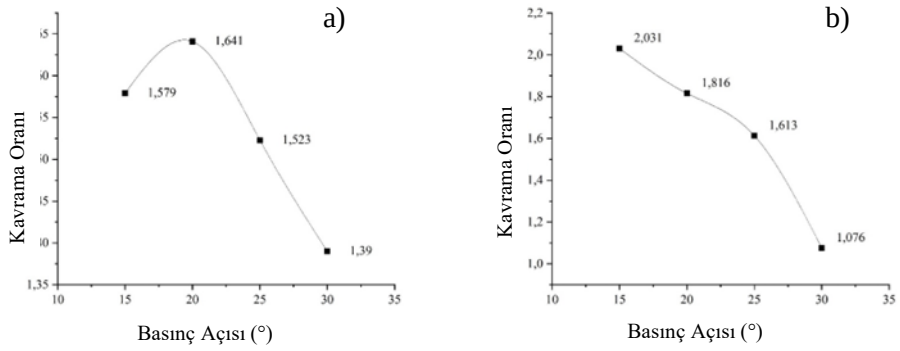


Şekil 18. Redüktörde temas eden diş sayısı.
Figure 18. *Number of contacting teeth in the reducer.*



Şekil 19. Profil kaydırmasız dişli çiftlerinde basınç açısı ile kavrama oranı arasındaki ilişki grafiği.
(a) Z58 – Z60 dişli çifti (b) Z57 – Z60 profil dişli çifti
Figure 19. *Graph of the relationship between pressure angle and engagement ratio for gear pairs without profile shift (a) Z58 – Z60 gear pair (b) Z57 – Z60 profile gear pair.*

Z58 – Z60 profil kaydırma yapılmayan dişli çiftlerinde, Şekil 19'daki grafikler incelendiğinde basınç açısı arttıkça kavrama oranının da arttığı görülmektedir. En yüksek kavrama oranı her iki dişli çiftinde de 30° basınç açısında elde edildiği görülmüştür.



Şekil 20. Profil kaydırmalı dişli çiftlerinde basınç açısı ile kavrama oranı arasındaki ilişki grafiği. (a) Z58 – Z60 dişli çifti (b) Z57 – Z60 dişli çifti
Figure 20. *Graph of the relationship between pressure angle and engagement ratio for gear pairs with profile shifting. (a) Z58 – Z60 gear pair (b) Z57 – Z60 gear pair*

Profil kaydırma yapılan dişli çiftlerinde, Şekil 20'deki grafikler incelendiğinde basınç açısı arttığında kavrama oranının da azaldığı görülmektedir. En yüksek kavrama oranı 15° basınç açısında Z57 – Z60 dişli çiftinde 2,031 olduğu görülmüştür.

Çalışma kapsamında nihai olarak, profil kaydırma vasıtasıyla harmonik hareketin oluşturulabildiği, bunun yanı sıra literatürde yapılan çalışmalardan. (Li vd., 2022; Mo vd., 2022) farklı ve daha basit bir bakış açısıyla, geometrik modifikasyonlara gerek kalmadan sadece profil kaydırma ile diş dibi gerilmelerinin ve yüzey basıncı değerlerinin azaltılabildiği, ayrıca bu iki olgunun birlikte gerçekleştirilebildiği görülmüştür. Harmonik hareket, tek kademede elde edilen çevrim oranını artırmaktadır. Elde edilen sonuçların detaylı analizi tartışma ve sonuçlar kısmında yer almaktadır.

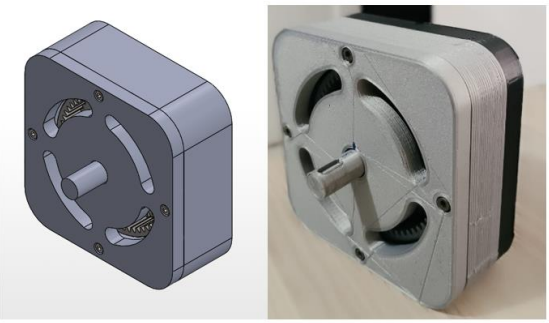
3. Tartışma ve sonuçlar
3. Discussion and conclusions

Bu çalışmada, evolvent profil yapısına sahip rijit harmonik redüktör dişli çiftinde farklı kavrama açıları ile diş dibi (kök) güvenliği (root safety) ve diş yan yüzey güvenliği (flank safety) değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Basınç açısı arttıkça genel olarak diş dibi (kök) güvenlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, ISO 6336 standardının belirtiği minimum güvenlik değerleri ile kıyaslandığında yüksek diş dibi (kök) güvenlik değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Aynı şekilde, basınç açısının artmasıyla genel olarak diş yan yüzey güvenlik değerlerinin de yükseldiği gözlemlenmiştir.

Harmonik redüktörde hem profil kaydırmasız dişli çifti hem de profil kaydırmalı durum incelenmiştir. Her iki durumda da Z58 – Z60 dişli çifti ve Z57 – Z60 dişli çifti analiz edilmiştir. Profil kaydırma yapılmadığı durumlarda diş başlarından kesme yapılmıştır. Bu durumda kavrama oranı, diş dibi güvenlik değerleri ve diş yan yüzey güvenlik değerleri düşük değerler sergilemiştir.

Profil kaydırmanın yapılmadığı dişli çiftlerinde kavrama açıları ile kavrama oranı arasında açı arttıkça kavrama oranlarında bir artış gözlenmiştir. Diğer taraftan, profil kaydırma yapıldığı dişli çiftlerinde ise Z58 – Z60 dişli çiftinde 20° basınç açısında en yüksek kavrama oranının 1,641 olduğu tespit edilmiştir. Z57 – Z60 profil kaydırmalı dişli çiftinde ise 15° basınç açısında kavrama oranının 2,031 olduğu görülmüştür.

Profil kaydırmalı dişli çiftlerinde yapılan analizler sonucunda daha yüksek kavrama oranları elde edilmiştir. Özellikle Z58 – Z60 dişli çiftinde çevrim oranı 29, kavrama açısı 20° ve kavrama oranı 1,641 olarak tespit edilmiştir. Bu durum, dişli çiftinin seçilmesinin daha uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 20° basınç açısının avantajlarından biri, standart kesici takımlarla üretilebilmesidir. Farklı kavrama açılarının kullanılması durumunda özel kesici takımların üretilmesi gerekebilir ki bu da maliyet ve zaman açısından dezavantaj oluşturabilir.



Şekil 21. 3B yazıcıda üretilmiş harmonik redüktör görseli
Figure 21. *Image of harmonic gearbox produced with 3D printer*

Tasarlanan sistemin harmonik hareket kontrolleri, KISSsoft® programı kullanılarak, 3D tasarım programında ve seçilen bir tasarımı 3D yazıcıyla oluşturularak çapraz şekilde doğrulanmıştır. Bu kapsamda Şekil 21'de görseli verilen redüktör Z58 – Z60 dişli çifti ve profil kaydırmalı, basınç açısı 20° olan 3B yazıcıda PLA malzemeden üretilmiş ve montajı yapılmıştır. Üretilen redüktörün kinematik anlamda başarıyla çalıştığı görülmüştür.

Semboller
Symbols

a Merkez mesafesi (mm)
m_n Normal modül (mm)
b Dişli genişliği (mm)
σ_F Diş dibi gerilmesi (MPa)
σ_{FP} Müsaade edilen diş dibi gerilmesi (MPa)
σ_{F0} Nominal diş dibi gerilmesi (MPa)
σ_{HG} Herz Gerilmesi Limiti (MPa)
σ_{HBD} Temas Gerilimi (MPa)
σ_H Yüzey gerilmesi (MPa)
σ_{HO} Taksimat dairesindeki yüzey gerilmesi (MPa)
σ_{HP} Müsaade edilen referans yüzey gerilmesi (MPa)
$\sigma_{H\,lim}$ Müsaade edilen yüzey gerilmesi (MPa)
S_{Fmin} Gerekli emniyet katsayısı
S_F Diş dibi (kökü) güvenliği değeri (Root safety)
S_H Diş yan yüzey güvenliği değeri (Flank safety)
σ_{FG} Müsaade edilen düzeltilmiş diş dibi gerilmesi (MPa)
σ_{Flim} Müsaade edilen referans diş dibi gerilmesi (MPa)
σ_{FP} Emniyetli diş dibi gerilmesi (MPa)
F_t Teğetsel dişli yükü (N)
d_1 Taksimat dairesi çapı (mm)
r_k Diş üstü çapı (mm)
r_g Referans çapı (mm)
α_b Çalışma basınç açısı (^{o})
α_o Referans enine basınç açısı (^{o})
u Çevrim oranı
Y_{ST} Gerilim düzeltme katsayısı
Y_{NT} Ömür faktörü
$Y_{\delta relT}$ Çentik hassasiyet faktörü
Y_{RrelT} Yüzey pürüzlülük faktörü
Y_X Malzeme büyüklük faktörü
Y_F Diş dibi form faktörü
Y_S Çentik faktörü
Y_β Helis açısı faktörü
Z_B Tek dişli temas faktörü
Z_H Referans dairesinden taksimata dönüştürme katsayısı
Z_E Elastiste modül katsayısı
Z_ε Kavrama oranı katsayısı
Z_β Helis açısı faktörü

Yazar katkısı
Author contribution

Bu makalede Can ÇİVİ fikir ve tasarımı ile revizyon ve onay kısımlarında, Recep KARAMAN veri analizi ve makale yazımı konusunda katkı sağlamıştır.

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

Bonaiti, L., & Gorla, C. (2021). Estimation of gear SN curve for tooth root bending fatigue by means of maximum likelihood method and statistic of extremes. *International Journal of Fatigue*, *153*, 106451. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106451

Bonaiti, L., & Gorla, C. (2022). Gear Tooth Root Bending Strength Estimation under the Assumption of Fatigue Limit Existence. *Material Design and Processing Communications, 2022*. https://doi.org/10.1155/2022/5056057

Buckingham, E. (1949). Analytical Mechanics of Gears. *Dover Publications.*

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2014). Shigley's Mechanical Engineering Design (Tenth Edition). *McGraw-Hill Education.*

Cavdar K., Karpat F., & Babalık F.C. (2005). Computer Aided Analysis of Bending Strength of Involute Spur Gears with Asymmetric Profile. *Journal of Mechanical Design*, *127*, 477-484. https://doi.org/10.1115/1.1866158

Colbourne J.R. (1987). The Geometry of Involute Gears. Springer-Verlag, New Jersey. USA

Doğan, O., Yılmaz, T. G., & Karpat, F. (2018). Farklı parametrelere sahip evolvent düz dişli çarkların sonlu elemanlar yöntemi ve grafik metot ile gerilme analizi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *33*(4), 1493-1504. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416445

Fetvacı, M. C., & İmrak, C. E. (2004). Diş dibi gerilmelerinin analizi için düz dişli çarkların sonlu eleman modellenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *19*(2), 199-203.

Flodin A., & Andersson M. (2012). Tooth root optimization of powder metal gears: reducing stress from bending and transient loads. *Proceedings of PM2012*, Yokohama, Japan.

Güllü, E., & Yilmaz, T. G. (2017). İç ve diş dişli çarklarda meydana gelen yüzey basinçlarinin ve deformasyonlarin incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *32*(2), 585-591. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.322185

Irsel, G. (2021). Bevel Gears Strength Calculation: Comparison ISO, AGMA, DIN, KISSsoft and ANSYS FEM Methods. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, *42*(3), 315-323

Jammi, S. (2013, August). Gear Tooth Stresses From Finite Element Analysis Compared With AGMA Standards. *In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 55928, p. V005T11A005).* American Society of Mechanical Engineers. https://doi.org/10.1115/DETC2013-12037

Li, D., Liu, Y., Gong, J., Wei, Y., & Zhao, G. (2022). A novel method for longitudinal modification and tooth contact analysis of non-circular cylindrical gears. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *36*(12), 6157-6170. https://doi.org/10.1007/s12206-022-1130-6

Li, W., & Liu, B. (2018). Experimental investigation on the effect of shot peening on contact fatigue strength for carburized and quenched gears. *International Journal of Fatigue*, *106*, 103-113. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.09.015

Lisle T.J., Shaw B.A., & Frazer R.C. (2017). External spur gear root bending stress: a comparison of ISO 6336:2006, AGMA 2101-D04, ANSYS finite element analysis and strain gauge techniques. *Mechanism and Machine Theory*, *111*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.01.006

Litvin F.L., & Fuentes A. (2004). Gear Geometry and applied theory. *Cambridge University Press*.

Mo, J., Luo, S., Fu, S., & Chang, X. (2022). Meshing principle and characteristics analysis of an abnormal cycloidal internal gear transmission. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *36*(10), 5165-5179. https://doi.org/10.1007/s12206-022-0929-5

Patil S.S., Karuppanan S., & Atanasovska I. (2016). Experimental measurement of strain and stress state at the contacting helical gear pairs. *Measurement*, *82*, 313-322. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.046

Şeber, M. (2002). *Selçuk Redüktör'ün Bilgisayar Destekli Tasarımı ve Çeşitli Örneklerinin* İmalatı [Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Uzay, Ç., & Geren, N. (2017). Maliyet Etkin Düz Dışlı Çark Tasarımı Gerçekleştirmek İçin ISO ve AGMA Standartlarından Uygun Olanının Kullanımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5(3),* 643-655. https://doi.org/10.21923/jesd.325429

Wang M.J. (2003). A new photoelastic investigation of the dynamic bending stress of spur gears. *Journal of Mechanical Design, 125(2),* 365-372. https://doi.org/10.1115/1.1563636

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 380-396 doi: 10.17714/gumusfenbil.1592459 Araştırma Makalesi / *Research Article*

I-tipi Çaltı Plütonu'na (Kemaliye, Erzincan) ait magmatik kayaçların petrografik ve jeokimyasal özellikleri

Petrographic and geochemical characteristics of magmatic rocks of the I-type Çaltı Pluton (Kemaliye, Erzincan)

Mustafa Eren RİZELİ

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ

• Geliş tarihi / *Received*: 27.11.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 18.03.2025

Öz

Bu araştırma, Torid-Anatolid platformunun doğu kısmında yer alan Çaltı Plütonu'nun jeokimyasal karakteristiğini ve magma kökenini ortaya çıkartmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla plütonu temsil eden kayaçların tüm kayaç ana oksit ve iz element verileri kullanılarak magmanın kaynağı ve kökeni konusunda yeni yorumlar yapılmıştır. Stratigrafik olarak Paleozoyik-Alt Mezozoyik yaşlı düşük dereceli metamorfik kayaçlar, Üst Triyas-Üst Kretase yaşlı allokton Munzur Kireçtaşları, Kretase yaşlı ofiyolitik birimler, Eosen yaşlı Çaltı Plütonu, Oligosen-Orta Miyosen yaşlı sedimanter kayaçlar ve Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı volkanik kayaçlar bulunmaktadır. İncelenen Çaltı Plütonu ana kayaçları granodiyorit ve granodiyorit porfir, mafik mikrogranüler anklavları (MMA) monzodiyorit bileşimindedir. Granodiyorit ve MMA'lar holokristalen, granodiyorit porfirler ise mikrogranüler porfirik doku sergilemektedir. Erime ve çözünme dokuları yanı sıra poikilitik dokular bu kayaçlarda yaygın olarak görülmektedir. Çaltı Plütonu'nu oluşturan kayaçlar I tipi, kalkalkalenden yüksek-K kalkalkalene değişen özelliklerde olup genellikle metalüminalı bir karakter sergiler. İncelenen kayaçların ilksel mantoya normalize edilmiş iz element dağılımları incelendiğinde Rb, Ba, K, Sr gibi büyük iyon yarıçaplı elementlerde (BİYE) pozitif bir ilişki; Nb, Ti, Ta, P gibi yüksek çekim alanlı element (YÇAE) açısından ise negatif bir ilişki görülmektedir. Tüm veriler değerlendirildiğinde, Çaltı Plütonu'na ait granodiyorit ve granodiyorit porfirlerin ana magmasının, sığ derinlikleri temsil eden flogopit spinel-lerzolit bileşimli bir kaynaktan itibaren %1 ilâ %3 aralığında kısmi ergime ile oluştuğu ve incelenen kayaçların oluşumunda hem fraksiyonel kristalleşme hem de kabuksal kirlenmenin etkin rol oynadığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Çaltı Plütonu, Eosen, Fraksiyonel kristalleşme, I-tipi magmatizma, Kabuksal kirlenme, Kemaliye, Petrojenez

Abstract

This research aims to reveal the geochemical characteristics and magma origin of the Çaltı Pluton located in the eastern part of the Tauride-Anatolide platform For this purpose, new interpretations were made regarding the magma source and origin, using whole-rock major oxide and trace element data of rocks representing the pluton. Stratigraphically, there are low-grade metamorphic rocks of Paleozoic-Lower Mesozoic, Upper Triassic-Upper Cretaceous allochthonous Munzur Limestones, Cretaceous ophiolitic units, Eocene Çaltı Pluton, Oligocene-Middle Miocene sedimentary rocks and Upper Miocene-Pliocene volcanic rocks. The studied Çaltı Pluton host rocks are granodiorite and granodiorite porphyry, and mafic microgranular enclaves (MMe) are monzodiorite in composition. Granodiorites and MMEs exhibit holocrystalline, and granodiorite porphyries exhibit microgranular porphyritic texture. In addition to dissolution melting textures, poikilitic textures are commonly seen in these rocks. The rocks forming the Çaltı Pluton have I type, calc-alkaline to high-K calc-alkaline properties and generally have a metaluminous character. On the primitive mantle-normalised trace element patterns, a positive correlation is observed for large ion lithophile elements (LILE) such as Rb, Ba, K and Sr and a negative correlation is observed for high field strength elements (HFSE) such as Nb, Ti, Ta, P. When the all data were evaluated, it was determined that the parent magma of the granodiorite and granodiorite porphyries of the Çaltı Pluton was formed by partial melting in the range of 1% to 3% starting from a source with phlogopite spinel-lherzolite composition representing shallow depths and that both fractional crystallization and crustal contamination played an active role in the formation of the studied rocks.

Keywords: *Çaltı Pluton, Eocene, Fractional crystallization, I-type magmatism, Crustal contamination, Kemaliye, Petrogenesis*

*Mustafa Eren RİZELİ; m.erenrizeli@gmail.com

1. Giriş
1. Introduction

Granitoidlerin kökenlerini ve evrimini anlamak, dünyanın tarihsel süreci boyunca devam eden litosferik evrimi ve jeodinamik süreçleri kavrayabilmemiz açısından büyük bir öneme sahiptir. Granitik magmalar, akışkanların varlığı veya yokluğunda, çeşitli derinliklerdeki kabuk ürünlerinin ergimesi, mafik magmaların fraksiyonel kristalleşmesi ve kabuktan ve mantodan türeyen magmaların karışımı gibi çeşitli süreçlerle oluşmaktadır (Barbarin, 1999; Brown, 2013). Bu nedenle, granitoyidlerin kökenlerini incelemek, ilksel ergiyik bileşimini aydınlatabilecek önemli bilgiler sunmaktadır. Çoğu granitik magma, yitim zonu ortamlarında ve orojenez süreçleri sırasında çeşitli boyutlarda plütonik ve hipabisal intrüzyonlar olarak yerleşim göstermiştir. Buna karşın, nispeten küçük hacimli granitoyidler, aktif kıtasal riftleşmenin meydana geldiği kratonlar ve okyanusal kabuk içinde yer alabilmektedir (Barbarin, 1999). Bu nedenle granitik kayaçların oluşumu, kıtasal kabuğun oluşmasını ve döngüsünü anlamak için oldukça önemlidir (Brown, 2013). Granitoyidlerin kökensel sınıflandırması, petrojenezleri esnasında etkili olan "kabuk, manto veya bunların karışımı" gibi bileşenlerin miktarlarına göre değişiklik göstermektedir (Chen vd., 2002). Granitlerin sınıflandırılması, mineraloji, jeoloji ve jeokimya gibi çeşitli faktörlere dayanmaktadır ve genellikle kökensel sınıflama (örneğin, S-tipi, M-tipi, A-tipi ve I-tipi) kullanılmaktadır (Chappell & White, 1974; Loiselle & Wones, 1979; White, 1979). Genellikle iki mika içeren S-tipi granitoyidler çoğunlukla bölgesel metamorfik sahalarda ve çarpışma ortamlarında sedimanter kökenden türemiştir. M-tipi granitoyidlerin (White, 1979) ise manto kökenli magmaların okyanusal levha içi ortamlarda fraksiyonel kristalleşmesiyle oluştuğu bilinmektedir. Loiselle ve Wones (1979) tarafından tanımlanan A-tipi granitoyidler, "anorojenik, alkali ve susuz" terimlerine atfen adlandırılmış olup zirkon, apatit, florit ve granat gibi özel mineral bileşimlerine sahiptir. Öte yandan, I-tipi granitoyidler genellikle hornblend, biyotit, plajiyoklaz, K-feldispat ve kuvars içerir. Orta ila yüksek K içeriğine sahip olup Na/K oranları genellikle yüksektir. Çoğunlukla yaklaşan levha sınırlarında ve çarpışma ortamlarında gelişen I-tipi granitoyidler, muhtemelen alt kabuktan türeyen mafik magmatik bir kaynaktan itibaren oluşmaktadır (Chappell & White, 1974).

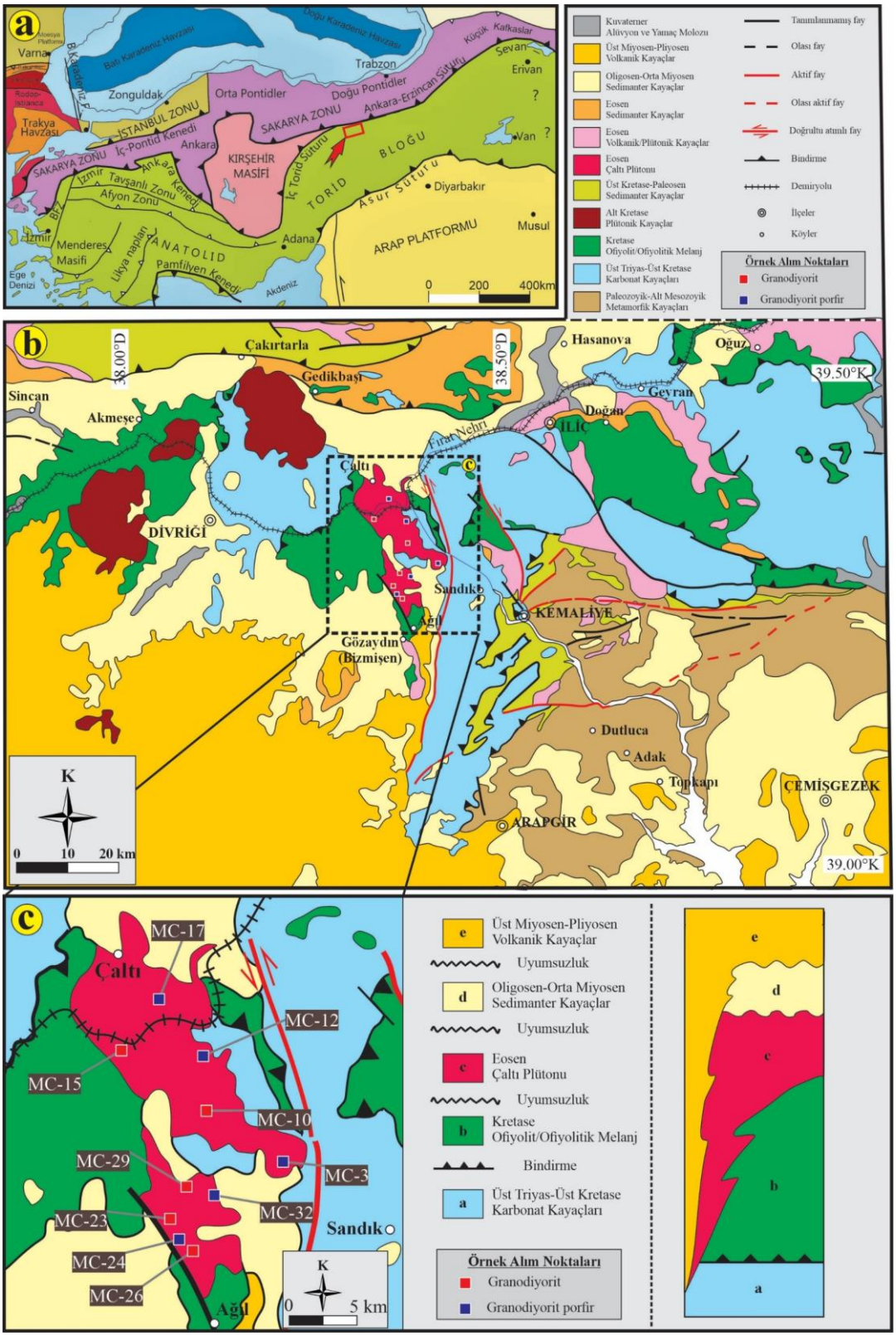
Bu çalışmada Kemaliye (Batı Erzincan)'nin batısında yüzeyleme veren Çaltı Plütonu'na ait granodiyorit ve granodiyorit porfirlerin saha özellikleri yanı sıra mineralojik, petrografik, jeokimyasal özellikleri irdelenerek bölgedeki Eosen magmatizmasına ışık tutulması amaçlanmaktadır. Özellikle söz konusu kayaçların ana magmasının oluşumunda etkili olan süreçlerin belirlenmesi ilgili plütonun oluştuğu tektonik ortam, kıtasal kabuğun evrimi, farklı magma tipleri ve dolayısıyla maden yataklarının oluşum mekanizması hakkında literatüre katkı sağlayacaktır.

2. Jeolojik konum ve yersel jeoloji
2. Geological setting and local geology

Türkiye, Alp-Himalaya orojenik kuşağının doğu-batı doğrultulu bir kesimi üzerinde yer almaktadır. Bu kuşak çeşitli yay, çarpışma ve çarpışma sonrası jeolojik ortamları kapsar. Bu kuşakta Türkiye, Avrasya ve Gondvana levhalarının etkileşim zonu olarak önemli bir jeodinamik konumda bulunur. Ketin (1966), dağ kuşaklarının orojenik gelişimleri temelinde Türkiye'yi kuzeyden güneye doğru; Pontidler, Anatolidler, Toridler ve Kenar Kıvrımları Bölgesi olarak dört tektonik birliğe ayırmıştır. Çalışma alanı Paleozoyik yaşlı Bitlis-Pütürge metamorfitleri, Paleozoyik yaşlı Toros otokton birimi, Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı Malatya-Keban metamorfitleri ve Karbonifer-Erken Kretase yaşlı Munzur kireçtaşları gibi çeşitli tektonostratigrafik birimlerden oluşan Torid-Anatolid platformunun (Ketin, 1966) doğu kısmında yer almaktadır (Şekil 1a).

Bölgenin en yaşlı birimleri Paleozoyik-Alt Mesozoyik yaşlı düşük dereceli metamorfik kayaçlardır. Bu kayaçlar inceleme alanı çevresinde metamorfize olmuş silisiklastik tortul kayaçlardan oluşan yaklaşık 800 m kalınlıkta bir istiften oluşur (Özgül & Turşucu, 1984). Metamorfik temelin üzerinde Üst Triyas-Üst Kretase yaşlı allokton Munzur Kireçtaşları yer almakta olup bu neritik kayaçlarda güneyden kuzeye doğru bir gençleşme görülmektedir (Özgül & Turşucu, 1984). Kretase'de bölgeye ofiyolit yerleşimi gerçekleşmiştir. Ofiyolitik birimler serpantinize olmuş ultramafik kayaçların oluşturduğu ofiyolitler ve kiltaşı, şeyl ve kumtaşı matriksli ofiyolitik melanjla temsil edilmektedir. Bölgede Üst Kretase'de başlayan magmatizmanın Üst Miyosen-Pliyosen'de sonlandığı düşünülmektedir (Boztuğ vd., 1997). Doğu Toros Orojenik Kuşağı'nın kuzey kenarında Çaltı (Kemaliye, Erzincan) ile Ağıl köyleri arasında yer alan ve Önal vd. (2005) tarafından Çaltı Plütonu olarak adlandırılan birim Kretase yaşlı ofiyolitik melanjı keser şekilde yüzeyleme vermektedir. Bu birimler ile Üst Triyas-Üst Kretase yaşlı karbonat kayaçları arasında tektonik ilişki bulunmaktadır (Şekil 1b,

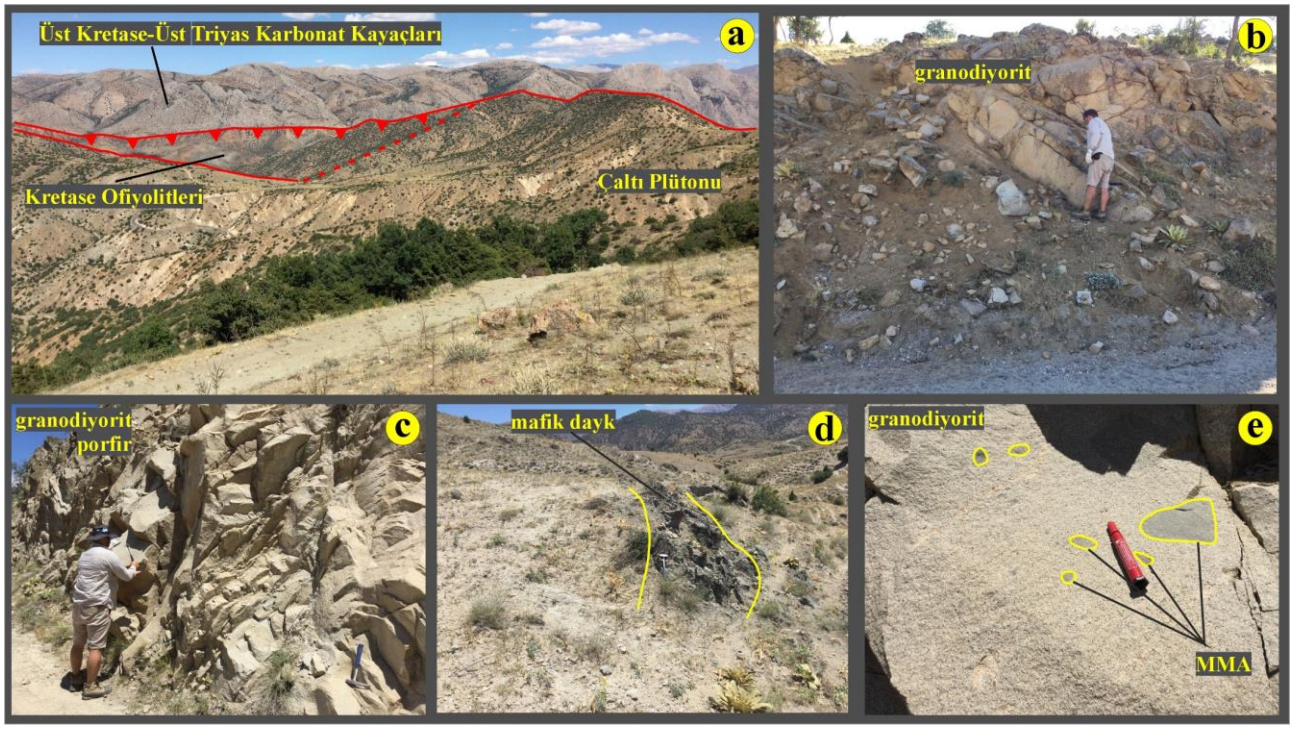
c). Çaltı Plütonu, İç-Doğu Orta Anadolu'da İliç ve Kemaliye bölgesinde (Güneybatı Erzincan) Oligosen-Orta Miyosen yaşlı sedimanter kayaçlar tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir (Şekil 1b, c).



Şekil 1. (a) Türkiye'nin tektonik birlikler haritası (Okay & Tüysüz, 1999). (b) Çalışma alanının jeoloji haritası (MTA 1:500.000 ölçekli Sivas paftasından (Bilgiç, 2002) alınarak hazırlanmıştır). (c) örnek alım noktaları ve genelleştirilmiş kolon kesit.

Figure 1. *(a) Tectonic units map of Turkey (Okay & Tüysüz, 1999). (b) Geological map of the study area (Prepared from the MTA 1:500.000 scale Sivas map (Bilgiç, 2002)). (c) sampling points and the generalized columnar section.*

Çaltı Plütonu inceleme alanında genel olarak granodiyorit ve granodiyorit porfirlerle temsil edilmektedir (Şekil 2a). Granodiyoritler makroskobik olarak ince-orta taneli ve grimsi-pembemsi renklerde görülüp genellikle orta-yüksek seviyede alterasyon göstermektedir (Şekil 2b) Plütonun belirli bölgelerinde arenalaşma görülmektedir. Granodiyorit porfirler Çaltı Plütonu'nun sadece kenar kısımlarında değil hemen hemen her alanında diğer intrüzif birimlerle geçişli olarak gözlenmektedir (Şekil 2c). Granodiyorit ve granodiyorit porfirler bazı alanlarda kalınlığı 2 m'ye varan ince taneli mafik dayklar tarafından kesilmektedir (Şekil 2d). Çaltı Plütonu ayrıca sıklıkla, çapı 20 cm'ye varan boyutlarda oval ve elipsoidal mafik mikrogranüler anklavlar (MMA) içermektedir (Şekil 2e). MMA'lar genel olarak ince-orta taneli diyorit ve monzodiyorit türündeki kayaçlarla temsil edilmektedir. Plütonun yaşı K-Ar yaş tayinlerine göre 40-49 My aralığında Orta Eosen'dir (Önal vd., 2005).



Şekil 2. Çaltı Plütonu'na ait kayaçların arazi görünümleri. (a) Kretase ofiyolitlerini kesen Çaltı Plütonu ve bu birimlerin Üst Triyas-Üst Kretase yaşlı karbonat kayaçlarıyla olan tektonik ilişkisi. (b) Granodiyorit ve (c) granodiyorit porfirlerin arazi görünümleri. (d) Granodiyoritleri kesen mafik dayk ve (e) plüton içerisinde yer alan farklı şekil ve boyutlardaki MMA'lar.

Figure 2. *Field views of the rocks of the Çaltı Pluton. (a) Contact relationship between the Cretaceous ophiolites thrusting onto the Mesozoic carbonate rocks and the Çaltı pluton. (b) Field views of granodiorite and (c) granodiorite porphyries. (d) Mafic dyke cutting the granodiorites and (e) MMEs of different shapes and sizes within the pluton.*

3. Gereç ve yöntem

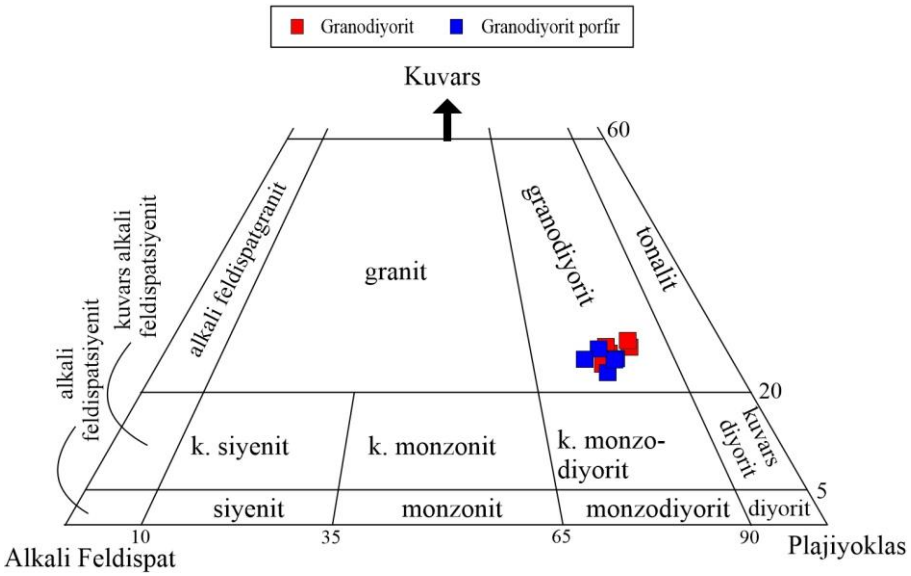
3. Equipment and method

Çalışma sahasında Çaltı Plütonu'nun yüzeylediği alanlardan 30 adet kayaç örneği alınmış ve söz konusu örneklerin altere dış yüzeyleri, Fırat Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Petrografi Laboratuvarı'ndaki döner elmas bıçaklar yardımıyla temizlenmiştir. Tüm örneklerden biri ince kesit yapılması diğeri ise jeokimyasal analizlerde kullanılması amacıyla sırasıyla 1×3×5cm ve 5×5×5cm boyutlarında ikişer adet plakacık çıkartılmıştır. Kayaçların ince kesitleri aynı laboratuvarda hazırlanmış ve Leica DM2500P adlı polarizan mikroskopta incelenerek ince kesit fotoğrafları çekilmiştir. Petrografik incelemeler sonucu tüm kayaç jeokimya çalışmaları için bölgeyi en iyi temsil ettiği düşünülen ve alterasyondan en az etkilenen 10 adet örnek seçilmiştir. Söz konusu örneklerin jeokimyasal özelliklerinin belirlenebilmesi için Kanada'daki Bureau Veritas Minerals Laboratuvarı'nda tüm kayaç ana oksit ve iz element analizleri yaptırılmıştır. Örnekler ilgili laboratuvarda 200 mesh boyutuna kadar öğütülmüş ve lityum borat füzyon ile çözdürülmüştür. Ardından Endüktif olarak eşleştirilmiş plazma-optik emisyon spektrometrisi (ICP-OES) ve -kütle spektrometrisi (ICP-MS) yöntemleriyle tüm kayaç ana ve iz element içerikleri belirlenmiştir.

4. Bulgular
4. Results

4.1. Petrografi
4.1. Petrography

Çaltı Plütonu'na ait magmatik kayaçlar inceleme alanında granodiyorit ve granodiyorit porfirlerle temsil edilmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Çaltı Plütonu'na ait kayaçların Q-A-P sınıflama diyagramındaki yerleri (Streckeisen, 1976).
Figure 3. *Location of rocks belonging to the Çaltı Pluton on the Q-A-P classification diagram (Streckeisen, 1976).*

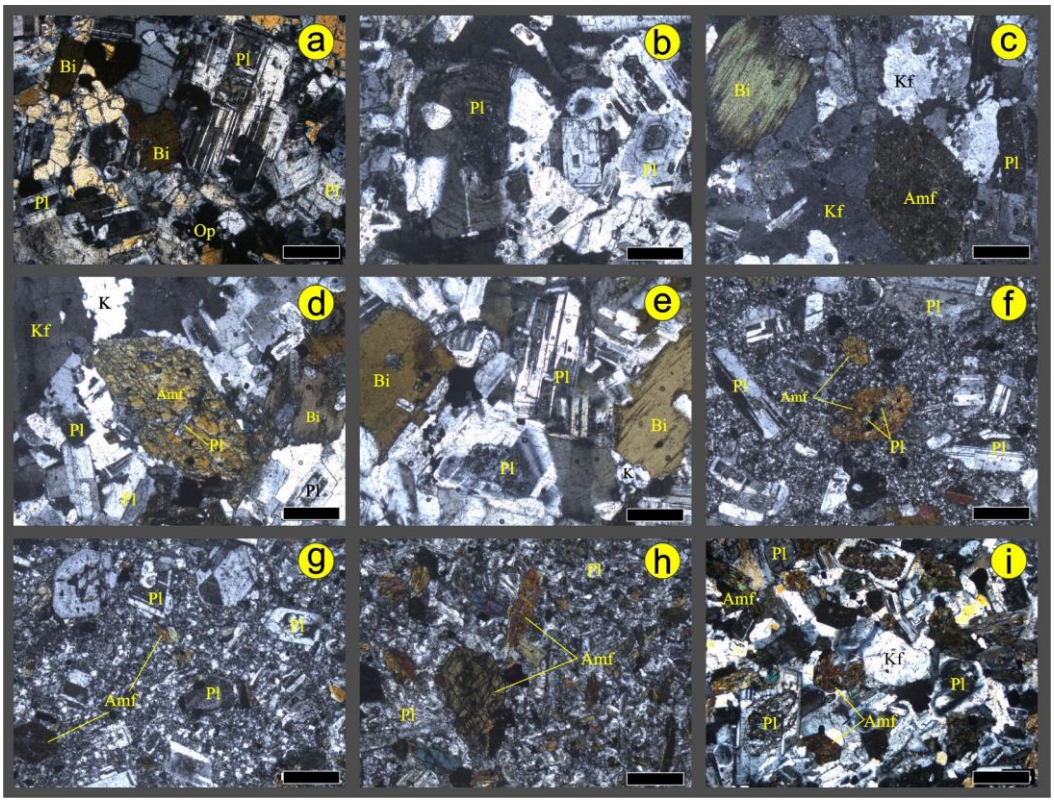
Granodiyoritler ana mineral olarak plajiyoklaz (%32-39), kuvars (%22-27), K-feldspattan (%12-14); mafik mineral olarak amfibol (%15-20), biyotit (%5-10) ve opak minerallerden (%1-2) oluşmaktadır (Tablo 1). Yarı öz şekilli holokristalen dokulu kayaçlarda plajiyoklaz mineralleri albit ikizlenmeleri ile karakteristiktir (Şekil 4a-g). Sönme açısı tayinlerinden oligoklaz-andezin türünde olduğu belirlenen plajiyoklazlarda genel olarak erime/çözünme dokuları ve az oranda zonlanma görülmektedir (Şekil 4b). Söz konusu minerallerde serizitleşme, killeşme ve karbonatlaşmalar görülmektedir. Plajiyoklazlar zaman zaman K-feldispat, amfibol ve biyotit minerallerinin içinde kapantılar şeklinde oluşmuştur (Şekil 4d, e). Diğer minerallere göre daha büyük boyutlu öz şekilsiz/yarı öz şekilli K-feldispatlar, yer yer serizitleşme ve karbonatlaşmalardan kaynaklı toprağımsı görünüm kazanmıştır (Şekil 4c). Kuvarslar küçük ve öz şekilsiz kristaller formunda diğer minerallerin arasındaki boşlukları doldurmaktadır (Şekil 4d). Amfiboller genellikle öz şekilli formlarda olup bazal kesitlerinde çift yönde gelişmiş belirgin dilinimlere sahiptir ve bazı kesitlerde plajiyoklazları kapanımları içermektedir (Şekil 4c, d). Bazı amfibollerde alterasyon nedeniyle klorit ve epidot minerallerine dönüşümler görülmektedir. Yarı öz şekilli-öz şekilsiz yer yer kloritleşmiş biyotitler, genellikle iri levhamsı kristaller halinde olup zaman zaman plajiyoklazlarla birlikte poikilitik doku göstermektedir (Şekil 4e).

Granodiyorit porfirler derinlik eşlenikleriyle benzer mineral toplulukları ve alterasyon özelliklerine sahipken, dokusal olarak fenokristallerin arasını dolduran mikrolitik tanelerin oluşturduğu mikrogranüler porfirik doku gösterirler. Felsik mineral fazını plajiyoklaz (%42-46), K-feldispat (%19-23) ve kuvars (%9-12); mafik mineral fazını ise amfibol (%20-25), biyotit (%1-2) ve opak mineraller (%1-2) oluşturmaktadır (Tablo 1; Şekil 4f-h). Fenokristal fazındaki plajiyoklazlar genellikle albit ikizlenmeleri göstermekte ve bazı kesitlerinde polisentetik ikizlenmeler göstermektedir. Bazı plajiyoklazlarda erime/çözünme dokuları ve az oranda zonlanma görülmektedir (Şekil 4h, g). Alterasyon orta düzeyde görülürken genellikle alterasyon türü serizitleşmedir. Plajiyoklazlar zaman zaman amfibol mineralleri içinde kapanımlar şeklinde bulunarak poikilitik dokuyu oluşturmaktadır (Şekil 4d, f). Kuvars ve K-feldispatlar fenokrsital fazlarda görülmeyerek mikrolitler içerisinde bulunmaktadır. Amfiboller, plajiyoklazlara benzer olarak fenokristaller şeklinde gözlenip genellikle çift yönde gelişmiş belirgin dilinimlere sahiptir (Şekil 4f-h).

Tablo 1. Çaltı Plütonu'na ait granodiyorit ve granodiyorit porfirlerin örneklerin modal analiz değerleri
Table 1. *Modal analysis values of granodiorite and granodiorite porphyry samples from the Çaltı Pluton*

Örnek No	Kayaç Türü	Plajiyoklas	Kuvars	K-feldispat	Amfibol	Biyotit	Opak Mineraller
MC10	granodiyorit	37	22	14	15	10	2
MC15	granodiyorit	38	24	12	17	7	2
MC23	granodiyorit	36	25	13	20	5	1
MC26	granodiyorit	39	22	13	18	6	2
MC29	granodiyorit	32	27	14	15	10	1
MC3	granodiyorit porfir	42	23	12	20	2	1
MC12	granodiyorit porfir	45	21	10	21	1	2
MC17	granodiyorit porfir	46	22	9	20	2	1
MC24	granodiyorit porfir	44	19	10	25	1	1
MC32	granodiyorit porfir	45	20	11	22	1	1

MMA'larda yapılan petrografik tayinlerde kayaç türünün genel olarak monzodiyorit olduğu belirlenmiştir (Şekil 4i). Esas olarak plajiyoklaz (%45-60) ve K-feldspattan (%15-25); mafik mineral olarak amfibol (%20-25) minerallerinden oluşmaktadır (Şekil 4i). Dokusal olarak holokristalen doku göstermektedir. Alterasyon orta-yüksek oranlarda gözlenmekte olup serizitleşme ve karbonatlaşmalar görülmektedir. Plajiyoklazlar genel olarak öz şekilsiz/yarı öz şekilli kristaller halinde olup albit ikizlenmeleri ile karakteristiktir (Şekil 4i). K-feldispatlar öz şekilsiz kristaller halinde görülmektedir. Tek nikolde toprağımsı renklere sahiptir. Amfiboller genel olarak prizmatik kristaller halinde gözlenir (Şekil 4i). Yeşil tonlarında pleokroizmalarıyla karakteristiktir.



Şekil 4. Çaltı Plütonu'na ait granodiyorit, granodiyorit porfir ve MMA'larının ince kesit fotoğrafları (Çizgi ölçekler 500µm'dur). (a) Polisentetik ikizlenme ve (b) zonlanma gösteren plajiyoklazlar. Granodiyoritlerdeki (c) holokristalen ve (d, e) poikilitik doku. (e) Granodiyorit porfirlerdeki özşekilli amfiboller. (f) Granodiyorit porfirlerde poikilitik doku. (g, h) Mikrogranüler porfirik dokulu granodiyorit porfirler. (i) Monzodiyorit türündeki MMA'lar (Amf: amfibol, Bi: biyotit, Kf: K-feldspat, K: kuvars, Op: opak mineral, Pl: plajiyoklaz).
Figure 4. *Thin section photographs of granodiorite, granodiorite porphyry and MMEs of the Çaltı Pluton. (a) Plagioclases showing polysynthetic twinning and (b) zoning. (c) Holocrystalline and (d, e) poikilitic texture in granodiorites. (e) Euhedral amphiboles in granodiorite porphyries. (f) Poikilitic texture in granodiorite porphyries. (g, h) Granodiorite porphyries with microgranular porphyritic texture. (i) MMEs of monzodiorite type (Amf: amphibole, Bi: biotite, Kf: K-feldspar, K: quartz, Op: opaque mineral, Pl: plagioclase).*

3.2. Ana oksit ve iz element jeokimyası
3.2. Major oxide and trace element geochemistry

İnceleme konusunu oluşturan Çaltı Plütonu'na ait 10 adet kayaç örneğinin jeokimyasal analiz sonuçları ve bazı iz element oranları sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. Genel olarak örneklerin ateşte kayıp değerleri dar bir aralıkta (AK=%1.0-3.3) değişmektedir. İnceleme konusunu oluşturan kayaçlar değişen oranlarda SiO_2 (%62.01-65.27), Al_2O_3 (%15.95-16.76), Fe_2O_3 (%2.36-5.04), MgO (%1.49-2.59), CaO (%4.45-5.94), Na_2O (%3.09-3.57), K_2O (%1.81-2.77), TiO_2 (%0.37-0.52), Th (6.10-7.90 ppm), Rb (28.9-52.2 ppm), Sr (284.3-402.1 ppm), Nb (6.5-7.8 ppm), Nd (11.2-16.8 ppm) değerlerine sahiptir (Tablo 2).

Tablo 2. Çaltı Plütonu'na ait kayaçların tüm kayaç ana oksit ve iz element değerleri (Grnd.: granodiyorit, Grnd. Por.: granodiyorit porfir)
Table 2. *Whole rock major oxide and trace element values of rocks belonging to the Çaltı Pluton (Grnd.: granodiorite, Grnd. Por.: granodiorite porphyry)*

Örnek adı	**MC10**	**MC15**	**MC23**	**MC26**	**MC29**	**MC3**	**MC12**	**MC17**	**MC24**	**MC32**
Litoloji	Grnd.	Grnd.	Grnd.	Grnd.	Grnd.	Grnd. Por.	Grnd. Por.	Grnd. Por.	Grnd. Por.	Grnd. Por.
Ana oksitler										
SiO_2	64.51	65.23	64.20	65.27	63.96	62.01	63.52	62.43	63.06	62.54
TiO_2	0.43	0.41	0.39	0.37	0.43	0.52	0.47	0.43	0.41	0.47
Al_2O_3	16.55	16.13	16.32	15.95	16.68	16.52	16.43	16.24	16.14	16.76
Fe_2O_3	4.53	4.38	4.45	2.36	4.62	4.91	4.64	4.62	4.47	5.04
MnO	0.09	0.10	0.08	0.07	0.09	0.10	0.08	0.10	0.09	0.08
MgO	1.97	1.98	1.90	1.49	2.10	2.59	2.08	2.18	1.91	2.35
CaO	4.90	4.56	5.27	5.94	4.79	4.83	5.29	4.78	4.77	4.45
Na_2O	3.36	3.46	3.48	3.57	3.39	3.29	3.39	3.35	3.10	3.09
K_2O	2.34	2.32	1.84	1.81	2.56	2.49	2.21	2.23	2.44	2.77
P_2O_5	0.14	0.13	0.11	0.12	0.13	0.16	0.14	0.15	0.13	0.13
Ateşte kayıp	1.00	1.10	1.80	2.90	1.10	2.40	1.50	3.30	3.30	2.10
Toplam	99.88	99.89	99.88	99.91	99.89	99.86	99.87	99.87	99.88	99.87
İz elementler										
Sc	9.00	9.00	11.00	9.00	10.00	11.00	10.00	9.00	9.00	12.00
Ti	2577.89	2457.99	2338.09	2218.19	2577.89	3117.45	2817.70	2577.89	2457.99	2817.70
V	77.00	90.00	85.00	65.00	89.00	97.00	89.00	82.00	88.00	107.00
Co	8.50	8.90	7.60	4.50	9.10	9.70	7.30	8.90	7.60	10.70
Ni	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
Ga	14.30	14.10	13.60	12.10	13.20	15.10	14.30	14.10	13.10	13.70
Rb	52.20	50.40	33.30	28.90	48.40	50.00	42.30	42.80	48.20	40.80
Sr	349.00	311.10	305.40	305.40	284.30	343.70	402.10	343.30	322.20	301.50
Y	13.20	12.20	12.40	12.00	11.50	14.60	13.40	14.80	13.40	11.70
Zr	110.60	115.40	111.20	114.60	102.00	112.60	111.60	120.10	122.30	104.20
Nb	7.30	7.50	6.80	6.50	6.60	7.70	7.80	7.60	7.20	7.10
Cs	0.40	0.40	1.30	0.90	0.20	1.00	<0.1	0.40	1.10	<0.1
Ba	592.00	631.00	561.00	529.00	567.00	575.00	862.00	591.00	652.00	737.00
La	21.30	22.20	18.90	15.40	19.20	21.60	24.70	21.60	20.30	20.20
Ce	38.30	38.90	33.90	29.70	34.40	39.60	42.30	39.60	38.20	35.10
Pr	3.83	3.86	3.49	3.07	3.42	4.27	4.51	4.25	3.92	3.66
Nd	14.10	14.20	13.50	11.20	13.10	16.80	16.80	15.60	14.60	13.10
Sm	2.60	2.33	2.36	1.90	2.32	3.16	2.93	2.73	2.80	2.52
Eu	0.76	0.70	0.68	0.57	0.70	0.90	0.86	0.75	0.74	0.69
Gd	2.42	2.26	2.32	2.02	2.35	2.85	2.85	2.77	2.47	2.33
Tb	0.36	0.34	0.36	0.33	0.35	0.42	0.42	0.43	0.37	0.36

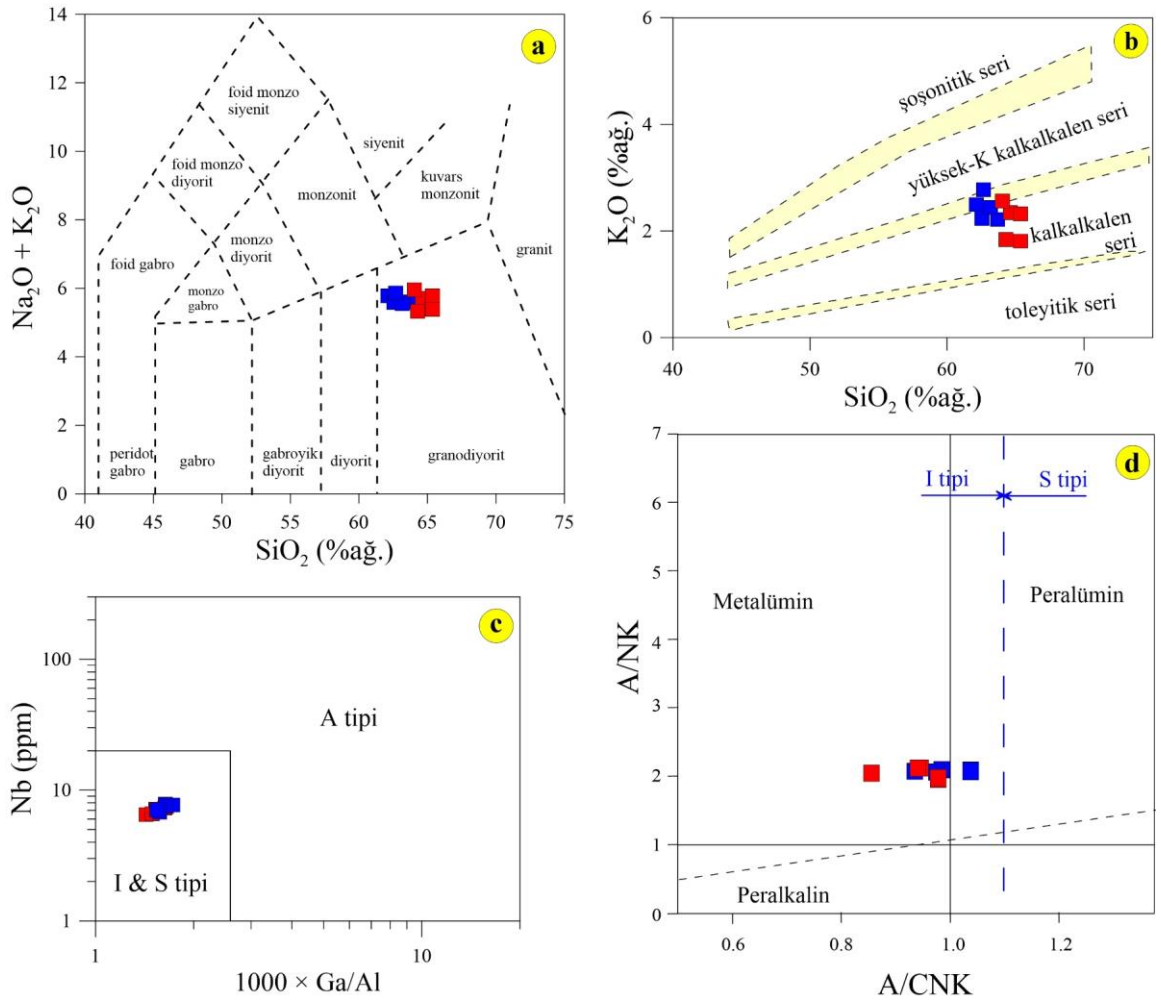
Tablo 2. *Devamı*

Dy	2.26	2.05	2.21	1.98	2.28	2.45	2.52	2.57	2.12	2.26
Ho	0.47	0.46	0.49	0.41	0.42	0.55	0.50	0.55	0.51	0.43
Er	1.47	1.34	1.47	1.28	1.34	1.65	1.71	1.72	1.53	1.41
Tm	0.22	0.19	0.23	0.20	0.21	0.23	0.23	0.24	0.21	0.19
Yb	1.45	1.37	1.53	1.34	1.53	1.62	1.58	1.84	1.49	1.37
Lu	0.24	0.22	0.23	0.22	0.21	0.25	0.26	0.26	0.25	0.20
Hf	3.10	3.20	3.10	3.20	2.90	2.80	3.20	3.40	3.30	2.80
Ta	0.40	0.70	0.50	0.60	0.40	0.60	0.60	0.60	0.50	0.60
W	1.20	0.90	1.20	1.50	1.50	1.30	1.40	0.90	1.30	1.90
Th	6.30	7.90	6.50	7.50	6.40	6.10	6.80	6.30	6.40	6.10
U	1.40	1.60	2.30	2.20	1.50	1.70	2.00	1.60	1.80	1.30
Eu/Eu*	0.93	0.93	0.89	0.89	0.92	0.92	0.91	0.83	0.86	0.87
Mg#	40.80	41.74	40.36	50.02	41.87	45.53	41.54	42.79	40.38	42.50

Tablo 3. Çaltı Plütonu'na ait kayaçların bazı iz element oranları. (Grnd.: granodiyorit)
Table 3. *Some trace element ratios of rocks belonging to the Çaltı Pluton. (Grnd.: granodiorite)*

	MC10	**MC15**	**MC23**	**MC26**	**MC29**	**MC3**	**MC12**	**MC17**	**MC24**	**MC32**
Litoloji	Grnd.	Grnd.	Grnd.	Grnd.	Grnd.	Grnd. Porfir	Grnd. Porfir	Grnd. Porfir	Grnd. Porfir	Grnd. Porfir
İz element oranları										
Ba/Nb	81.10	84.13	82.50	81.38	85.91	74.68	110.51	77.76	90.56	103.80
Dy/Yb	1.56	1.50	1.44	1.48	1.49	1.51	1.59	1.40	1.42	1.65
La/Nb	2.92	2.96	2.78	2.37	2.91	2.81	3.17	2.84	2.82	2.85
La/Ta	53.25	31.71	37.80	25.67	48.00	36.00	41.17	36.00	40.60	33.67
La/Yb	14.69	16.20	12.35	11.49	12.55	13.33	15.63	11.74	13.62	14.74
Nb/La	0.34	0.34	0.36	0.42	0.34	0.36	0.32	0.35	0.35	0.35
Nb/Ta	18.25	10.71	13.60	10.83	16.50	12.83	13.00	12.67	14.40	11.83
Nb/Th	1.16	0.95	1.05	0.87	1.03	1.26	1.15	1.21	1.13	1.16
Rb/Nb	7.15	6.72	4.90	4.45	7.33	6.49	5.42	5.63	6.69	5.75
Ta/Yb	0.28	0.51	0.33	0.45	0.26	0.37	0.38	0.33	0.34	0.44
Th/La	0.30	0.36	0.34	0.49	0.33	0.28	0.28	0.29	0.32	0.30
Th/Ta	15.75	11.29	13.00	12.50	16.00	10.17	11.33	10.50	12.80	10.17
Th/U	4.50	4.94	2.83	3.41	4.27	3.59	3.40	3.94	3.56	4.69
Th/Yb	4.34	5.77	4.25	5.60	4.18	3.77	4.30	3.42	4.30	4.45
Ti/Zr	23.31	21.30	21.03	19.36	25.27	27.69	25.25	21.46	20.10	27.04
Y/Nb	1.81	1.63	1.82	1.85	1.74	1.90	1.72	1.95	1.86	1.65
Zr/Hf	35.68	36.06	35.87	35.81	35.17	40.21	34.88	35.32	37.06	37.21
Zr/Nb	15.15	15.39	16.35	17.63	15.45	14.62	14.31	15.80	16.99	14.68
Zr/Sm	42.54	49.53	47.12	60.32	43.97	35.63	38.09	43.99	43.68	41.35

Çaltı Plütonu'na ait örnekler TAS (Toplam Alkali–Silis) sınıflama diyagramına (Le Maitre vd., 1989) aktarıldığında tüm örnekler granodiyorit alanına düşmektedir (Şekil 5a). Söz konusu kayaçlar, Peccerillo & Taylor (1976)'ın SiO_2 (%)'ye karşı K_2O (%) diyagramında (Şekil 5b), kalkalkalenden yüksek-K kalkalkalene değişen bileşimlerde olup, 1000×Ga/Al'a karşı Nb diyagramında örnekler I ve S tipi alanına düşmektedir (Whalen vd., 1987). Maniar ve Piccoli (1989)'nin A/NK'ya karşı A/CNK diyagramında (Şekil 5d) örnekler genellikle metalumin karakteri göstermekte olup bir adet granodiyorit porfir örneği peralümin alanına düşmekte ve örneklerin tamamı I tipi bir bileşim sergilemektedir.



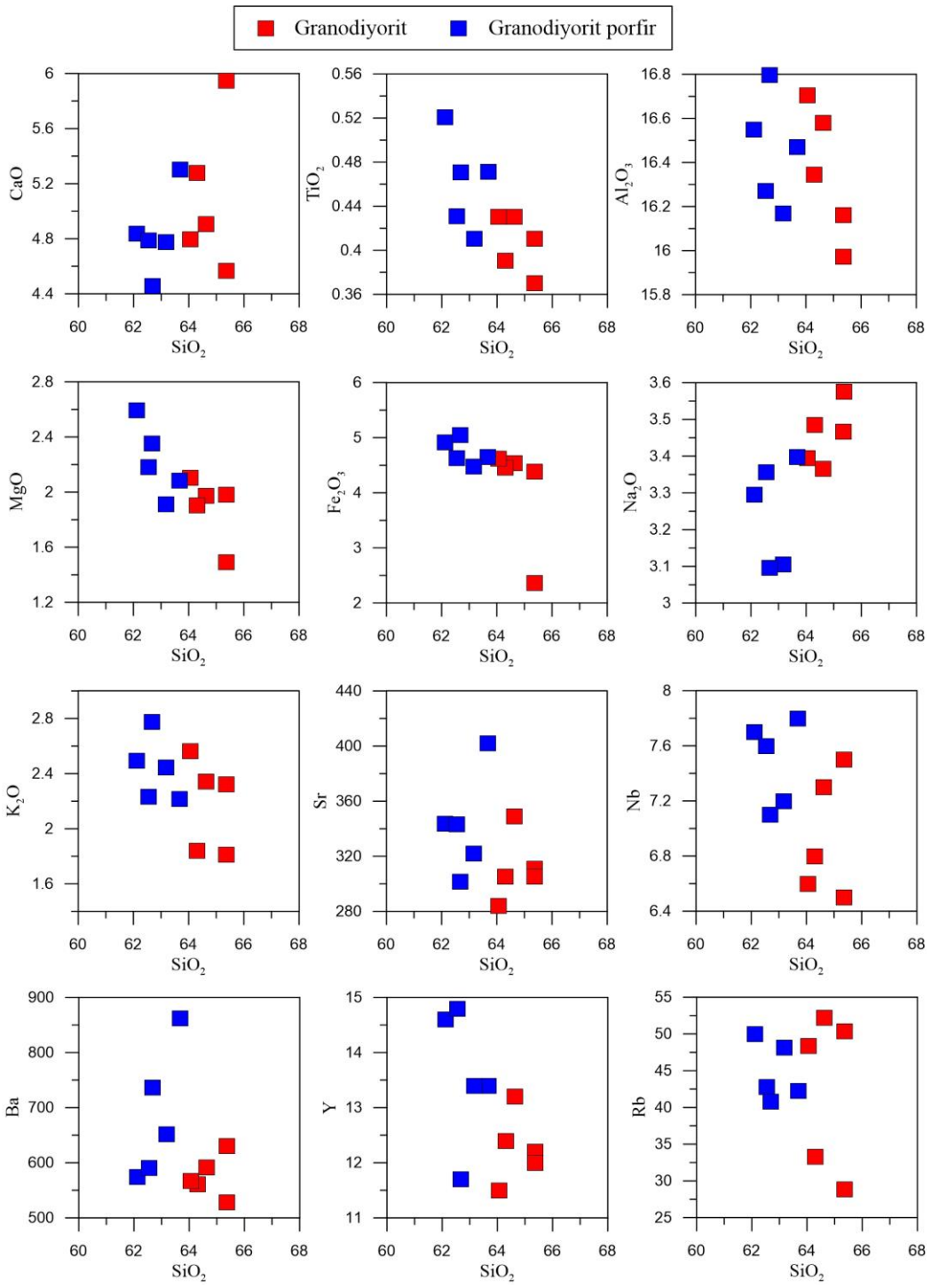
Şekil 5. Çaltı Plütonu'na ait kayaçların çeşitli diyagramlardaki konumları. (a) Örneklerin TAS diyagramına göre sınıflandırılması ve adlandırılması (Le Maitre vd., 1989). (b) SiO_2'ye karşı K_2O diyagramı (Peccerillo & Taylor, 1976). (c) 1000*Ga/Al'ye karşı Nb değişim diyagramı (Whalen vd., 1987). (d) molar A/NK'ya karşı molar A/CNK diyagramı (Maniar & Piccoli, 1989).

Figure 5. *Positions of rocks belonging to the Çaltı Pluton on various diagrams. (a) Classification and nomenclature of samples according to the TAS scheme (Le Maitre et al., 1989). (b) SiO_2 vs. K_2O diagram (Peccerillo and Taylor, 1976). (c) 1000*Ga/Al vs. Nb variation diagram (Whalen et al., 1987). (d) molar A/NK vs. molar A/CNK diagram (Maniar & Piccoli, 1989).*

İncelenen kayaçlar SiO_2'ye karşı bazı ana oksit ve iz elementlere karşı değişim grafikleri incelenmiştir (Şekil 6). Artan SiO_2 değerleriyle TiO_2, Al_2O_3, MgO, Fe_2O_3, Nb ve Y değerlerinde diyagramlarda negatif korelasyon, Na_2O değerlerinde pozitif korelasyon gözlenirken; CaO, Ba, Rb ve Sr'de ise belirgin bir korelasyon gözlenmemektedir.

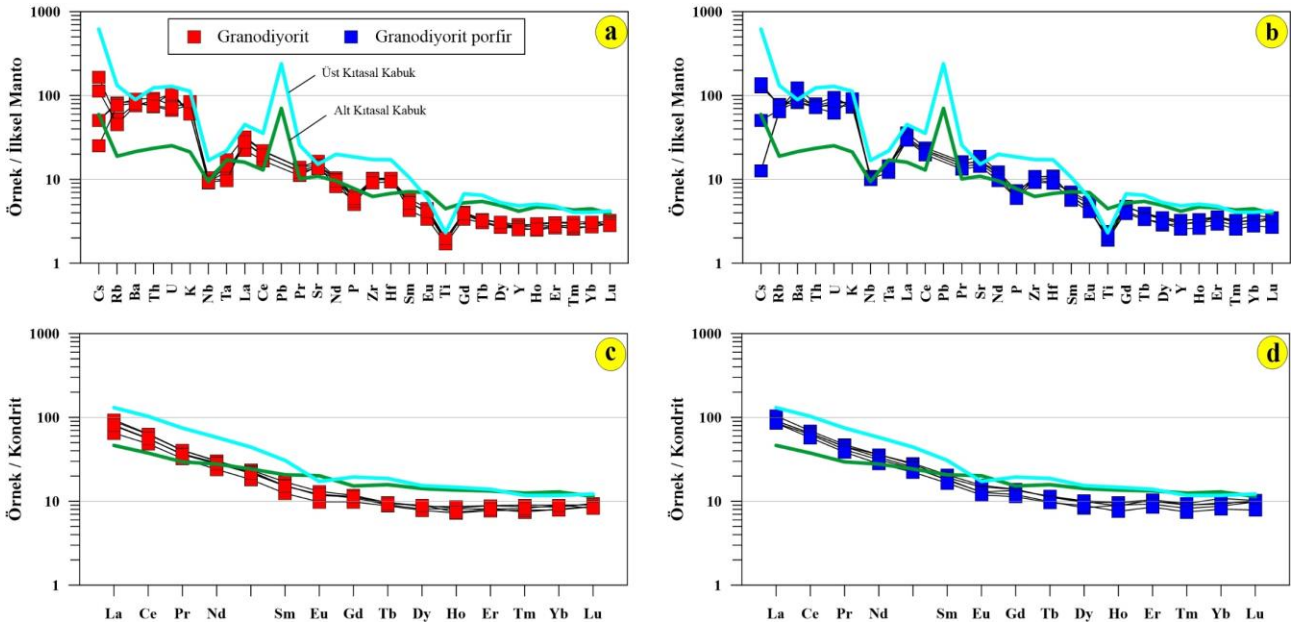
MgO, TiO_2, Fe_2O_3 ve Nb değerlerindeki negatif yönsemeler amfibol, manyetit, biyotit ve Fe-Ti oksitlerin; Na_2O değerlerindeki pozitif, Al_2O_3 değerindeki negatif korelasyonlar ise feldispatların fraksiyonlaşması ile açıklanabilmektedir. Ana oksit ve iz elementlerdeki pozitif veya negatif korelasyonlar magmanın evrimi sürecinde fraksiyonel kristalleşmenin rolünün olduğunu göstermektedir (Şekil 6).

İncelenen kayaçların ilksel mantoya (Sun & McDonough, 1989) normalize edilmiş iz element dağılımları incelendiğinde Rb, Ba, K, Sr gibi büyük iyon yarıçaplı element (BİYE) konsantrasyonlarında pozitif anomali; Nb, Ti, Ta, P gibi yüksek çekim alanlı element (YÇAE) açısından ise negatif anomali görülmektedir (Şekil 6a, b). Nb ve Ta değerlerindeki negatif anomaliler yitimle ilişkiye ya da kabuksal kirlenmeye işaret etmektedir. Nb değerlerinde ve yüksek alan enerjili elementlerde, büyük iyon yarıçaplı elementlere oranla negatif anomaliler görülmesi kabuksal kirlenmeye işaret etmesine rağmen, bu anomaliler yiten levha tarafından büyük iyon yarıçaplı elementlerince zenginleşmiş yitimle ilişkili magmaların karakteristiğini yansıtmaktadır (McCulloch & Gamble, 1991).



Şekil 6. Çaltı Plütonu kayaçları için SiO_2'ye karşı bazı ana oksitler ve iz element değişim grafikleri
Figure 6. *SiO_2 vs. some major oxides and trace element variation plots for rocks of the Çaltı Pluton*

Çaltı Plütonu'na ait kayaçların kondrite (Sun & McDonough, 1989) normalize edilmiş iz element dağılımları incelendiğinde hafif nadir toprak elementlerinin (NTE) ağır NTE'lere kıyasla daha fazla zenginleşme gösterdiği gözlenmektedir (Şekil 7). Eu/Eu* değerlerine bakıldığında granodiyoritlerde 0.89-0.93 ve granodiyorit porfirlerde 0.83-0.92 aralığında değişmektedir.



Şekil 7. Çaltı Plütonu kayaçlarının (a, b) ilksel mantoya ve (c, d) kondrite normalize edilmiş çoklu element diyagramları. Normalleştirme değerleri ile üst ve alt kabuk bileşimleri Sun ve McDonough (1989)'dan alınmıştır.

Figure 7. *Multi-element diagrams of the Çaltı Pluton rocks normalized to (a, b) the primitive mantle and (c, d) chondrite. Normalization values and upper and lower crust compositions are taken from Sun and McDonough (1989).*

4. Tartışma
4. Discussion

4.1. Petrojenez ve kaynak özellikleri
4.1. Petrogenesis and source characteristics

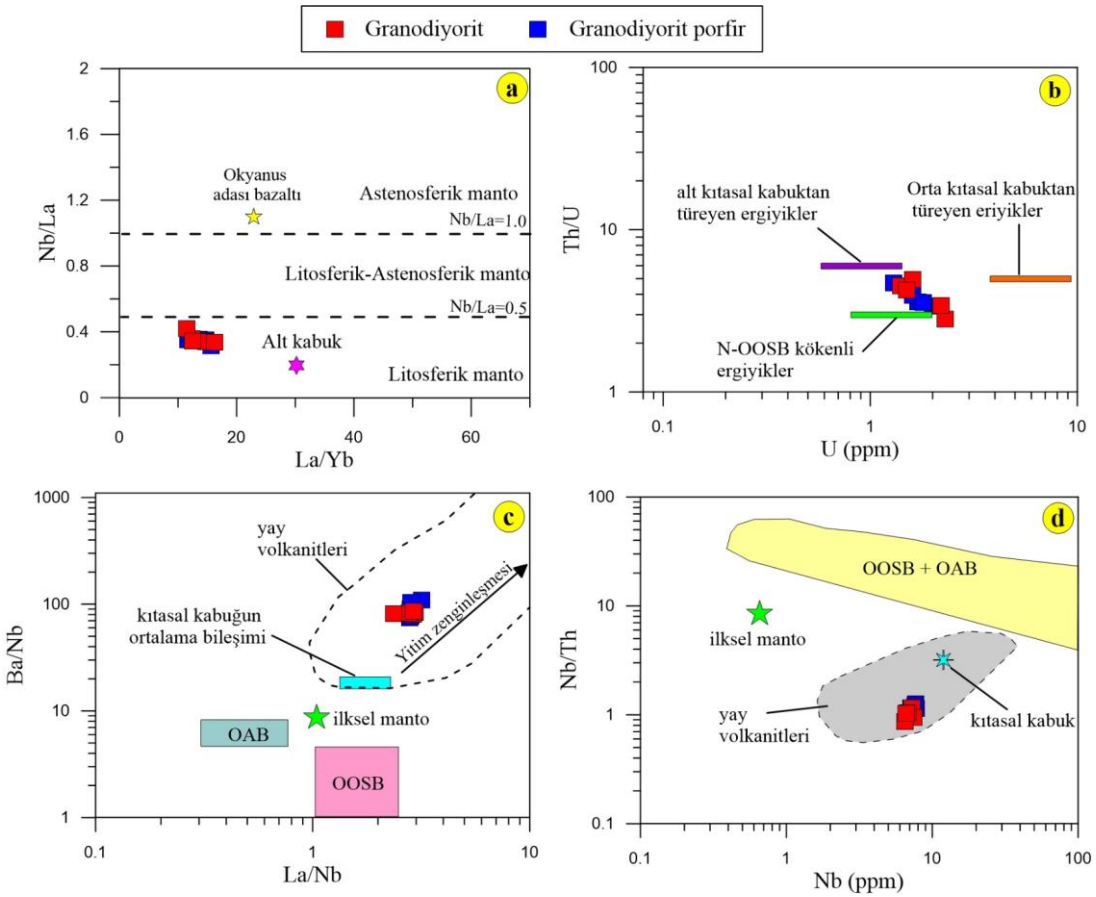
İnceleme konusunu oluşturan Çaltı Plütonu'na ait kayaçlar petrografik olarak granodiyorit ve granodiyorit porfirlerle temsil edilmektedir. Söz konusu kayaçlar I tipi, genel olarak kalkalkalenden yüksek kalkalene değişen özelliklerde metalümin karakterde bir bileşim sergilemektedir. Çarpışma ortamlarının I tipi kalkalkalen granitik magmaları genellikle (1) mantodan türeyen bazaltik magmanın fraksiyonel kristallenmesi ve/veya asimilasyon fraksiyonel kristallenmesiyle (Aghazadeh vd., 2011), (2) mafikten ortaça değişen kimyasal bileşime sahip meta-magmatik veya metasedimanter kayaçların kısmi ergimesiyle (örn: Patiño Douce & Beard, 1995) veya (3) mantodan türeyen mafik magma ile kabuk kökenli felsik magmanın karışımıyla üretilmektedir.

İncelenen plütona ait örnekler ilksel mantoya normalize edilmiş iz element dağılım diyagramlarında negatif Nb, Ta ve Ti; pozitif Ba, Sr, Rb, K anomalileri gösterirken ağır NTE'lerde ve BİYE'lerde zenginleşme sunmaktadır. Bu özellikler kabuksal kayaçlarda yaygın olarak görülmektedir. Negatif Ta-Nb anomalileri, BİÇE'lerde zenginleşme ve BİYE'lerde tükenme yitimle ile ilişkili magmaların karakteristiğidir (Pearce & Peate, 1995; Şekil 7a, b). Kondrite göre normalize edilmiş iz element dağılım diyagramlarında Eu/Eu* değerlerine bakıldığında granodiyoritlerde (0.89-0.93) veya granodiyorit porfirlerde (0.83-0.92) (Tablo 2) 1 değerine yakın olmakla beraber hafif oranda negatif anomali görülmektedir.

Nb/Ta, Rb/Nb, Zr/Hf, Th/Ta ve Th/La gibi bazı iz element oranları, magma kaynak alanlarının yorumlanmasında önemli bir belirteçtir. Mantodan türeyen magmaların ortalama Nb/Ta değeri 17.5 iken kabuksal kökene sahip kayaçlarda bu değer 11-12 civarındadır (Green, 1995). İncelenen plütonda granodiyoritler ve granodiyorit porfirlerin Nb/Ta oranları sırasıyla 10.71-18.25 ile 11.83-14.40 arasında değişmektedir (Tablo 3). Alt kıtasal kabuğun ortalama Rb/Nb oranı 2.2'dir (Rudnick & Gao, 2003). Buna karşın ilksel manto için ortalama Rb/Nb değeri 0.89'dur (Sun & McDonough, 1989). Çaltı Plütonu'na ait granodiyoritlerde Rb/Nb oranı 4.45-7.33 aralığında iken, granodiyorit porfirlerde bu oran 5.42-6.69'dur (Tablo 3). Manto kayaçlarının ortalama Zr/Hf ve Th/Ta oranları sırasıyla 36.2 ve 2.1 (Sun & McDonough, 1989) iken

bu oranlar kıtasak kabuk için 35.7 ve 8'dir (Rudnick & Gao, 2003). İncelenen kayaçların Zr/Hf ve Th/Ta oranları sırasıyla granodiyoritlerde 35.17-36.06 ile 11.29-16 aralıklarında, granodiyorit porfirlerde ise 34.88-40.21 ile 10.17-12.8 aralıklarında değişmektedir (Tablo 3). Yüksek Nb/Ta, Rb/Nb, Zr/Hf ve Th/Ta değerleri söz konusu kayaçların oluşumunda litosferik manto kökeninden ziyade alt kıtasal kabuk etkisinin daha fazla olduğunu göstermektedir. Plank (2005), üst kabuğun yüksek Th/La oranlarının granitik materyalden kaynaklandığını ileri sürmüştür (Th/La > 0.5). Felsik magmatik kayaçlar (granodiyoritler ve granitler) yüksek Th/La oranlarına sahipken, alt kabuk kayaçları düşük Th/La oranlarına sahiptir. İncelenen kayaçların 0.5'ten küçük Th/La oranları (granodiyoritler: 0.30-0.49, granodiyorit porfirler: 0.28-0.32; Tablo 3) bu kayaçların oluşumunda alt kıtasal kabuk etkisini desteklemektedir.

Nb/La gibi iz element oranları, magma kaynak bölgesinin yorumlanmasında kullanılan diğer temel göstergelerden birisidir. İlksel bir manto kaynağı, 0.96'lık ortalama Nb/La oranıyla karakterize edilirken (Sun and McDonough, 1989), kıtasal kabuk 0.46'lık bir Nb/La oranına sahiptir (Weaver & Tarney, 1984). Çaltı Plütonu'na ait granodiyoritlerin ve granodiyorit porfirlerin Nb/La oranlarının ortalaması sırasıyla 0.36 ve 0.35'tir (Tablo 3). Bu değerler söz konusu kayaçların önemli miktarda kabuk malzemesi içerdiğini göstermektedir. Plütona ait örnekler La/Yb'ye karşı Nb/La diyagramı üzerine düşürüldüğünde düşük Nb/La oranları nedeniyle litosferik manto alanına düşmektedir (Şekil 8a). İncelenen örnekler Th/U'a karşı Th diyagramı üzerine aktarıldığında alt kıtasal kabuk ergiyikleri ile N-OOSB ergiyikleri arasındaki bir alanda temsil edilmektedir (Şekil 8b). Çaltı plütonuna ait incelenen örneklerin La/Nb ve Ba/Nb oranları sırasıyla granodiyoritlerde (2.37-2.96) ve (81.10-85.91), granodiyorit porfirlerde ise (2.81-3.17) ve (74.68-110.51) olup (Tablo 3) bu yüksek değerler OOSB ve OAB'larından ziyade yay volkanitlerine benzediklerini göstermektedir (Sun and McDonough, 1989; Şekil 8c). Benzer şekilde Nb'ye karşı Nb/Th diyagramında da hem granodiyorit hem degranodiyorit porfir örnekleri yay volaknitleri alanına düşmektedir (Şekil 8d).

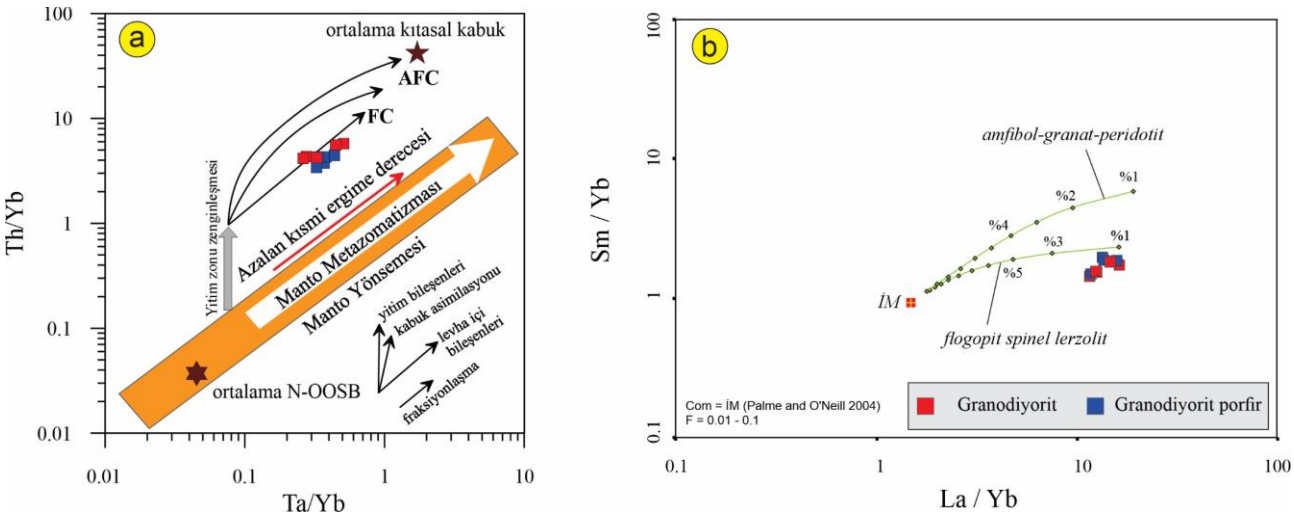


Şekil 8. Çaltı Plütonu kayaçları için (a) La/Yb'a karşı Nb/La diyagramı Smith vd. (1999), (b) U (ppm)'a karşı Th/U. Alt ve orta kıtasal kabuğa ait alan Rudnick & Gao (2003), normal Orta Okyanus Sırtı Bazalt (NOOSB) alanı Sun vd. (2008). (c) La/Yb'a karşı Nb/La. Yay volkanitleri alanı Jahn ve Zhang (1984), ilksel manto değeri Sun ve McDonough (1989), kıtasal kabuğun ortalama değeri Taylor ve McLennan (1985), OAB ve OOSB alanları Le Roex (1987). (d) La/Nb'a karşı Ba/Nb grafikleri. İlksel manto değeri Hofmann (1988), kıtasal kabuk değeri ve OOSB, OAB ile yay volkanitleri alanı Schmidberger ve Hegner (1999)'dan alınmıştır.

► ***Figure 8.*** *For the Çaltı Pluton rocks (a) La/Yb versus Nb/La diagram (Smith et al., 1999). (b) U (ppm) versus Th/U diagram. The lower and middle continental crust fields are from Rudnick and Gao (2003), the normal Mid-Ocean Ridge Basalt (N-MORB) field is from Sun et al. (2008). (c) La/Yb versus Nb/La. Arc volcanic field from Jahn and Zhang (1984), the primitive mantle value from Sun and McDonough (1989), the mean continental crust value from Taylor and McLennan (1985), OIB and MORB fields from Le Roex (1987). (d) La/Nb versus Ba/Nb plots. The primitive mantle value from Hofmann (1988), continental crust value and MORB, OIB and arc volcanics field from Schmidberger and Hegner (1999).*

Manto kaynak bölgesini ve yitim ve/veya kabuk kirlenmesinin etkilerini belirlemek için kullanılan Ta/Yb-Th /Yb diyagramına (Pearce, 1983) aktarılan örneklerin manto dizisinin üzerinde yer alması yitim bileşenlerince zenginleşmiş bir kaynağı işaret ederken, bu kaynaktan türeyen magmanın daha sonra da fraksiyonel kristalleşme ile son halini aldığını göstermektedir. Ayrıca incelenen plütona ait örnekler bu diyagramda yüksek Th/Yb ve Ta/Yb oranları ile ortalama kıtasal kabuk değerine doğru bir yönseme göstermektedir (Şekil 9a).

La, Yb ve Dy gibi iz elementler spinel ve granat gibi kaynak bileşimini göstermede rehber olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Aldanmaz vd., 2000). Çaltı Plütonu'na ait granodiyorit ve granodiyorit porfirler, Ersoy (2013)'un Petromodeller programı aracılığıyla değerlendirilerek söz konusu kayaçların kısmi ergime dereceleri ve kaynak karakteristiği gibi parametreleri belirlenmiştir. Bu kapsamda La/Yb'ye karşı Dy/Yb oranlarına diyagramı oluşturulmuştur. Yb elementi özellikle granatların kristal yapısını tercih etmektedir (Aldanmaz vd., 2000). Dy/Yb oranının 2.5'tan yüksek olduğu kayaçların derin kökenli bir kaynaktan (granatlı manto mineralojisi) itibaren oluşan ergiyikler tarafından üretilebileceği bilinmektedir (Yang vd., 2012) Çaltı Plütonu'na ait granodiyorit ve granodiyorit porfirlerin Dy/Yb oranları sırasıyla 1.44-1.56 ve 1.40-1.65 olduğu görülmektedir (Tablo 3). La/Yb'ye karşı Sm/Yb diyagramında söz konusu kayaçların flogopit spinel lerzolit bileşimindeki bir kaynaktan %1 ilâ %3 aralığında değişen kısmi ergimesi sonucu türedikleri görülmektedir (Şekil 9b).



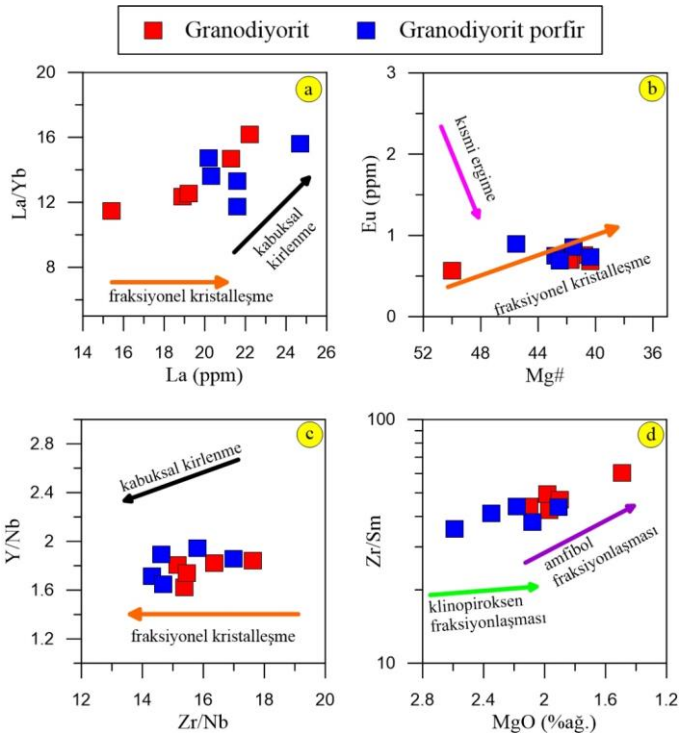
Şekil 9. Ta/Yb'ye karşı Th/Yb grafiği (Pearce, 1983) (b) La/Yb'ye karşı Dy/Yb diyagramı (Kapalı sistem modal olmayan fraksiyonel ergime (kritik ergime porozitesi %1) İlksel manto kökeni (İM; Palme & O'Neil, 2004), amfibol-granat peridotit için (Grt 0.01/0.15 + Kpr 0.03/0.22 + Opx 0.12/0.15 + Ol 0.79/0.15; Ionov vd., 2002), Spinel lerzolit için (Spl 0.02/0.02 + Bio 0.02/0.06 + Cpx 0.18/0.47 + Opx 0.30/0.35 + Ol 0.48/0.10; Thirlwall vd., 1994; Ionov vd., 2002). Ersoy (2013)'un (Petromodeler) programı yardımıyla modal olmayan fraksiyonel ergime eğrileri oluşturulmuştur.

Figure 9. *Plot of Ta/Yb versus Th/Yb (Pearce, 1983) (b) La/Yb vs. Dy/Yb diagram (Closed-system non-modal fractional melting model (with critical melt porosity of 1%) from Primitive Mantle source (PM; Palme & O'Neil, 2004) for amphibole-garnet peridotite (Grt 0.01/0.15 + Kpr 0.03/0.22 + Opx 0.12/0.15 + Ol 0.79/0.15; Ionov et al., 2002), for spinel lherzolite (Spl 0.02/0.02 + Bio 0.02/0.06 + Cpx 0.18/0.47 + Opx 0.30/0.35 + Ol 0.48/0.10; Thirlwall et al., 1994; Ionov et al., 2002). Non-modal fractional melting curves were created with the help of the software (Petromodeler) by Ersoy (2013).*

4.2. Fraksiyonel kristalleşme
4.2. Fractional crystallization

İncelenen plütonu oluşturan magmanın evrimini ortaya çıkarabilmek için çizilen Harker diyagramları bazı ana oksit ve iz elementler ile SiO_2 arasında doğrusal korelasyonun varlığını işaret etmektedir. Bu korelasyonlar magmanın evrimi sırasında bazı ana fazların fraksiyonlaştığını göstermektedir. İncelenen kayaçların artan SiO_2'ye karşı TiO_2, Al_2O_3, MgO, Fe_2O_3, Sr, Nb, Ba, Y ve Rb değerlerinde negatif korelasyon; Na_2O değerlerinde pozitif korelasyon gözlenirken; CaO'da ise belirgin bir korelasyon gözlenmemektedir (Şekil 6). Bu durum magma evrimi sürecinde fraksiyonel kristalleşmenin rolünün olduğunu göstermektedir. SiO_2 arttıkça MgO, Fe_2O_3 ve Rb değerlerinin azalması biyotit ve amfibol gibi mafik fazların fraksiyonlaştığını göstermektedir. Ayrıca artan SiO_2'ye karşı TiO_2 değerlerinin azalması sırasıyla Fe-Ti oksit fraksiyonlaşmasına işaret etmektedir. Artan SiO_2 oranıyla Na_2O değerlerinde görülen pozitif korelasyonlar feldispatların fraksiyonel kristalleşmesiyle ilişkilidir. İlksel mantoya normalize edilmiş iz element dağılım diyagramında gözlenen negatif P anomalisi apatit fraksiyonlaşmasının varlığına işaret etmektedir (Şekil 7a, b). Çaltı Plütonu'na ait granodiyorit ve granodiyorit porfir örneklerinin kondrite normalize edilmiş NTE dağılımları hafif NTE'den ağır NTE'ye doğru konkav şekilli iç bükey bir desen sunmaktadır (Şekil 7c, d). Bu durum plütonun oluşumunda amfibol fraksiyonlaşmasının önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Thirlwall vd., 1994).

La'ya karşı La/Yb (Şekil 10a), Mg#'a karşı Eu (Şekil 10b) ve Zr/Nb'ye karşı Y/Nb (Şekil 10c) diyagramları, Çaltı Plütonu'na ait granodiyorit ve granodiyorit porfirlerin evriminde hem fraksiyonel kristalleşmenin hem de kabuksal kirlenmenin etkin rol oynadığını göstermektedir. MgO'ya karşı Zr/Sm diyagramında (Şekil 10d) söz konusu kayaçlarda amfibol fraksiyonlaşmasının varlığı desteklenmektedir. La/Nb'nin 1.5'tan ve La/Ta'nın 22'den büyük olması magmatik kayaçların oluşumunda kabuksal kirlenmenin etkin rol oynadığını göstermektedir (Abdelfadil vd., 2022). Çaltı Plütonu'na ait granodiyoritlerin La/Nb oranları 2.37-2.96 iken La/Ta oranları 25.67-53.25'tir (Tablo 3). Benzer şekilde granodiyorit porfirlerde bu oranlar sırasıyla 2.81-3.17 ve 33.67-41.17 aralıklarında değişmektedir (Tablo 3). Bu oranlar Çaltı Plütonu kayaçlarının oluşumunda kabuksal kirlenmenin varlığına işaret etmektedir. Bununla birlikte 30'dan düşük (Wagner vd., 1995) Ti/Zr oranları (granodiyoritler: 19.36-25.27; granodiyorit porfirler: 20.1-27.69; Tablo 3) kabuksal etkinin varlığını desteklemektedir.



Şekil 10. (a) La'a karşı La/Yb diyagramı. (b) Mg#'na karşı Eu diyagramı. (c) Zr/Nb'ye karşı Y/Nb diyagramı. (d) MgO'ya karşı Zr/Sm diyagramı. Fraksiyonlaşma yönsemeleri Temizel vd. (2022)'nden alınmıştır.
Figure 10. *(a) La versus La/Yb diagram. (b) Mg# versus Eu diagram. (c) Zr/Nb versus Y/Nb diagram. (d) MgO versus Zr/Sm diagram. Fractionation trends taken from Temizel et al. (2022).*

5. Sonuç
5. Conclusion

İnceleme konusunu oluşturan Çaltı Plüton'u kayaçları granodiyorit ve granodiyorit porfirlerle temsil edilmektedir. Özellikle Çaltı plütonunda bulunan MMA oluşumlarının yanı sıra, plajiyoklaz ve amfibollerde görülen poikilitik ve erime/çözünme dokuları, bu plütonun oluşumu sırasında eş-zamanlı mafik ve felsik magmalar arasındaki karışımın güçlü bir kanıtı olarak yorumlanmaktadır. Tüm kayaç ana oksit ve iz element verileri bu kayaçların I tipi bir karakterde kalkalkalenden yüksek-K kalkalkalene kadar değişen, ağırlıklı olarak metalümin bileşimli olduğunu göstermektektedir. İncelenen plütona ait örnekler ilksel mantoya normalize edilmiş iz element dağılım diyagramlarında negatif Ta, Nb ve Ti anomalileri, BİÇE'lerde zenginleşme ve BİYE'lerde tüketilme görülmesi, bu kayaçların oluşumunda yitimin etkisinin varlığını göstermektedir. İkili değişim diyagramlarında Çaltı Plütonu'na ait granodiyorit ve granodiyorit porfirlerin oluşumunda hem fraksiyonel kristalleşme hem de kabuksal kirlenme etkin rol oynamıştır. Yüksek Nb/Ta, Rb/Nb, Zr/Hf ve Th/Ta ile düşük Nb/La ve Th/La oranları Çaltı Plütonu'na ait granodiyorit ve granodiyorit porfirlerin oluşumunda alt kıtasal kabuk etkisini desteklemektedir. İncelenen kayaçların Dy/Yb oranları, kayaçların sığ derinlikleri temsil eden spinel lerzolit bileşimindeki bir kaynağın %1 ilâ %3 aralığında kısmi ergimeyle oluştuğunu göstermektedir.

Teşekkür
Acknowledgement

Saha çalışmalarındaki katkılarından ötürü Abdullah SAR'a, makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları öneri ve eleştirilerden dolayı hakemler ve editörlere teşekkür ederim.

Yazar katkısı
Author contribution

Yazar saha çalışması, örnek hazırlama aşamaları, verilerin temini, analizlerin değerlendirilmesi ve yayın haline getirilmesi aşamalarında görev almıştır.

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Abdelfadil, K. M., Gharib, M. E., Uher, P., & Putiš, M. (2022). Petrogenesis of post-orogenic Pan-African rare-element granitic pegmatites in the western Arabian-Nubian Shield, Aswan area, southern Egypt. *Journal of Asian Earth Sciences*, *224*, 105003. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.105003

Aghazadeh, M., Castro, A., Badrzadeh, Z., & Vogt, K. (2011). Post-collisional polycyclic plutonism from the Zagros hinterland: the Shaivar Dagh plutonic complex, Alborz belt, Iran. *Geological Magazine*, 148(5–6), 980–1008. https://doi.org/10.1017/S0016756811000380

Aldanmaz, E., Pearce, J., Thirlwall, M., & Mitchell, J. (2000). Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *102*(1–2), 67–95. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00182-7

Barbarin, B. (1999). A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos,* 46(3), 605–626. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00085-1

Bilgiç, T. 2002. Geological Map of Turkey (1: 500.000 Scale Sivas sheet). General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA), Ankara.

Boztuğ, D., Debon, F., İnan, S, Tutkun, S.Z., Avcı, N., Kesgin, Ö. (1997). Comparative geochemistry of four plutons from the Cretaceous-Palaeogene Central Eastern Anatolian alkaline province, (Divriği region, Sivas, Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences,* 6, 95–115.

Brown, M. (2013). Granite: From genesis to emplacement. *Geological Society of America Bulletin*, 125(7–8), 1079–1113. https://doi.org/10.1130/B30877.1

Chappell, B.W., & White, A.J.R. (1974). Two contrasting granite types. *Pac. Geol.* 8, 173–174.

Chen, B., Jahn, B., & Wei, C. (2002). Petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Dabie UHP complex, Central China: trace element and Nd–Sr isotope evidence. Lithos, 60(1-2), 67–88. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(01)00077-9

Douce, A.E.P. & Beard, J.S. (1995). Dehydration-melting of Biotite Gneiss and Quartz Amphibolite from 3 to 15 kbar. *Journal of Petrology*, 36(3), 707–738. https://doi.org/10.1093/petrology/36.3.707

Ersoy, E.Y. (2013). PETROMODELER (Petrological Modeler): a Microsoft® Excel© spreadsheet program for modelling melting, mixing, crystallization and assimilation processes in magmatic systems. *Turkish Journal of Earth Science*, 22, 115-125. https://doi.org/10.3906/yer-1104-6

Green, T.H. (1995). Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical Geology*, *120*(3–4), 347–359. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00145-X

Hofmann, A.W. (1988). Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, *90*(3), 297–314. https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90132-X

Ionov, D.A. (2002). Mechanisms and Sources of Mantle Metasomatism: Major and Trace Element Compositions of Peridotite Xenoliths from Spitsbergen in the Context of Numerical Modelling. *Journal of Petrology*, *43*(12), 2219–2259. https://doi.org/10.1093/petrology/43.12.2219

Ionov, D. A., Bodinier, J.-L., Mukasa, S. B. & Zanetti, A. (2002). Mechanisms and sources of mantle metasomatism: major and trace element compositions of peridotite xenoliths from Spitsbergen in the context of numerical modelling. Journal of Petrology 43, 2219–2259.

Jahn, B., & Zhang, Z. (1984). Archean granulite gneisses from eastern Hebei Province, China: rare earth geochemistry and tectonic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *85*(3), 224–243. https://doi.org/10.1007/BF00378102

Ketin, İ. (1966). Anadolu'nun Tektonik Birlikleri. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 66(66), 20-37.

Le Maitre, R.W. (Ed) (1989) *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Blackwall, Oxford.

Le Roex, A.P. (1987). Source regions of mid-ocean ridge basalts; evidence for enrichment processes. In A.M. Menzies, & C.J. Hawkesworth, (Eds.), *Mantle Metasomatism(pp.*389- 422). Academic Press.

Loiselle, M.C., & Wones, D.R. (1979). Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geol. Soc. Am.* Abstracts with Programs. 11, 468.

Maniar, P.D., & Picolli, P.M. (1989). Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5), 635–643. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2

McCulloch, M.T., & Gamble, J.A. (1991). Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3–4), 358–374. https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90029-H

Okay, A. I., & Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. *Geological Society, London, Special Publications*, 156(1), 475–515. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.156.01.22

Önal, A., Boztuğ, D., Kürüm, S., Harlavan, Y., Arehart, G. B., & Arslan, M. (2005). K-Ar age determination, whole-rock and oxygen isotope geochemistry of the post-collisional Bizmişen and Çalti plutons, SW Erzincan, eastern Central Anatolia, Turkey. *Geological Journal*, 40(4), 457–476. https://doi.org/10.1002/gj.1023

Özgül, N., & Turşucu, A. (1984). Stratigraphy of the Mesozoic carbonate sequence of the Munzur Mountain. In O. Tekeli & M.C. Göncüoğlu (Eds.), *Geology of the Taurus Belt.* International Symposıum Proceedings, 173-180, MTA, Ankara.

Palme, H. and O'Neill, H. St. C. (2004). Cosmochemical estimates of Mantle Composition. In: Treatise on Geochemistry. Holland, H.D. and Turrekian, K.K. (Editors), Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 2: 1-38.

Pearce, J.A., (1983). Role of the Sub-Continental Lithosphere in Magma Genesis at Active Continental Margins. In C.J. Hawkesworth, & M.J. Norry, (Eds.), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths (pp.* 230-249). Shiva Cheshire.

Pearce, J.A., & Peate, D.W. (1995). Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *23*(1), 251–285. https://doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.001343

Peccerillo, A., & Taylor, S.R. (1976). Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1), 63–81. https://doi.org/10.1007/BF00384745

Plank, T. (2005). Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, *46*(5), 921–944. https://doi.org/10.1093/petrology/egi005

Rudnick, R.L., & Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. In H.D., Holland, & K.K., Turekian, (Eds), *Treatise on Geochemistry(*pp 203). Elsevier.

Schmidberger, S.S., & Hegner, E. (1999). Geochemistry and isotope systematics of calc-alkaline volcanic rocks from the Saar-Nahe basin (SW Germany) – implications for Late-Variscan orogenic development. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *135*(4), 373–385. https://doi.org/10.1007/s004100050518

Smith, E. I., Sánchez, A., Walker, J. D., & Wang, K. (1999). Geochemistry of Mafic Magmas in the Hurricane Volcanic Field, Utah: Implications for Small- and Large-Scale Chemical Variability of the Lithospheric Mantle. *The Journal of Geology*, *107*(4), 433–448. https://doi.org/10.1086/314355

Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12, 1–33. https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0

Sun, C.G., Zhao, Z.D., Mo, X.X., Zhu, D.C., Dong, G.C., Zhou, S., Chen, H.H., Xie, L.W., Yang, Y.H., Sun, J.F., & Yu, F. (2008). Enriched mantle source and petrogenesis of Sailipu ultrapotassic rocks in southwestern Tibet Plateau: constraints from zircon U–Pb geochronology and Hf isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica,* 24, 249- 264.

Sun, S.-s., & McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313–345. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Taylor, S.R., & McLennan, S.M. (Ed) (1985). *The Continental Crust, Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, pp. 312.

Temizel, İ., Arslan, M., Abdioğlu Yazar, E., Aslan, Z., Kaygusuz, A., & Baki Eraydın, T. (2022). Zircon U Pb geochronology and petrology of the tholeiitic gabbro from the Kovanlık (Giresun) area: Constraints for the Late Cretaceous bimodal arc magmatism in the Eastern Pontides Orogenic Belt, NE Turkey. *Lithos*, 428–429, 106840. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106840

Thirlwall, M. F., Upton, B. G. J. & Jenkins, C. (1994). Interaction between continental lithosphere and the Iceland plume–Sr–Nd–Pb isotope geochemistry of Tertiary basalts, NE Greenland. Journal of Petrology 35, 839–879.

Weaver, B. L., & Tarney, J. (1984). Empirical approach to estimating the composition of the continental crust. *Nature*, *310*(5978), 575–577. https://doi.org/10.1038/310575a0

Whalen, J.B., Currie, K.L., & Chappell, B.W. (1987). A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4), 407–419. https://doi.org/10.1007/BF00402202

White, A.J.R. (1979). Sources of granitic magma. *Geol. Soc. Am.* Abstracts with Programs. 11, 539.

Yang, W., Niu, H., Shan, Q., Luo, Y., Sun, W., Li, C., Li, N., & Yu, X. (2012). Late Paleozoic calc-alkaline to shoshonitic magmatism and its geodynamic implications, Yuximolegai area, western Tianshan, Xinjiang. Gondwana Research, 22(1), 325–340. https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.10.008

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 397-406 doi: 10.17714/gumusfenbil.1599741 Research Article

Effects of vibration frequency and velocity parameters on Doppler frequency shift in laser Doppler vibrometer systems

Lazer Doppler vibrometre sistemlerinde titreşim frekansı ve hız parametrelerinin Doppler frekans kayması üzerindeki etkileri

Abdurrahman GÜNDAY*[1], Aydın BALABEY[1], Canberk UTAR[1], Muhammed DEMİR[1] Muhammed Mert YILMAZ[1] Taylan SİPAHİ[2]

[1]*Bursa Uludağ University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, 16059, Bursa, Türkiye*
[2]*Turkish Aerospace Industries Inc., Engineering Vice Precidency, Research and Technology Centers, Ankara, Türkiye*

• Received: 13.12.2024 • Accepted: 18.03.2025

Abstract

In this article, the effects of maximum velocity, vibration frequency and vibration amplitude parameters of objects on Doppler frequency shift (DFS) in Laser Doppler Vibrometer (LDV) systems using lasers at 1064 nm and 1550 nm wavelengths have been examined. In this context, while the velocity change of the object has been obtained in the range of 0 – 1200 μm/s with the laser at 1064 nm wavelength, the DFS varied between 0 and 2255.64 Hz. On the other hand, for 1550 nm wavelength, DFS have taken the values in the range of 0 – 1548.39 Hz. Moreover, for the 1064 nm wavelength, the maximum DFS and sampling time have been obtained in the range of 295.26 – 2066.84 Hz and 6.77 – 0.96 ms, respectively, in response to the change of vibration frequency from 50 to 350 Hz. For the same values of the vibration frequency, at the wavelength of 1550 nm, the maximum DFS and sampling time have changed in the range of 202.68 – 1418.78 Hz and 9.86 – 1.41 ms, respectively. Therefore, it is observed that as the vibration frequency increases, the maximum velocity and DFS increase linearly, while the sampling time decreases logarithmically. The results show that laser systems at 1064 nm wavelength respond faster but produce higher DFS values. On the other hand, LDV systems employing lasers at 1550 nm wavelength offer lower DFS and longer sampling times. Additionally, lasers that emit light at a wavelength of 1064 nm are more sensitive to velocity changes, whereas lasers at a wavelength of 1550 nm provide more stable measurement opportunities.

Keywords: Doppler frequency shift (DFS), Laser Doppler vibrometer (LDV), Vibration frequency, Vibration velocity

Öz

Bu makalede, 1064 nm ve 1550 nm dalgaboylarında lazerler kullanan Lazer Doppler Vibrometre (LDV) sistemlerinde, nesnelerin maksimum hız, titreşim frekansı ve titreşim genliği parametrelerinin Doppler frekans kayması (DFK) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, 1064 nm dalgaboyundaki lazer ile nesnenin titreşim hızı değişimi 0 – 1200 μm/s aralığında elde edilirken, DFK, 0 ile 2255,64 Hz arasında değişim göstermiştir. Buna karşılık, 1550 nm dalgaboyu için DFK, 0 – 1548,39 Hz aralığında değerler almıştır. Ayrıca, 1064 nm dalgaboyu için titreşim frekansının 50 – 350 Hz aralığında değişimine karşılık, maksimum DFK ve örnekleme süresi, sırasıyla, 295,26 – 2066,84 Hz ve 6,77 – 0,96 ms aralığında elde edilmiştir. Aynı titreşim frekans değerleri için 1550 nm dalgaboyunda, maksimum DFK ve örnekleme süresi, sırasıyla, 202,68 – 1418,78 Hz ve 9,86 – 1,41 ms aralığında değişmiştir. Dolayısla, titreşim frekansının artışıyla, maksimum hızın ve DFK'nın lineer olarak arttığı, örnekleme süresinin ise logaritmik olarak azaldığı gözlemlenmektedir. Sonuçlar, 1064 nm dalgaboyundaki lazer sistemlerinin daha hızlı tepki verdiğini, ancak daha yüksek DFK değeri ürettiğini göstermektedir. Buna karşılık, 1550 nm dalgaboyunda lazer kullanan LDV sistemleri daha düşük DFK ve daha uzun örnekleme süresi sunmaktadır. Bunun yanı sıra, 1064 nm dalgaboyunda ışıma yapan lazerler, hız değişikliklerine daha duyarlı olmasına karşılık, 1550 nm dalgaboyunda ışıma yapan lazerler daha kararlı ölçüm imkânı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: *Doppler frekans kayması (DFK), Lazer Doppler vibrometre (LDV), Titreşim frekansı, Titreşim hızı*

*Abdurrahman GÜNDAY; agunday@uludag.edu.tr

1. Introduction

LIDAR (Light Detection and Ranging) sensor is an imaging device that accurately measures the distance and surface structure of an object without contact and remotely by using a laser beam. In LIDAR systems, laser pulses are directed to the object's surface whose distance is to be measured, and the reflected light photons are detected by the photodetector and the distance is computed. LIDAR systems generally consist of a laser, detector, IMU (Inertial Measurement Unit) and GPS (Global Positioning System) components. In these systems, in principle, a three-dimensional point cloud is created using the IMU and GPS data obtained. Each point represents a reflection signal at a specific location (Cartesian coordinates (x, y, z)). In this way, high-resolution and detailed three-dimensional maps are acquired. The obtained three-dimensional (3-D) mapping data is widely used, especially in topography systems, autonomous vehicles and geographic information systems (Allahverdi et al., 2009; Çelik et al., 2014; Karaman, 2019).

LDV is a measuring device that remotely and non-contactly detects the vibration velocity of the target or object based on the DFS of laser light. These devices are also used to precisely measure waveforms of elastic waves or particle motion in the ultrasonic frequency range (Nishizawa et al., 1997; Nishizawa et al., 1998; Lei & Nishizawa, 1998; Scales & Wijk, 1999; Sivaji et al., 2002; Fukushima et al., 2003; Boudet et al., 2005; Campman et al., 2005). Imaging cameras are also used for such measurements. However, since these cameras operate at low frame rates in the range of a few hundred hertz, they are not preferred over LDVs (Blackmon & Antonelli, 2006; Ma et al., 2008).

The operation of an LDV is principally based on reflecting a laser beam onto a moving surface and measuring changes in the velocity of the surface through a photodetector (Drain, 1980). The light beam produced by the laser light source in the LDV focuses on a specific point on the surface, and as this point moves, a frequency shift occurs on the laser beam. This frequency shift is called DFS. Depending on the DFS, the velocity and direction of movement of the object's surface are determined. LDV is considered an important technological device as it measures the surface vibrations of an object with high accuracy and precision using DFS data (Adrian, 1993).

Figure 1 shows the working principle of an LDV system. The LDV system includes a laser source that produces laser beam at a specific frequency (f_o), a reflector, splitters, a Bragg cell, and a photodedector in general. The first splitter used in the LDV illustration shown in Figure 1 allows the light coming from the laser source to be divided into two: light beam and test beam (Oldengram et al., 1973; Buchhave, 1975; Halliwell, 1979).

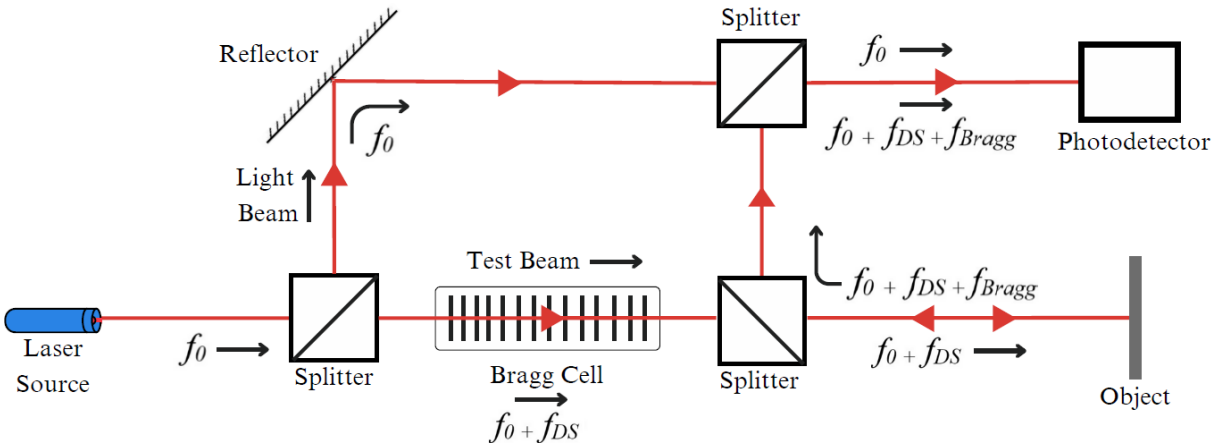


Figure 1. Principle scheme of an LDV system

In the LDV systems, splitters play a crucial role in creating separate paths for the light and test beams and directing them to the appropriate parts of the system. In this LDV scheme, the light beam is reflected from the reflector and reaches the photodetector through another beam splitter. The reflector employed in the LDV system acts as a fixed surface that reflects the light beam back to the photodetector. Afterwards, the test beam is passed through a Bragg cell where its frequency is changed by f_{Bragg}, i.e. frequency of Bragg, and then directed to a second splitter. The Bragg cell used in the system, i.e. acousto-optic modulator, is used to shift the frequency of the test beam by a certain amount (f_{Bragg}). This frequency shift is crucial for separating the

signals of the reference and test beams and facilitating precise Doppler shift measurements. When the Bragg cell is not used in the LDV system, DFS can only be measured depending on the speed of the test beam, but the direction of motion cannot be distinguished and stationary objects cannot be detected. Furthermore, small frequency differences at low speeds become difficult to measure without the constant frequency shift provided by the Bragg shift, significantly reducing the overall sensitivity and accuracy of the system (Watson et al.,1992; Hardie et al., 1998; Kraczek, 2017).

The second beam splitter employed in the LDV configuration combines the light beam and the test beam after the test beam passes through the Bragg cell and reflects off the target object and sends it to the photodetector. The photodetector detects the interferometric pattern between the light beam and the test beam reflecting back. This interferometric pattern changes depending on the velocity and vibration frequency of the target object, and the velocity and vibration frequency of the surface are computed using signal processing techniques. In this way, the LDV system measures surface vibrations and velocities of the target object with high precision and high accuracy in a non-contact method (Stanbridge et al., 1999; Choi et al., 2003; Stanbridge et al., 2004).

The schematic illustration of DFS is shown in Figure 2. For the object moving towards the LIDAR sensor, the frequency change due to Doppler shift is clearly shown in Figure 1. As obviously in this figure, a shift in Doppler frequency occurs as the object moves forward and backward. Consequently, the forward and backward movement of the object causes a change in the Doppler frequency, in other words, a DFS.

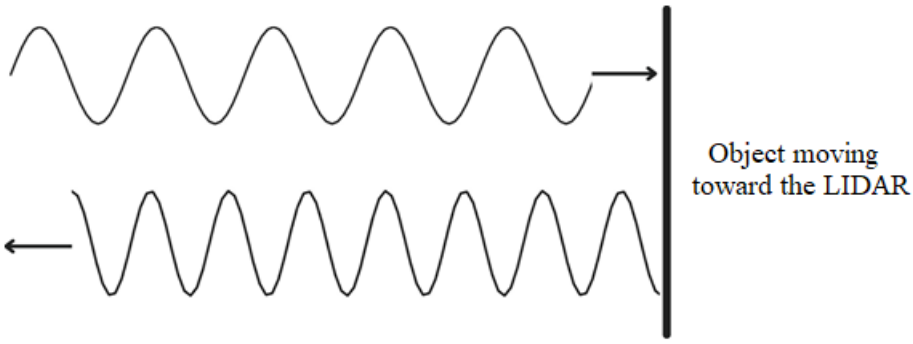


Figure 2. Schematic illustration of DFS (McManamon, 2015)

Numerous studies are reported in the literature addressing the basic principles and applications of laser vibration and the Doppler effect (Romaniuk & Gajda, 2012; Tabatabaiet al., 2013). However, studies on performance comparisons of laser systems at different wavelengths and the responses of these systems to different vibration frequencies are limited. Therefore, this research article focuses on the response of laser systems using different wavelengths to vibration frequency and their relationship with parameters such as DFS and sampling time. The article is a theoretical study and includes simulations performed at different vibration frequencies with a fixed vibration amplitude and the dependencies of these parameters. In this context, by using laser beams with wavelengths of 1064 nm and 1550 nm, changes in parameters such as maximum vibration velocity, DFS, and sampling time are observed. In other words, the study aims to determine to what extent the changing frequency depending on the constant vibration amplitude affects the maximum vibration velocity, Doppler shift and sampling time. The reason why 1064 nm and 1550 nm wavelength lasers are the focus of this study is that these wavelength lasers are widely used in LDV systems.

2. Material and method

The precise measurements of the Doppler effect and laser vibration are critical for understanding the dynamic behavior of materials and objects and for use in various industrial applications. The laser vibration is a widely used technique to properly detect vibration frequencies and amplitudes of material surfaces (Lutzmann et al., 2016). In addition, using the Doppler effect to determine the velocity of moving objects directly affects the performance and accuracy of laser systems in some cases (Chen et al., 2006).

LDV systems used in vibration measurements detect the response at only one point at a time. In these systems, the laser beam is directed at a point on the test structure and a measurement is taken over a time frame long enough to ensure that the impact response of the structure fades. The laser is then directed to a new point of

the structure and the process is repeated. In this manner, several measurements are made at each location to reduce noise effects (Allen & Sracic, 2010).

DFS refers to a change in frequency relative to a moving source or receiver. As the object moves, the frequency of the reflected light changes due to Doppler shift, and this change is used to measure the vibration velocity of the object.

In the LIDAR systems, when the pulse returns, its frequency will have shifted based on the Doppler shift of the return light. DFS is expressed as a function of velocity and wavelength of the laser source as given in equation (1) (Fukushima et al., 2009).

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \tag{1}$$

where Δf is the DFS, v is the velocity and λ is the wavelength of laser source.

As can be seen from equation (1), the higher the velocity towards or away from the sensor, the higher the frequency shift. Due to the fact that the two-way path, to the object and returned from the object of the light, the factor 2 is included in the equation. The relationship in (1) is often used to measure small reciprocating velocities resulting from vibrations. Therefore, the measured Doppler frequency helps determine the vibration velocity of the object.

DFS values of the moving object at various velocities for the wavelengths of 1064 nm and 1550 nm are given in Table 1.

Table 1. DFS at specific velocities for the wavelength of 1064 nm and 1550 nm

Velocity (µm/s)	DFS (1064 nm) (Hz)	DFS (1550 nm) (Hz)
1	1.88	1.29
10	18.80	12.90
100	187.97	129.03
1000	1879.70	1290.32

As can be seen from Table 1, the vibration velocity of an object and the DFS caused by vibration vary linearly. The relatively small changes in vibration velocity cause significant changes in the DFS. Using the LDV systems, the DFS caused by the difference in wavelength can be measured precisely even in a very small temporal period. From this perspective, LDV systems are considered as devices that provide high performance and accurate measurements.

As an object vibrates, velocities occur towards and away from the LIDAR systems. Equation (2) shows the position change due to vibration (McManamon, 2019).

$$x = Asin(2\pi ft) \tag{2}$$

In equation (2), *A* and *f* denote the vibration amplitude and the frequency, respectively.

The Doppler effect is used by devices such as LDV, allowing the vibration velocity of the objects to be measured. In this context, since the velocity is derived from dx/dt, it is obtained from the derivative of the surface position of a vibrating object as given in equation (3) (McManamon, 2019).

$$v = \frac{dx}{dt} = 2\pi fAcos(2\pi ft) \tag{3}$$

The sampling time is written as given in equation (4), depending on the Doppler frequency (McManamon, 2019)

$$T_S = \frac{2}{F_D} \tag{4}$$

where T_S is the sampling time and F_D is the Doppler frequency.

3. Simulations and findings

Simulations related to the effectes of maximum velocity, vibration frequency and vibration amplitude parameters on DFS have been carried out using Matlab. Equations (1), (3) and (4) have been used to obtain the simulations.

Figure 3 shows the relationship between velocity and DFS for lasers emitting at wavelengths of 1064 nm and 1550 nm. As seen in Figure 3, there is a linear relationship between velocity and DFS for both wavelengths.

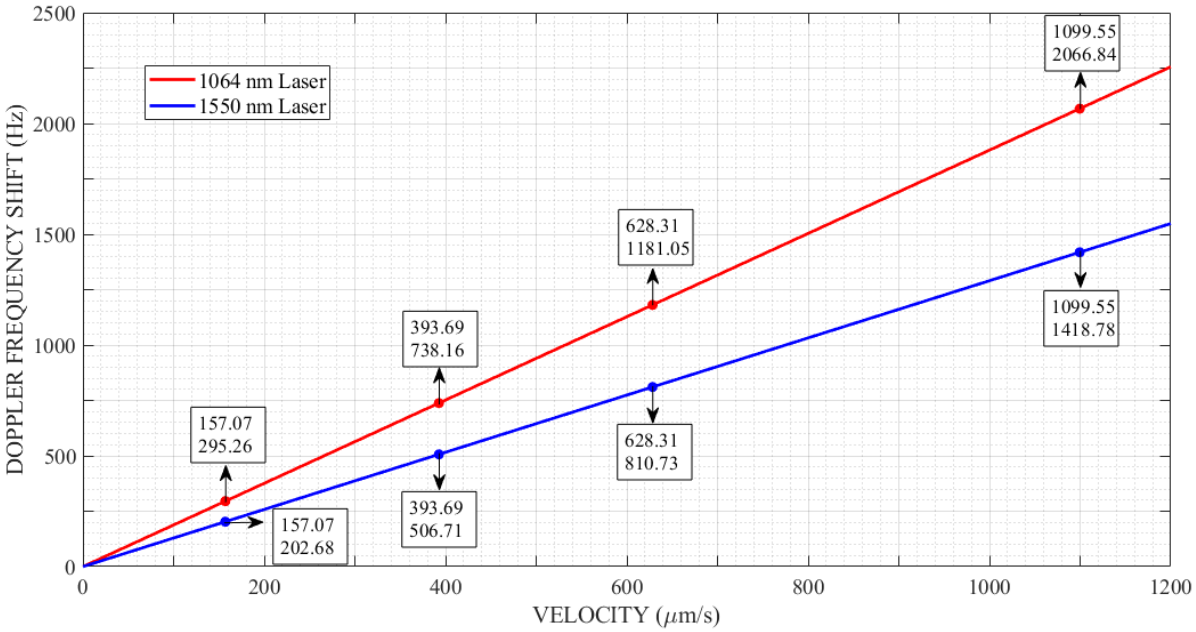


Figure 3. Varition of DFS with velocity for wavelengths of 1064 nm and 1550 nm

For the laser with a wavelength of 1064 nm, the object's velocity limits are between 0 and 1200 μm/s, while DFS is between 0 and 2255.64 Hz. DFS for the 1550 nm wavelength laser ranges from 0 to 1548.39 Hz for the same velocity limit values. Hence, the sensitivity to velocity change of DFS for laser systems operating at 1064 nm is higher than that of laser systems operating at 1550 nm. This is because both the photon energy and therefore the photon frequency at 1064 nm are greater than the photon energy and photon frequency at 1550 nm. In other words, a higher photon frequency causes a higher DFS per unit velocity change, thus higher sensitivity to velocity change.

As can be clearly seen from Figure 3, for a wavelength of 1064 nm, at a vibration frequency of 50 Hz, the maximum velocity, maximum DFS and sampling time have been found to be 157.07 μm/s, 295.26 Hz and 6.77 ms, respectively. When the vibration frequency has been increased to 200 Hz, the maximum velocity has increased to 628.31 μm/s, the maximum DFS has risen to 1181.05 Hz, while sampling time has decreased to 1.69 ms. The data obtained from this simulation show that as the vibration frequency increases, the maximum velocity and DFS increase linearly, whereas sampling time decreases logarithmically. This is considered to be an indication that high-frequency vibrations in laser systems require more precise sampling and vibration control is important.

For the 1550 nm wavelength laser, at 50 Hz vibration frequency, the maximum velocity, maximum DFS and the sampling time have been obtained as 157.07 μm/s, 202.68 Hz and 9.86 ms, respectively. As the vibration frequency has been increased to 200 Hz, the maximum velocity and the maximum DFS has reached to the values of 628.31 μm/s and 810.73 Hz, respectively. In this manner, the sampling time has risen to the value of 2.46 ms. Similar to the simulation performed at 1064 nm wavelength, the maximum velocity and DFS increase linearly with the increment of vibration frequency, while the sampling time decreases logarithmically.

Using the simulation data in Figure 3, mathematical formulas related to the relationships between velocity (v) and DFS (F_{DS}) for wavelengths of 1064 and 1550 nm are obtained as given in equations (5) and (6), respectively.

$$F_{DS} = 1.87970.v + 1.54637 \text{ x } 10^{-2} \quad (5)$$

$$F_{DS} = 1.29032.v + 9.56986 \text{ x } 10^{-3} \quad (6)$$

As can be seen from the equations, the DFS increases linearly as the velocity increases. The velocity change rate of DFS, i.e. sensitivity to velocity change is 1.88 Hz(µm/s)$^{-1}$ for 1064 nm and 1.29 Hz(µm/s)$^{-1}$ for 1550 nm, respectively. This conclusion confirms that the 1064 nm wavelength shows higher sensitivity to velocity changes and produces a larger DFS. This means that the sensitivity to velocity change of photons at 1064 nm is higher compared to the sensitivity to velocity change of photons at 1550 nm wavelength.

Simulation regarding the vibration frequency dependence of the Doppler frequency is shown in Figure 4. As obviously seen in Figure 4, DFS changes linearly with vibration frequency for both 1064 nm and 1550 nm.

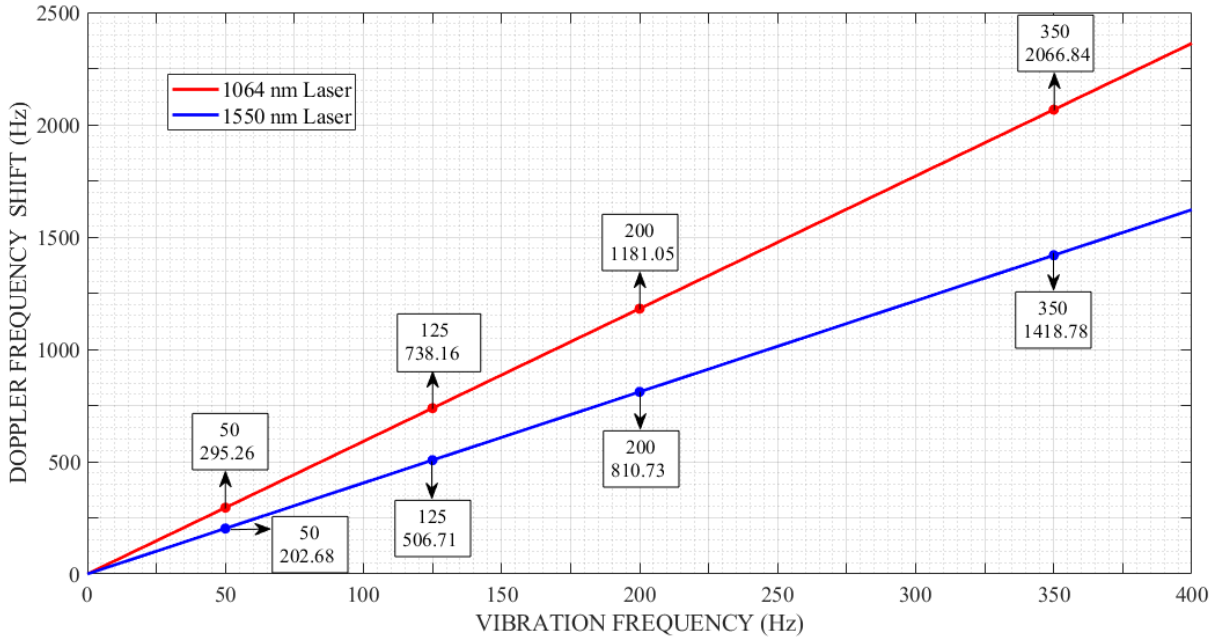


Figure 4. Varition of DFS with vibration frequency for wavelengths of 1064 nm and 1550 nm

It can be seen in Figure 4 that, while the vibration frequency varies between 0 and 400 Hz, the DFS varies between 0 and 2362.1 Hz at 1064 nm. For the laser used at a wavelength of 1550 nm, the DFS for the same vibration frequency limits is between 0 and 1621.47 Hz.

Applying the interpolation method to the simulation data obtained from Figure 4, equations expressing the relationships between vibration frequency (F_V) and DFS for 1064 nm and 1550 nm are stated as in equations (7) and (8), respectively.

$$F_{DS} = 5.90527.F_V - 3.33330 \text{ x } 10^{-3} \quad (7)$$

$$F_{DS} = 4.05364.F_V + 4.44440 \text{ x } 10^{-3} \quad (8)$$

The vibration frequency dependencies of DFS for both wavelengths are found to be 5.90 and 4.05, respectively. Therefore, the dependency value is larger for 1064 nm than for 1550 nm. This indicates that laser systems with a wavelength of 1064 nm provide more sensitive and faster responses than laser systems with a wavelength of 1550 nm.

The simulation of the variation of sampling time with DFS at wavelengths of 1064 nm and 1550 nm is shown in Figure 5. As can be seen in Figure 5, the sampling time decreases logarithmically as the DFS increases. For the 1064 nm wavelength laser, the DFS varies between 295.26 Hz and 2066.84 Hz, while the corresponding sampling times decrease from 6.77 ms to 0.96 ms. On the other hand, for the laser used at 1550 nm wavelength,

the DFS values have varied between 202.68 Hz – 1418.78 Hz, while the sampling time has taken values between 9.86 – 1.41 ms.

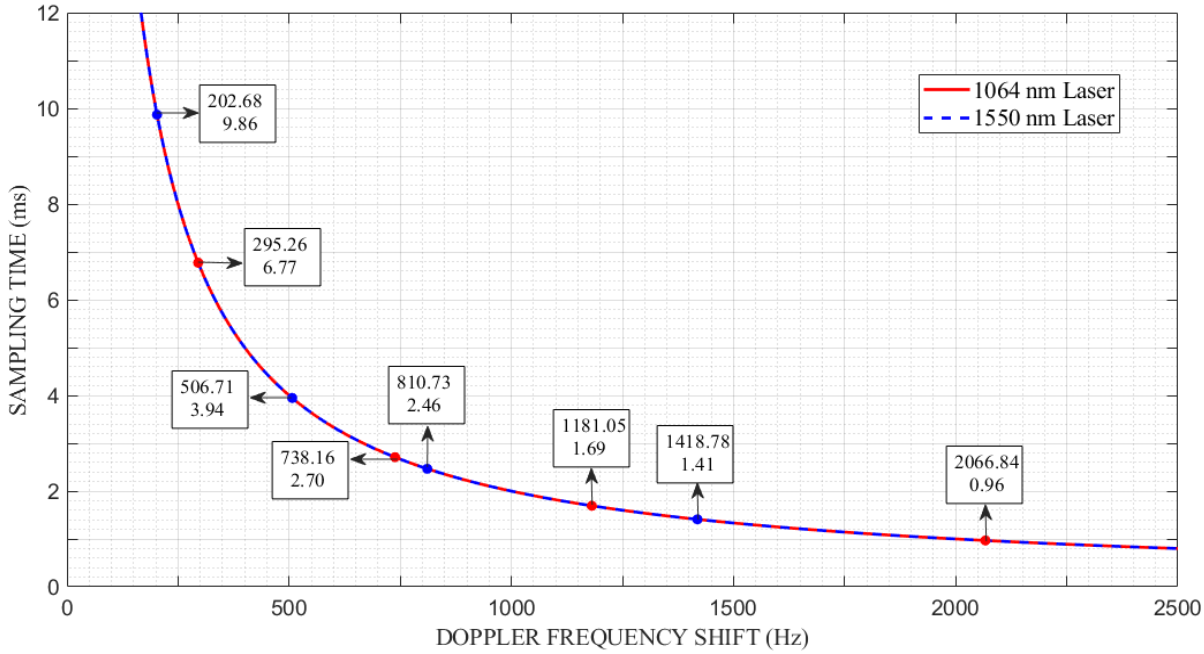


Figure 5. Varition of DFS with sampling time for wavelengths of 1064 nm and 1550 nm

Applying the curve fitting method to the data obtained in the simulation shown in Figure 5, the mathematical relations representing the relationship between DFS and sampling time (S_T) are obtained for 1064 nm and 1550 nm wavelengths as in equations (9) and (10), respectively.

$$S_T = 3.229\ x\ 10^{-6}.{F_{DS}}^2 - 0.01075.F_{DS} + 9.446 \quad (9)$$

$$S_T = 9.990\ x\ 10^{-6}.{F_{DS}}^2 - 0.02281.F_{DS} + 13.76 \quad (10)$$

As is obviously understood from the equations (9) and (10) there are quadratic relationship between DFS and sampling time. As DFS increases, sampling time decreases. The larger the sampling time, the shorter the response time of the system. Therefore, the smaller the sampling time, the faster the response time of the system. Therefore, knowing the sampling time is an important parameter for the evaluation of LVD systems. Therefore, the response time of the LDV system with 1064 nm wavelength is higher than that of the system with 1550 nm wavelength.

For wavelengths of 1064 nm and 1550 nm, vibration frequency, vibration amplitude, maximum velocity, maximum DFS and sampling time parameters are given in Table 2 and Table 3, respectively.

Table 2. DFS and corresponding parameters due to surface vibrations at 1064 nm

Vibration frequency (Hz)	Vibration amplitude (µm)	Maximum velocity (µm/s)	Maximum DFS (Hz)	Sampling time (ms)
50	0.5	157.07	295.26	6.77
125	0.5	393.69	738.16	2.70
200	0.5	628.31	1181.05	1.69
350	0.5	1099.55	2066.84	0.96

Table 3. DFS and corresponding parameters due to surface vibrations at 1550 nm

Vibration frequency (Hz)	Vibration amplitude (μm)	Maximum velocity (μm/s)	Maximum DFS (Hz)	Sampling time (ms)
50	0.5	157.07	202.68	9.86
125	0.5	393.69	506.71	3.94
200	0.5	628.31	810.73	2.46
350	0.5	1099.55	1418.78	1.41

4. Conclusion

In this study, the relationship between DFS, vibration frequency and maximum velocity in LDV systems is investigated. In this context, changes in performance parameters such as vibration frequency, vibration amplitude, maximum velocity, maximum DFS and sampling time for 1064 nm and 1550 nm radiation wavelengths have been analyzed through simulations performed in Matlab environment.

For the wavelength of 1064 nm, where the vibration frequency is 200 Hz, the maximum DFS has been found to be 1181.05 Hz at the sampling time of 1.69 ms. On the other hand, for 1550 nm, at the same value of the vibration frequency and the sampling time of 2.46 ms, the maximum DFS has been obtained as 810.73 Hz. According to the simulation results and findings, it has been concluded that the maximum velocity and DFS have increased linearly with the increase in vibration frequency, while the sampling time has decreased logarithmically. This reveals that high-frequency vibrations in laser systems require more precise sampling and jitter control is critical. This difference has shown that laser systems at 1064 nm wavelength have responded faster, but produced higher DFS.

On the other hand, laser systems, i.e. LDV systems at 1550 nm wavelength exhibit more stable performance because they offer lower DFS. In other words, lasers in LDV systems emitting at 1064 nm wavelength are more sensitive to velocity changes, whereas lasers emitting at 1550 nm wavelength provide a more stable measurement opportunity. As a result, the findings obtained in this research article can be considered to be of critical importance and value in terms of the design and optimization of these systems, as well as providing useful data in the precise measurement of the vibration frequency and vibration velocity of the target or object with LDV systems. In addition, it will be possible to design and optimize LDV systems in which the vibration velocity of object is measured more precisely and accurately, and to analyze the data theoretically.

Acknowledgment

This research article has been carried out within the scope of TAI Lift-up project numbered 64CCE8DB5C864 and named LIDAR Applications in Aerospace.

Author contribution

The contribution role of A. Günday includes conceptualization, data curation, checking simulations, methodology, investigation, project administration, supervision, validation, visualization, writing – original draft and writing – review & editing. The contribution role of T. Sipahi includes methodology, project administration, supervision process, review & editing and the contribution roles of A. Balabey, C. Utar, M. Demir, M.M. Yılmaz include investigation, theoretical analysis, simulation, data curation, methodology, and draft writing of the article.

Declaration of ethical code

The authors declare that this study does not require ethical committee approval or any legal permission.

Conflicts of interest

The authors declare no competing interests.

References

Adrian, R. J. (1993). *Selected papers on laser Doppler velocimetry*. II. Series. SPIE Optical Engineering Press.

Allahverdi K., Baykara T., Hüseyinoğlu F., Seçgin A. (2009). LiDAR. *Türkiye Bilim ve Teknik Dergisi*, 42(636), 72-75.

Allen, M. S., & Sracic, M. W. (2010). A new method for processing impact excited continuous-scan laser Doppler vibrometer measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing, 24*(3), 721-735. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.11.004

Blackmon, F. A., & Antonelli, L. T. (2006). Experimental detection and reception performance for uplink underwater acoustic communication using a remote, in-air, acousto-optic sensor. *IEEE Journal of Oceanic Engineering, 31*(1), 179-187. https://doi.org/10.1109/JOE.2005.861248

Boudet, L., van Wijk, K., Bitri, A., Abraham, O., Côte, P., Grandjean, G., & Leparoux, D. (2005). Surface-wave inversion limitation from Laser-Doppler physical modeling. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 10*(2), 151-162. https://doi.org/10.2113/jeeg10.2.151

Buchhave, P. (1975). Laser Doppler velocimeter with variable optical frequency shift. *Optics & Laser Technology, 7*(1), 11-16. https://doi.org/10.1016/0030-3992(75)90088-2

Campman, X. H., Wijk, V. K., Scales, J. A., & Herman, G. C. (2005). Imaging and suppressing near-receiver scattered surface waves. *Geophysics, 70*(2), V21-V29. https://doi.org/10.1190/1.1884831

Chen, V. C., Li, F., Ho, S.-S., & Wechsler, H. (2006). Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 42*(1), 2-21. https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1603402

Çelik H., Baş, N., & Coşkun, H. G. (2014). Taşkın Modelleme ve Risk Analizinde LiDAR Verisiyle Sayısal Yükseklik Modeli Üretimi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4*(1), 117.

Drain, L. E. (1980). *The laser Doppler technique*. London: John Wiley and Sons Inc., Chapter 9.

Fukushima, Y., Nishizawa, O., Sato, H., & Ohtake, M. (2003). Laboratory study on scattering characteristics of shear waves in rock samples. *Bulletin of the Seismological Society of* America 93(1), 253-263. https://doi.org/10.1785/0120020074

Fukushima, Y., Nishizawa, O., & Sato, H. (2009). A performance study of a laser Doppler vibrometer for measuring waveforms from piezoelectric transducers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 56*(7), 1442-1450. https://doi.org/10.1109/TUFFC.2009.1199

Halliwell, N. A. (1979). Laser-Doppler measurement of vibrating surfaces: a portable instrument. *Journal of Sound and Vibration, 62*(2), 312-315.

Hardie, R. C., Barnard, K. J., Bognar, J. G., Armstrong, E. E., & Watson, E. A. (1998). High-resolution image reconstruction from a sequence of rotated and translated frames and its application to an infrared imaging system. Optical Engineering, 37(1), 247-260. https://doi.org/10.1117/1.601623

Karaman, K. (2019). A Comparative Analysis of Slope Height Using Simple Methods. *Gümüşhane Üniversitesi Fen* Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9 (4), 600-609. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.541387

Kraczek, J. R. (2017). *Noniterative Multi-aperture and Multi-illuminator Phasing for High-Resolution Coherent Imaging*. [Ph.D. thesis, University of Dayton].

La, J., Choi, J., Wang, S., Kim, K., & Park, K. (2003). Continuous scanning laser Doppler vibrometer for mode shape analysis. *Optical Engineering, 42*(3), 730-737. https://doi.org/10.1117/1.1533794

Lei, X., & Nishizawa, O. (1998). Experimental study of fault trapped waves by using a laser Doppler vibrometer. Proceeding of the SEGJ International Symposium vol: 4, (pp. 185-190), Tokyo, Japan.

Lutzmann, P., Göhler, B., Hill, C. A., & Putten, V. F. (2016). Laser vibration sensing at Fraunhofer IOSB: review and applications. *Optical Engineering, 56*(3), 031215. https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.031215

Ma, Z., Zhang, C., Ou, P., Luo, G., & Zhang, Z. (2008). Application of fiber interferometer in coherent Doppler lidar. *Chinese Optics Letters, 6*(4), 261-263. https://opg.optica.org/col/abstract.cfm?URI=col-6-4-26

McManamon, P. (2015). *Field Guide to Lidar*. SPIE Press, Bellingham, Washington. https://doi.org/10.1117/3.2186106

McManamon, P. (2019). *LiDAR Technology and Systems*. SPIE Press, Bellingham, Washington. http://spie.org

Nishizawa, O., Satoh, T., Lei, X., & Kuwahara, Y. (1997). Laboratory studies of seismic wave propagation in inhomogeneous media using a laser Doppler vibrometer. *Bulletin of the Seismological Society of America, 87*(4), 809-823. https://doi.org/10.1785/BSSA0870040809

Nishizawa, O., Satoh, T., & Lei, X. (1998). Detection of shear wave in ultrasonic range by using a laser Doppler vibrometer. *Review of Scientific Instruments, 69*(6), 2572-2573. https://doi.org/10.1063/1.1148961

Oldengarm, J., Van Krieken, A. H., & Raterink, H. J. (1973). Laser Doppler velocimeter with optical frequency shifting. *Optics & Laser Technology, 5*(6), 249-252. https://doi.org/10.1016/0030-3992(73)90050-9

Romaniuk, R. S., & Gajda, J. (2012). *Laser technology 2012, Optical Fibers and Their Applications*, 8698, 86980P, Krasnobrod, Poland. https://doi.org/10.1117/12.2019118

Scales, J. A., & Wijk, V. K. (1999). Multiple scattering attenuation and anisotropy of ultrasonic surface waves. *Applied Physics Letters, 74*(25), 3899-3901. https://doi.org/10.1063/1.124217

Sivaji, C., Nishizawa, O., Kitagawa, G., & Fukushima, Y. (2002). A physical-model study of the statistics of seismic waveform fluctuations in random heterogeneous media. *Geophysical Journal International, 148*(3), 575-595. https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01606.x

Stanbridge, A. B., & Ewins, D. J. (1999). Modal testing using a scanning laser Doppler vibrometer. *Mechanical Systems and Signal PArocessing, 13*(2), 255-270. https://doi.org/10.1006/mssp.1998.1209

Stanbridge, A. B., Martarelli, M., & Ewins, D. J. (2004). Measuring area vibration mode shapes with a continuous-scan LDV. *Measurement, 35*(2), 181-189. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2003.07.005

Tabatabai, H., David, E., Oliver, D. E., Rohrbaugh, J. W., & Papadopoulos, C. (2013). Novel applications of laser Doppler vibration measurements to medical imaging. *Sensing and Imaging: An International Journal, 14*, 13-28. https://doi.org/10.1007/s11220-013-0077-1

Watson, E. A., Muse, R. A., & Blommel, F. P. (1992). Aliasing and blurring in microscanned imagery. *1992 Aerospace Sensing* (242-250), Orlando, USA. https://doi.org/10.1117/12.137955

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 407-431 doi: 10.17714/gumusfenbil.1585181 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Proje yönetiminde proje karmaşıklığı sorunsalına tematik inceleme: bir bibliyometrik analiz

Thematic study on the problem of project complexity in project management: a bibliometric analysis

Kaya Ali LEKESİZGÖZ*[1], Yasin ŞEHİTOĞLU[2]

[1]*Yıldız Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Yönetimi Programı, 34220, İstanbul*

[2]*Yıldız Teknik Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, 34349, İstanbul*

• Geliş tarihi / *Received*: 14.11.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 18.03.2025

Öz

Projelerin yönetimi ve projelerin geliştirilmesinde; karmaşıklık kavramı her zaman hissedilen ve küreselleşme, yeni teknolojiler, tedarik zincirleri ve daha birçok alandaki gelişmeyle birlikte sistematik ve asimetrik artış gösteren bir olgu olarak belirmektedir. Bu olgunun akademik çevredeki etkileri ise yeni bir inceleme alanı yaratmasıdır. Türkçe literatürde "proje karmaşıklığı" kavramına yönelik akademik çalışmaların sınırlı olduğu görülürken, yabancı literatürde bu alanda gerçekleştirilen araştırmaların kayda değer bir gelişme gösterdiği söylenebilir ve birçok çalışma, başarılı proje yönetimi için proje karmaşıklığının algılanmasının ve yönetilmesinin kritik öneme sahip olduğunu ileri sürmektedir. Bu çalışma, Web of Science veri tabanında proje karmaşıklığı literatüründeki mevcut durumu ve gelecekteki eğilimleri araştırmaktadır. Çalışmada veri tabanında elde edilen ve 1980-2024 dönemini kapsayan 1.210 İngilizce makale seçilmiştir. Proje Karmaşıklığı çalışmalarına yönelik Bibliyografik Eşleştirme ve Ortak Atıflara dayalı görsel ve bilimsel haritalama yöntemi ile anahtar kelimeler üzerinden sıklık, trend, kavramsal, tematik ve faktör analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda alandaki yayınların sıklığı, etkili yazarların/kurumların/çalışmaların neler olduğu ile araştırma konularının değişimi incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda; bibliyometrik analizler, proje karmaşıklığının kavramsal yönlerinin ve teorik arka planının görülmesine katkı sağlamış, tematik analizlerde ise popüler kavramlar, motor temalar, niş alanlar ve güncelliğini yitiren terimler irdelenerek proje karmaşıklığına ilişkin bir bakış açısı oluşturması noktasında, bu çalışmanın gelecekteki araştırmalara teorik yapıda temel teşkil etmesi hedeflenmiştir.

Anahtar kelimeler: Biblioshiny, Bibliyometrik analiz, Proje karmaşıklığı, Proje yönetimi, Vosviewer

Abstract

The concept of complexity in the management and development of projects appears as a phenomenon that is always felt and increases systematically and asymmetrically with the developments in globalization, new technologies, supply chains and many other fields. The effects of this phenomenon on the academic community are that it creates a new field of study. Academic research on the idea of "project complexity" in foreign literature is more developed than in Turkish literature, and several studies indicate that handling and perceiving project complexity is crucial to effective project management. This study investigates the current status and future trends in project complexity literature in the Web of Science database. 1.210 English-language articles spanning the years 1980–2024 were chosen for the study from the database. With the use of an illustration and analytical modeling method based on the linking of bibliography and references for project complexity studies, frequency, trend, conceptual, thematic, and factor analyses were conducted on keywords. The volume of publications in the field, prominent authors, institutes, and studies, as well as the shift in research themes, were all analyzed in the present setting. In line with the findings obtained, bibliometric and thematic analyses contributed to seeing the conceptual aspects and theoretical background of project complexity. By examining thematic analyses, it was aimed to reveal a theoreticaly typology regarding project complexity by determining popular concepts, motor themes, niche areas, and outdated terms to provide a basis for future research.

Keywords*: Biblioshiny, Bibliometric analysis, Project complexity, Project management, Vosviewer*

* Kaya Ali LEKESİZGÖZ; kayalekesizgoz@gmail.com

1. Giriş
1. Introduction

1980'ler ve 1990'larda ekonomik dinamiklerdeki değişimler, işletmelerin iş yapış şekillerini etkilemiştir (Guthrie vd., 2012). Bilgi temelli işletmeler, ekonomik ilişkilerde etkin rol alırken, geleneksel firmalar müşteri odaklı davranarak çeşitlenmiş ve proje firmaları öne çıkmıştır (Whittington vd., 1999). Yeni iş yapış şekillerinin bir başka türü olarak gelişmeye başlayan projeler; bir yandan geleneksel örgütlerin yapısal sorunlarını çözmek amacıyla değerlendirdikleri bir araç (Söderlund, 2004) olabilirken öte yandan da yenilikçi yaklaşımda değer yaratma mekanizmasında bilgi geliştirme ve inovasyon için temel yöntem olarak önem kazanmıştır (Shenhar & Dvir, 1996). Bu bağlamda firmalar değişken ve çeşitli müşteri taleplerine en uygun olacak ürünü en hızlı şekilde piyasaya sunabilmek için tüm süreci proje olarak yapılandırmaya başlamışlardır.

En genel haliyle proje; belirli başlangıç ve bitiş noktalarına sahip, belirli hedefleri tanımlanmış zaman çizelgesi, maliyet ve performans parametrelerini karşılamak için bir birey veya organizasyon tarafından üstlenilen benzersiz bir koordineli faaliyetler kümesi olarak tanımlanabilir (PMI, 2013). Projeler, belirli bir değişim gereksiniminin sonucunda ortaya çıktıklarından merkezinde mevcut sistemlerin/ürünlerin/hizmetlerin iyileştirilmesi, dönüştürülmesi ya da yenilikçi yaklaşımlarla yaratılması üzerine inşa edilmektedir. Bu bağlamda projelerin temel amacı; yeni bir ürün geliştirmek, süreçleri daha verimli hale getirmek ya da kalite standartlarını daha ileri bir seviyeye taşımak gibi yenilikleri içerdiğinden *değişimin yönetimi* şeklinde de değerlendirilebilir. Bu amaçların yerine getirilmesinde ise ihtiyaç duyulan bilgi, beceri, araç ve tekniklerin somut bir ürüne, hizmete veya teslimata dönüştürmek için gereken görevleri planlama, organize etme ve yürütme faaliyetlerinin bütünü ise proje yönetimi alanını oluşturmaktadır.

Proje yönetimi uzun süredir uygulamada bilinse de akademik açıdan yeni bir araştırma alanı olarak gelişmektedir. Teknik bir perspektiften mühendislik, mimarlık, inşaat ve bilgisayar bölümlerinde ele alınan proje yönetimi, son zamanlarda yönetimsel bir bakış açısıyla işletme okullarında da ilgi görmüştür (Bradley, 2010). Proje yönetimi literatürü, geleneksel olarak proje kapsamındaki üç temel amacı (Kalite, maliyet ve zaman) içeren demir üçgen ekseninde gelişmiştir. Bu konuların yanı sıra, proje yönetimi için neyin önemli olduğu ve nasıl yönetilmesi gerektiği konusunda da literatürdeki gelişmeler dikkat çekmektedir.

Projelerin başarıya ulaştırılmasında her gün önemli kaynaklar yatırılmasına karşın; düşük performans, bütçe aşımı, kapsam kayması, program gecikmeleri, hedeflerden sapma ve beklenmeyeni yönetme gibi engelleri mevcuttur ve bunun bir sonucu olarak projelere harcanan bütçenin yaklaşık %11'i kaybedilmektedir (PMI, 2020). Örneğin Almanya'daki Berlin Brandenburg Havalimanı'nın inşaatı 2011 yılında 2 milyar euroluk bütçe dâhilinde başlatılmış buna karşın inşası üzerinden beş yıl geçmesine rağmen açılamamış ve bu süreçte 6 milyar euroluk bir bütçe kullanılmıştır (Economist, 2017). 1960 yılından bu yana düzenlenen Olimpiyat Oyunlarına dönük projelerde ortalama %156 oranında maliyet aşımları yaşanmıştır. 2016 yılında Rio'da düzenlenen Yaz Oyunları'nda %51'lik, 2014 yılı Soçi'deki Kış Oyunları'nda ise %289'luk maliyet artışı ile projeler tamamlanabilmiştir (Flyvbjerg vd., 2016). Bunlar gibi değişik alan ve sektördeki daha birçok faktörden kaynaklanabilen ve proje karmaşıklığı şeklinde nitelendirilen kavram, projelerde gecikmelere ve maliyet aşımlarına karşı hassas olup, proje yönetimi başarısızlığının belirleyici özellikleri arasında görülmektedir (Davis, 2014; Turner & Zolin, 2012).

Karmaşıklık teorisinin proje yönetim alanında tanışmasına öncülük yapan çalışmalarda (Bennet & Fine, 1980; Bennet & Cropper, 1990; Bubshait & Selen, 1992; Gidaldo, 1993; Wonziak, 1993; Morris, 1994; Baccarini, 1996; Morris, 2002) karmaşıklığın projeler üzerindeki hedeflere, organizasyon yapısına ve gerekli yönetim becerilerine ilişkin;

- Projenin planlanması, koordinasyonu ve kontrolü,
- Projenin birincil amaç ve hedeflerin belirlenmesi,
- Proje için uygun organizasyon yapısının oluşturulması ve uygun düzeyde deneyime sahip proje ekibinin seçilmesi,
- Projenin maliyet, zaman, performans/kalite (Demir üçgen) ve güvenlik gibi konular üzerindeki etkisi vurgulanmıştır.

1950'li yıllarda proje yönetimindeki hakim paradigma olan tüm projelere uygun tek çözüm (one-size-fits-all) anlayışı, projelerin zaman içerisinde karmaşıklık seviyesindeki artıştan dolayı etkisini yitirmeye başlamış

bunun yerine daha koşullu durumu ifade eden amaca uygunluk (fit-for-purpose) anlayışına evirilmiş, bu nedenle proje karmaşıklığı kavramı akademisyenler ve uygulayıcılar tarafından artan bir ilgi görmüştür (Morris, 1994; Baccarini, 1996). Karmaşıklık, tüm sistemin dinamik özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkan belirsizlik ve beklenmeyen durumlardan dolayı projeleri olumsuz etkilemektedir. Bu bağlamda, proje çalışanlarının ve yöneticilerinin, karmaşıklığın olumsuz etkilerini azaltmak veya önlemek amacıyla karmaşıklığı tanıyıp bilmeleri ve bu olguyu yönetebilmesi gerekmektedir (Vidal & Marle, 2008).

Ülkemiz bağlamında ele alındığında, kavrama yönelik gerçekleştirilen akademik çalışmaların sayısının oldukça sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Ulusal Tez Merkezi, DergiPark ve Proje Yönetim Enstitüsü Türkiye (Project Management Institute-PMI) gibi akademik kuruluş ve platformlarda oldukça sınırlı sayıda çalışmanın dikkat çektiği görülmektedir. (*25.07.2024 tarihinde adı geçen araştırma platformlarında "Proje Karmaşıklığı (Project Complexity)" temasına yönelik [1] Yüksek Lisans çalışması ve [4] makale bulunmaktadır.*)

Bu çalışmada proje karmaşıklığı ile ilgili Web of Science veri tabanındaki yayınların incelenmiş ve alanda çalışma yapacak araştırmacılara bir ışık tutmak maksadıyla;

- Geçmişten bugüne proje karmaşıklığına ilişkin en etkili yayınlar hangileridir?
- Proje karmaşıklığı araştırmalarında en yaygın kullanılan anahtar kelimeler, bu alanda en çok referans edilmiş yazarlar, en aktif çalışma yürüten ülkeler ve kuruluşlar nelerdir?
- Proje karmaşıklığı çalışmaları ile ilgili en önemli dergiler hangileridir ve üretken yazarlar kimlerdir?
- Proje karmaşıklığı alanında çalışılan konular nelerdir?
- Proje karmaşıklığı çalışmalarında araştırma konularının değişimi nasıldır?
- Projesi karmaşıklığı çalışmalarına ilişkin yayınların gelecekteki eğilimleri nelerdir? sorularına cevap vermek için bibliyometrik veri analizlerinin kullanılması amaçlanmıştır.

2. Kavramsal çerçeve
2. Conceptual framework

2.1. Karmaşıklık ve proje yönetimi
2.1. Complexity and project management

"Karmaşıklık" terimi, bir varlığın veya olgunun davranışını anlama ve kontrol etmedeki zorluğu ifade etmektedir. Literatürde, karmaşıklığın, bir sistemin daha basit bileşenleri arasındaki doğrusal olmayan etkileşimlerden ve "ortaya çıkan" davranışından kaynaklandığı belirtilmektedir. (Johnson, 2010; Mitchell, 2009). Bu bağlamda karmaşık sistemlere; elektrik şebekesi veya internet gibi fiziksel sistemler; insan beyni veya bağışıklık sistemi gibi biyolojik sistemler; yağmur ormanı veya besin ağları gibi ekolojik sistemler, arkadaşlık ağları veya karınca kolonileri gibi sosyal sistemler (Bar-Yam, 2003; Simon, 1962) örnek gösterilebilir. Bu tür sistemlerdeki elektrik şebekesinin jeneratörleri, trafo merkezleri ve iletim hatları; beyindeki nöronlar, otonom hücreler ve sinapslar; bağışıklık sistemindeki çeşitli hormonlar ve antikor türleri, sosyal canlıların duygu, düşünce, davranış vb. yapılar ise söz konusu karmaşık sistemlerin bileşenlerine örnek gösterilebilir (North & Macal, 2007).

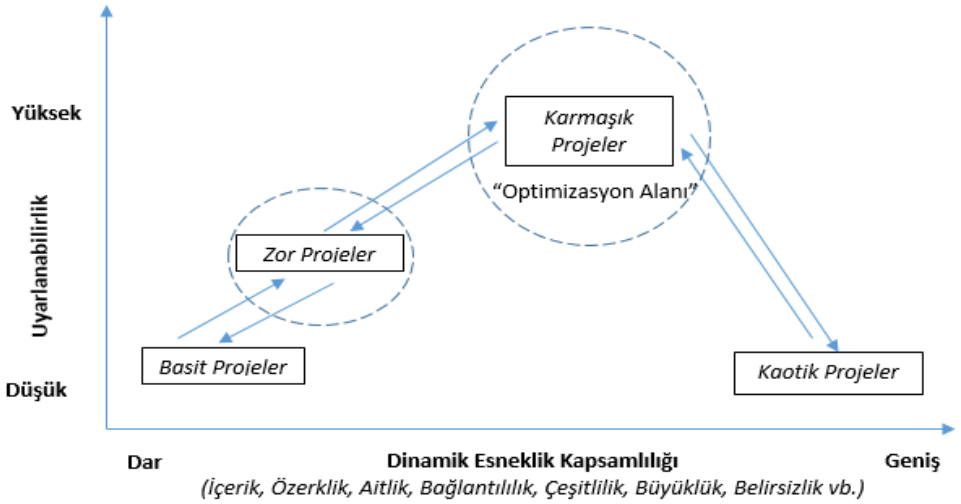
Projeler, istenen bir sonuca ulaşmayı amaçlayan çok sayıda çeşitli ve birbirine bağımlı etkinlikten oluşan benzersiz, tek seferli çabalar olarak kabul edilmektedir (Gido & Clements, 2012; Larson & Gray, 2014; Project Management Institute, 2013). Bu bakış açısıyla, proje anlayışında yürütülen girişimlerin çeşitli ve bağlantılı bileşenlerden oluşması, doğal bir "*karmaşıklık*" içerdiğini işaret etmektedir. Literatür, proje karmaşıklığının daha iyi anlaşılmasının, proje yöneticilerinin bu zorluklarla başa çıkmalarına yardımcı olabileceğini öne sürmektedir. Araştırmacılar, karmaşıklığın unsurlarını anlamanın, projelerin verimli sistemler tasarlamasına, uygun yönetim süreçleri seçmesine ve liderlik becerilerini geliştirmesine yardımcı olabileceğini savunmaktadır. (Antoniadis vd., 2011; Geraldi, 2009; Geraldi vd., 2011; Gransberg vd., 2013; Remington & Pollack, 2007; Vidal & Marle, 2008).

Ancak, proje karmaşıklığı ve unsurlarına dair mevcut anlayışta, yaygın olarak kabul görmüş bir çerçeve veya etkileriyle başa çıkma konusunda bir görüş birliği sağlanamamıştır. Bazı araştırmacılar, bunun nedeninin bilim insanlarının proje karmaşıklığı kavramını tanımlamak için çok sayıda olgu ve kavram kullanıp yeterli açıklama yapmamaları olduğunu belirtmektedir (Chapman, 2016; Padalkar & Gopinath, 2016). Karmaşıklığın ele

alınışında, boyutlar, temel unsurlar, yönler, türler, özellikler, faktörler ve itici güçler gibi çeşitli başlıklar örnek olarak gösterilebilir.

Proje yönetiminde; proje karmaşıklığının karakteristik yapısındaki unsurların neler olduğunun tam ve kesin belirlenememesinin bir başka nedeni ise üç temel farklı düşünce yapısının konuyu ele alış biçiminden kaynaklanmaktadır. Bir tarafta proje yönetiminin başını çeken otorite olarak Proje Yönetim Enstitüsünün (PMI) proje karmaşıklığına neden olan faktörleri ağırlıklı olarak yapısal karmaşıklık, belirsizlik ve sosyo-politik bağlamda tasnif etmesi (Geraldi vd., 2011), bir tarafta kendi başlarına heterojen ve bağımsız olarak çalışabilen, ortak bir hedef için bir araya getirilmiş büyük ölçekli entegre sistemleri inceleyen Sistemlerin Sistemleri (Jamshidi, 2008) görüşüne göre proje karmaşıklığını operasyonel, yönetsel ve coğrafik bağımlılıklar üzerinden analiz etmesi, diğer taraftan karmaşıklık teorisi çatısı altında bulunan eş-evrimsel teori (Benbya & McKelvey, 2006), örgüt teorisi (Cicmil & Marshall, 2005; Anderson, 1999), olasılık teorisi (Baccarini, 1996; Ireland, 1985; Keller, 1994; Levitt vd., 1999), kısıtlılıklar teorisi (Rand, 2000), sistem teorisi (Checkland, 1999), öz-örgütlenme teorisi (Aritua vd., 2009; DeRosa vd., 2008; Jaafari, 2003; Saynisch, 2010), kaos teorisi (Singh & Singh, 2002) ve ağ teorisi gibi çeşitli türev yaklaşımların proje karmaşıklığını projeye ait tek bir fonksiyon üzerinden incelemesi gelmektedir.

Proje karmaşıklığının analizine geçmeden önce projelere yönelik basit, zor, karmaşık ve kaotik şeklinde sıralanabilecek bir hiyerarşiden (Bakshi vd., 2016) bahsetmenin (Şekil 1), proje karmaşıklığı kavramını daha anlaşılır hale getireceği değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Projelerin tipolojisi.
Figure 1. *Typology of projects*

Bu bağlamda, basit projeler, neden-sonuç ilişkileri net olan ve ürün veya hizmetler yaratmak için üstlenilen sınırlı faaliyetler olarak tanımlanabilir. Basit projeler, bir projedeki her çalışanın gerekli bilgilere erişerek farklı durumlara uygun şekilde yanıt verebileceği, tüm işlemlerin kendiliğinden açık, öngörülebilir ve tekrarlanabilir olduğu, bir bakıma "bilinen" proje süreçleri olarak nitelendirilebilir. Basit projelere örnek olarak yiyecek hazırlama, küçük ev aletleri üretme veya birçok tip inşaat projesi gösterilebilir. Zor projelerde ise, görevler ve unsurlar arasında neden-sonuç ilişkileri bulunmaktadır. Zor projeleri yürütmek için bilgi ve uzmanlık gerekmektedir ve sorunların üstesinden gelebilmek için doğru uygulamalar ve yöntemler seçilmelidir (Snowden & Boone, 2007). Başka bir deyişle, zor projelerin alt kümeleri birçok farklı basit projelerden oluşmaktadır ancak bunlara indirgenemeyecek bir yapıdadır. Zor projeler bünyesinde sadece ölçek durumunu değil, ihtiyaç duyulan koordinasyon ve fonksiyonel yetkinlikleri de kapsamaktadır (Glouberman & Zimmerman, 2002). Roket yapımı, hava aracı (Uçak, helikopter, İnsansız Hava Aracı [İHA] vb.) üretmek ve ortak girişim büyük inşaat projeleri zor projelere örnek gösterilebilir ve sınırlı tekrara sahip olduklarından karmaşık olmaktan ziyade zor hale gelirler, çünkü bunların yönetimi öngörülebilir ve maliyet, zaman ve performans gibi çıktılar açısından doğrusal olmaya eğilim gösterir. Buna karşılık karmaşık projeler belirsizlik ve bilinmezlik, karşılıklı bağımlılık, doğrusal olmama, benzersizlik, özerklik, beklenmeyen ancak ortaya çıkan durumlar ve sınırların belli olmayışı gibi kavramlarla daha yakından ilişkilidir. Küresel çapta birçok ülkenin savunma sanayine yönelik proje faaliyetleri, sağlık sektöründeki iyileştirme çalışmaları, iletişim/teknoloji

uyduları ve nükleer enerjili denizaltılar karmaşık projelerin örnekleri olarak gösterilebilir. Snowden ve Boone'a (2007) göre, krizler ve felaketler gibi dönemlerdeki süreçler de kaotik projelere örnek gösterilebilir ve her zaman kolayca çözülemezler. Bu bakış açısıyla tüm projelerin değişen dinamik çevre koşullarında uyarlanabilirlik ve esneklik noktasında yüksek ya da düşük proje karmaşıklığına sahip olduğunu söylemek mümkündür.

2.1. Bibliyometrik veri analizi ve bilimsel haritalama
2.1. Bibliometric data analysis and scientific mapping

Bibliyometrik metodoloji, nicel tekniklerin (Örneğin atıf analizi) bibliyometrik veriler (Örneğin yayınlar) üzerinde uygulanmasını kapsamaktadır (Broadus, 1987; Pritchard, 1969). Bibliyometrik analizler, istatistiksel ve matematiksel yöntemler kullanarak verileri analiz eder ve araştırmacılara konuları yapılandırma imkanı sunar. Bu yöntem, yayınlar arasındaki ilişkileri göstererek bilim insanlarına alternatif çalışma yönleri keşfetmelerine yardımcı olur. Bibliyometrik yöntemlerde, görselleştirme ve haritalandırma için belirlenen eşik değerlerin farklılığı veya öznelerin seçimindeki farklılıklar, analiz sonuçlarını etkileyebilmektedir. Bu yöntemlerin amacı, analizlerin analizinden bir ağ çıkarmak olduğu için, araştırma konularının belirlenmesinde sabit standartlar yoktur. Literatürde genellikle 3, 5, 10, 15, 20, 30 gibi eşik değerler ile yazar-anahtar kelime-ülke veya özet- yıllar-atıf vb. seçimler kullanılmaktadır ve düşük eşik değerleri ve ağ ilişkisindeki özne sayısı, daha fazla bilgi ve daha karmaşık ağ yapılarının elde edilmesine yol açmaktadır.

Bu noktada araştırmaya esas bir bilimsel alanın bibliyometrik analizine yönelik uygun bir bilimsel haritalama tekniğinin seçimi de çok önemlidir (Aladayleh vd., 2023). Analizler için birçok yazılım mevcutken, en çok kullanılanlar arasında VOSviewer, Gephi, Bibliyometrix, Leximancer, Citespace, HistCite ve Sci2 yer almaktadır. Bu çalışmada VOSviewer ve Bibliyometrix (Biblioshiny) birlikte kullanılmıştır. Bu programlar, yazarlar, referanslar, anahtar kelimeler, dergiler, kuruluşlar ve ülkeler gibi veri kategorileri için iki boyutlu haritalar ve grafiksel gösterimler oluşturarak anlaşılır görseller sağlamaktadır.

"Visualization of Similarity" ifadesinin kısaltması olan VOSviewer, benzerlik ilişkilerinin görselleştirilmesini amaçlayan bir yazılımdır. Bu araç, 2010 yılında Leiden Üniversitesi (Hollanda)'nde görev yapan araştırmacılar Van Eck ve Waltman tarafından geliştirilmiştir. Bibliometrix paketi ise, SCOPUS, Clarivate Analytics'in Web of Science, PubMed, Digital Science Dimensions ve Cochrane gibi veri tabanlarından bibliyografik verileri içe aktarmak, bibliyometrik analiz yapmak ve eş atıf, eşleştirme, bilimsel iş birliği analizi ve eş kelime analizi için veri matrisleri oluşturmak için çeşitli rutinler sağlayan ve araştırmacılar Massimo Aria ve Corrado Cuccurullo tarafından geliştirilmiş grafiksel R dilinde yazılmış bir araçtır (Aria & Cuccurullo, 2017). Bu yöntem, Mühendislikler, İşletme, Kamu Yönetimi, Felsefe, Matematik, Çevre Bilimleri, Psikoloji, Hukuk ve Yöneylem Araştırması gibi birçok akademik disiplin ve alanda kullanılmıştır.

3. Yöntem
3. Method

3.1. Araştırma deseni
3.1. Research design

Bu çalışmada; yazar, yayın, anahtar kelimeler, ülke ve atıf sayısı gibi çeşitli kriterlere dayalı bir bibliyometrik analiz ve eşleştirme tekniği kullanılmıştır. Bibliyometrik analiz ve eşleştirmede; disiplinler, alanlar, belirli yayınlar ve yazarlar arasındaki bağlantıların görsel bir temsili oluşturulmaktadır (Donthu vd., 2021). Bu bağlamda; bibliyometrik çalışmalar, belirli bir alandaki araştırmanın bazı yönlerini ölçerek, değerlendirerek ve alandaki eğilimlerin tespit edilmesini sağlayarak (Ahmi, 2022) belirlenen bilimsel konu ile ilgili çalışmaları, araştırmacıları, kurumları ve bilimsel akış takibini mümkün kılmaktadır.

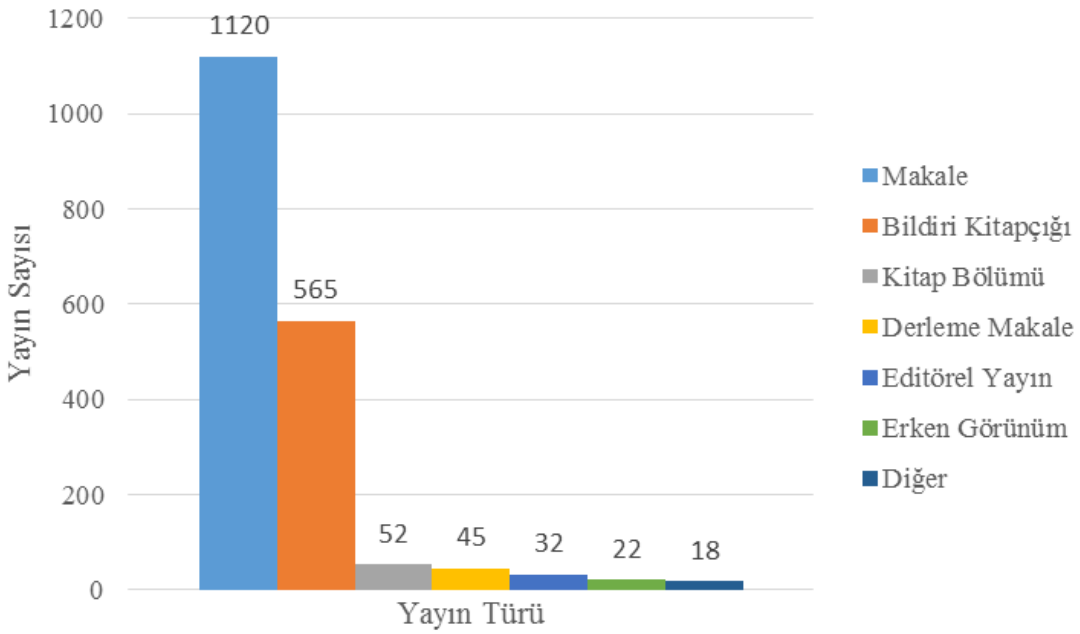
3.2. Verilerin toplanması ve analizi
3.2. Data collection and analysis

Web of Science (WoS), analitik dünyanın en eski, en yaygın kullanılan ve etkili araştırma yayınlarını kapsayan, çok çeşitli bilimsel çalışmaları destekleyen, atıf bağlantıları ve geliştirilmiş meta verileri içeren, seçici, yapılandırılmış ve özet bilgiler sağlayan bir altyapıya sahip olduğu için tercih edilmiştir. Veriler 02 Ağustos 2024'te Clarivate Analytics'in Web of Science (WoS) Çekirdek Koleksiyonu'ndan elde edilen verilerle

gerçekleştirilmiştir. İnceleme için "Yayın Adı: Proje Karmaşıklığı/Karmaşık Projeler (Project Complexity/Complex Projects)" ifadesi kullanılarak gelişmiş arama modülü aracılığıyla arama yapılmış, dil olarak İngilizce seçilmiş ve dizinler olarak SCI, SSCI, ESCI, CPCI-S, BKCI-S, CPCI-SSH, BKCI-SSH ve A&HCI belirlenmiştir. Elde edilen veriler, VOS Viewer ve Bibliyometrix paketindeki Biblioshiny programı kullanılarak bibliyometrik haritalama arayüzü ile analiz edilmiştir. Veri tabanında bulunan en eski tarih başlangıç noktası olarak alınmış ve 1980-2024 yılları arasındaki 44 yıllık dönem analiz edilmiştir.

4. Bulgular
4. Findings

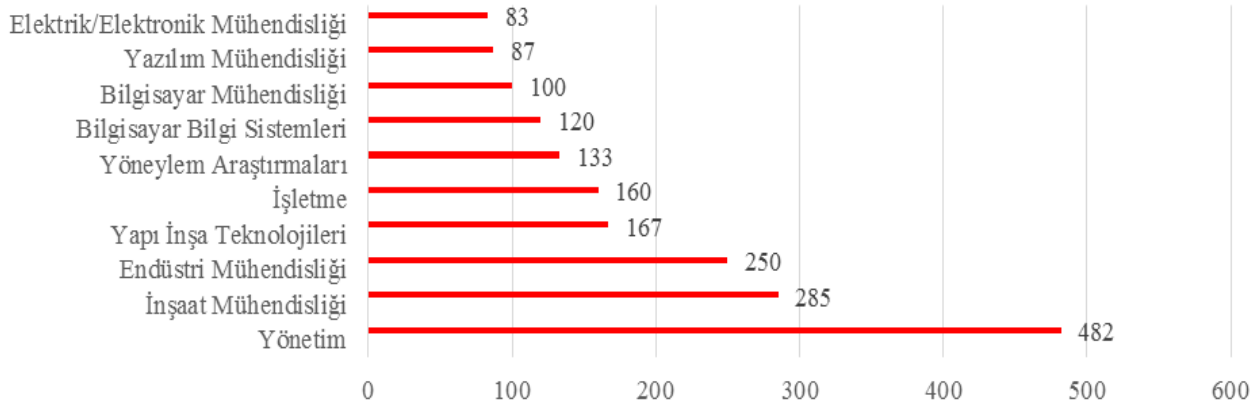
Bilimsel ağdan elde edilen toplam 1.854 yayının, 7 değişik gruba ayrıldığı görülmüştür. Her türün sayısal dağılımı ve göreceli karşılaştırmaları Şekil 2'de sunulmuştur. Makaleler ve bildiriler, bilimsel çalışmalarda daha belirgin bir şekilde öne çıkmış olup, bu grubun toplam çalışmalar içindeki oranı %91 olarak belirlenmiştir. Alıntı sayısı toplam 27,431 (Kendine yapılan atıflar hariç 24,412), alıntı sayısındaki ortalama 14,79 olup, H-indeksi 75'tir.



Şekil 2. Proje karmaşıklığı kavramının incelendiği yayın türleri
Figure 2. *Publication types examining the concept of project complexity*

4.1. Disiplinler açısından
4.1. In terms of disciplines

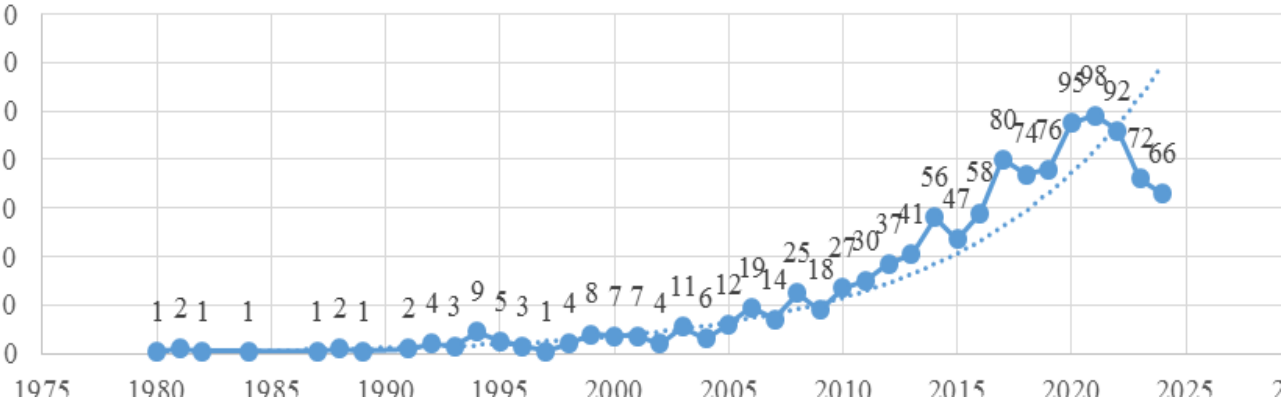
Proje karmaşıklığı kavramı, farklı disiplinler penceresinden incelendiğinde, birçok araştırma alanı açısından inceleme nesnesi yapıldığı görülmektedir. Gerekli kriterlerin girilerek ilgili veri tabanındaki 02 Ağustos 2024 tarihinde "Proje karmaşıklığı" anahtar kelimesiyle İngilizce olarak yapılan makale aramasında 1.120 kayıt bulunmuştur. Araştırma alanları incelendiğinde (ilk 10 kayıt), Proje Karmaşıklığı kavramının en yoğun olarak fen bilimleri altındaki Mühendislik ve Bilgisayar Bilimleri ile Teknolojik Sistemlerin alanlarını kapsayan disiplinler tarafından incelendiği görülse de Proje Yönetimi perspektifinden bakıldığında Yönetim ve İşletme alanlarında da dikkat çekici bir yaklaşımla ele alındığı göze çarpmaktadır (Şekil 3). Başka bir deyişle proje karmaşıklığı çalışmalarının mühendislik, bilgisayar ve bilgi teknoloji okullarındaki teknik bir bakış açısından (hard paradigm) işletme okullarındaki daha yönetimsel yaklaşıma (soft paradigm) geçişin işareti sayılabilir. Bu bağlamda, proje karmaşıklığı araştırma ağının gelişen dönemleri ve değişiminin daha fazla disiplinler arası tartışmaların odağında kalacağını söylemek mümkündür.



Şekil 3. Disiplinlere göre proje karmaşıklığı (Çalışmalar birçok disiplinin ilgi alanına girebilmektedir. Kaynak: WoS/Analiz)
Figure 3. *Project complexity by discipline (The research in question could be of relevance to more than one discipline. Source: WoS/Analys Result)*

4.2. Yıllar açısından
4.2. In terms of years

Yayın eğilimleri, belirli bir alandaki bilimsel faaliyetlerin metrik göstergelerle değerlendirilerek analiz edilmesinde önemli bir araç olarak görülebilir. Bu bağlamda, proje karmaşıklığına ilişkin yıllar içerisindeki değişim sıklığı Şekil 4'te sunulmuş olup, giderek artan bir eğilim olduğu görülmektedir. Bu durum, proje karmaşıklığı üzerine gerçekleştirilen bilimsel çalışmalara yönelik ilginin proje dünyasındaki gelişmelere paralele olarak, ilgili araştırma toplulukları tarafından artarak devam ettiğini göstermektedir.



Şekil 4. Makalelerin yıllara göre dağılımı
Figure 4. *Distribution of articles by year*

1980-2005 yılları arasındaki yayınlar incelendiğinde, bu dönemde bilimsel çalışmaların belirgin bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu artışın nedenlerinden biri, örgütlerin stratejilerini gerçekleştirmek için projeleri tercih etmeleridir. Böylece, proje yönetimi ve türevlerine olan ilginin bilimsel düzeyde artışı, proje karmaşıklığının incelenmesine olanak tanımıştır. Buna karşın, 2021'den itibaren azalan ilginin, COVID-19 pandemisi nedeniyle sokağa çıkma yasakları, evden çalışma, sosyal etkileşimin azalması ve temassız iletişimin yaygınlaşmasının genel üretkenliği olumsuz etkilemesinden dolayı gerçekleştiği değerlendirilmiştir. (Tablo 1).

Tablo 1. Artan yıllara göre makale sayıları ve atıf durumları (1980-2024) (Yoğunluktaki artış kırmızıdan yeşile değişim olacak şekilde temsil edilmiştir.)
Table 1. *Annual numbers and citation status of articles (1980-2024) (The color change from red to green on the columns represents the positive intensity increase in the parameter.)*

Yıllar	Yayın sayısı	Ağırlığı (%)	Kümülatif yayın sayısı	Kümülatif ağırlığı (%)	Toplam atıf	Yayın başına atıf ortalaması
1980	1	0.09	1	0.09	1	1.00
1981	2	0.18	3	0.27	3	1.50
1982	1	0.09	4	0.36	8	8.00
1984	1	0.09	5	0.45	15	15.00
1987	1	0.09	6	0.54	16	16.00
1988	2	0.18	8	0.71	14	7.00
1989	1	0.09	9	0.80	25	25.00
1991	2	0.18	11	0.98	24	12.00
1992	4	0.36	15	1.34	30	7.50
1993	3	0.27	18	1.61	20	6.67
1994	9	0.80	27	2.41	38	4.22
1995	5	0.45	32	2.86	39	7.80
1996	3	0.27	35	3.13	51	17.00
1997	1	0.09	36	3.21	46	46.00
1998	4	0.36	40	3.57	36	9.00
1999	8	0.71	48	4.29	44	5.50
2000	7	0.63	55	4.91	59	8.43
2001	7	0.63	62	5.54	63	9.00
2002	4	0.36	66	5.89	79	19.75
2003	11	0.98	77	6.88	84	7.64
2004	6	0.54	83	7.41	92	15.33
2005	12	1.07	95	8.48	147	12.25
2006	19	1.70	114	10.18	148	7.79
2007	14	1.25	128	11.43	173	12.36
2008	25	2.23	153	13.66	226	9.04
2009	18	1.61	171	15.27	262	14.56
2010	27	2.41	198	17.68	328	12.15
2011	30	2.68	228	20.36	365	12.17
2012	37	3.30	265	23.66	426	11.51
2013	41	3.66	306	27.32	536	13.07
2014	56	5.00	362	32.32	662	11.82
2015	47	4.20	409	36.52	757	16.11
2016	58	5.18	467	41.70	1.101	18.98
2017	80	7.14	547	48.84	1.334	16.68
2018	74	6.61	621	55.45	1.486	20.08
2019	76	6.79	697	62.23	1.937	25.49
2020	95	8.48	792	70.71	2.472	26.02
2021	98	8.75	890	79.46	3.017	30.79
2022	92	8.21	982	87.68	3.427	37.25
2023	72	6.43	1.054	94.11	2.977	41.35
2024	66	5.89	1.120	100.00	2.010	30.45

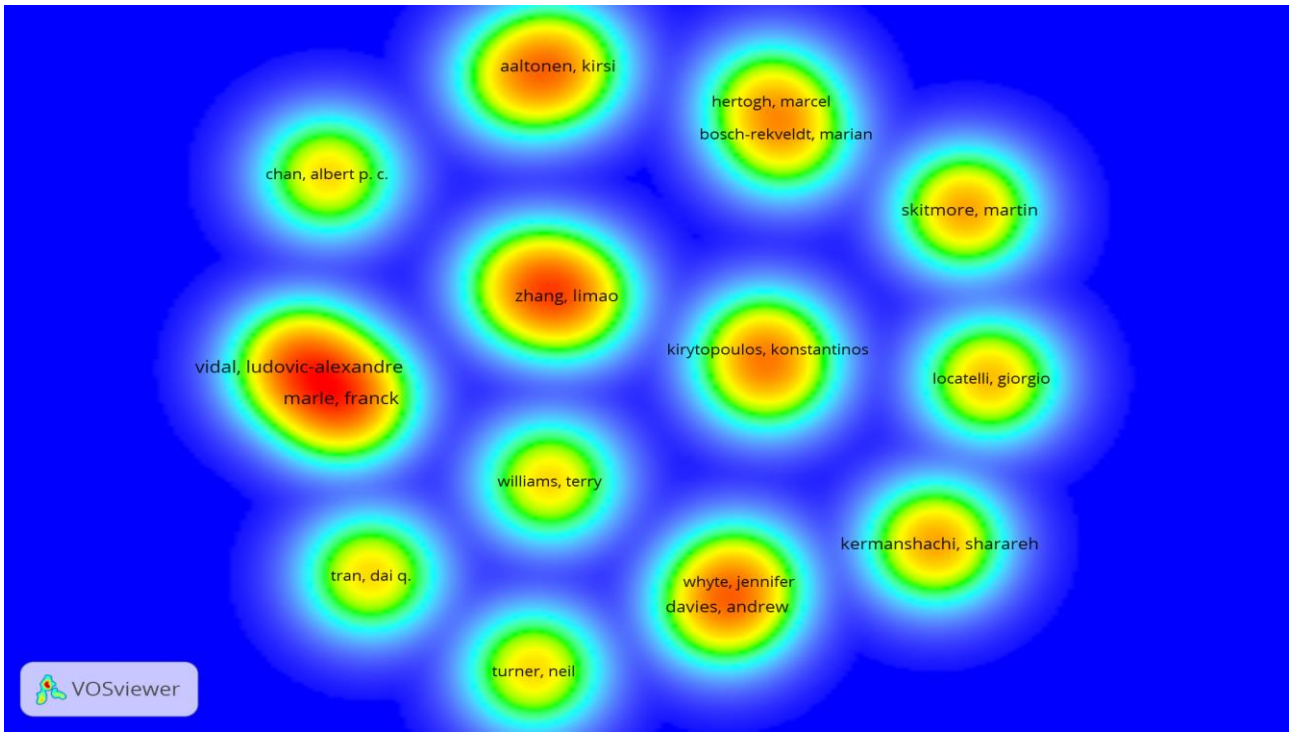
4.3. Öne çıkan yazarlar ve işbirlikleri
4.3. Leading authors and collaborations

Bilimsel araştırmalarda yayın yapma baskıları, yazı değerlendirme süreçlerinin uzaması, belirsiz geri bildirimler, sınırlı uzmanlık ve kaynaklara sahip araştırmacılar için önemli engeller oluşturmaktadır. (Bordons vd., 2015). Bu tür engelleri aşmak maksadıyla araştırmacılar, bilimsel işbirliği yaparak ortak bir hedef etrafında birleşmeyi, iş yükünü azaltarak paylaşımı ve verimliliklerini artırmayı hedeflemektedir.

2000'li yılların başından itibaren iletişim ve bilgi teknolojileri araçlarının çeşitlenmesi, bilim insanları arasında işbirliklerini yaygınlaştırmış ve veri tabanlarına erişimin kolaylaşması ortak yazarlık oranını artırmıştır. Bu bağlamda, Ortak yazarlık, "Akademik bir çalışmanın ortaya çıkarılabilmesi noktasında birden fazla araştırmacının görev paylaşımındaki etkileşim bütünlüğü" (Tuçay & Sürgevil, 2017) veya araştırmacıların uzmanlıklarını birleştirerek entelektüel iş birliği ve bilgi paylaşımı süreci olarak tanımlanabilir.

Yazarlar, Proje Karmaşıklığı alanında enformasyon üssünün ortasında yer almaktadır. Bilim insanlarının üretkenlik ve ortak çalışma analizi, bu alandaki öncül durumdaki araştırmacıların proje karmaşıklığı üzerine kurdukları sosyal ağları ortaya koyabilir. Tüm yazarlar arasındaki işbirliği ilişkileri Şekil 5'te sunulmuş olup, en az beş (5) yayına sahip olan yazarlar, proje karmaşıklığı çalışmalarında önde gelen yazarlar olarak kabul edilmiştir.

2.977 yazar arasında yalnızca 19'unun belirlenen eşik değerlerini karşıladığı tespit edilmiştir. Bu 19 yazar için, diğer yazarlarla olan atıf bağlantılarının toplam gücü hesaplanmıştır. Görsel analiz sonucunda, yazarlar arasındaki işbirliği dağılımının genel olarak bağımsızlık gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu durum, inceleme alanının multidisipliner yapısından kaynaklandığını ortaya koymaktadır ve proje karmaşıklığının genel bir tanımının yapılamamasındaki neden olarak görülebilir. Yoğunluk haritası, yüksek işbirliği sergileyen yazarlar arasındaki ilişkilerin yoğunluğunu ortaya koymaktadır. Haritada, bu yazarların merkeze yakınlıkları ve daire büyüklükleri, aralarındaki daha güçlü bir etkileşimin varlığını göstermektedir.



Şekil 5. Öne çıkan araştırmacıların ortak yazarlılığına ilişkin ağ ve yoğunluk haritası
Figure 5. *Network and density visualization of collaborations of leading authors*

Şekil 5'te yeşil alanlar düşük bağlantı gücünü, kırmızı alanlar ise yüksek bağlantı gücünü temsil etmektedir. Bu bağlamda alanlar arasında atıf, yayın sayısı ve bağlantı gücü yüksek olan, en çok yayına sahip ve yüksek bağlantı gücüne sahip yazarlar olarak Frank Marle, Alexandra–Ludovic Vidal, Limao Zhang, Kirsi Aaltonen, Andrew Davies ve Sharareh Kermanshachi öne çıkmaktadır. Diğer taraftan, Marian Bosch-Rekveldt ve Marcel

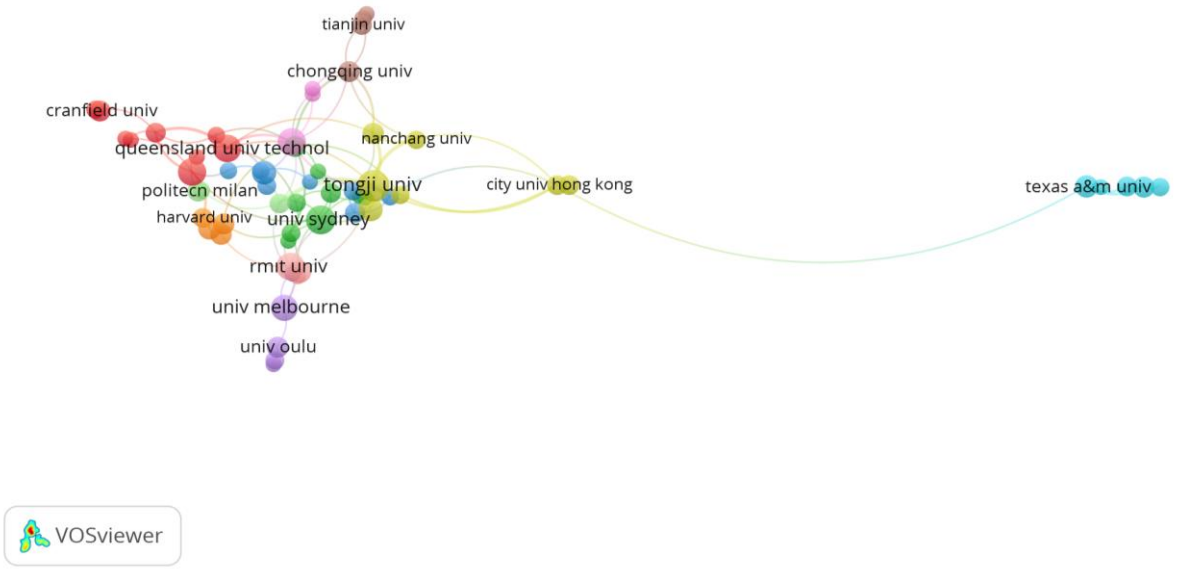
Hertogh gibi yazarlar, daha az yayın üretmelerine rağmen yüksek bağlantı gücüne sahip yazarlar arasında yer almaktadır. Franck Marle ve Alexandre-Ludovic Vidal'in bağlantı gücü açısından bariz şekilde yüksek olması, bu yazarların diğer araştırmacıları destekleyen ve onlarla güçlü ilişkiler kuran kişiler olduğunu göstermektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Yazarlara ilişkin metrik veriler
Table 2. *Metric data for authors*

No	Yazar	Yayın sayısı	Atıf sayısı	Bağlantı gücü
1	Franck Marle	12	810	10
2	Alexandre-Ludovic Vidal	11	766	10
3	Limao Zhang	8	146	3
4	Kirsi Aaltonen	7	179	3
5	Andrew Davies	7	524	2
6	Sharareh Kermanshachi	7	159	0
7	lan Luo	7	388	3
8	Martin Skitmore	7	211	0
9	Giorgio Locatelli	6	41	0
10	Marian Bosch-rekveldt	5	309	4
11	Albert P.C. Chan	5	208	0
12	Harri Haapasalo	5	67	3
13	Marcel Hertogh	5	43	4
14	Konstantinos Kirytopoulos	5	234	1
15	Abroon Qazi	5	218	1
16	Dai Q. Tran	5	91	0
17	Neil Turner	5	197	0
18	Jennifer Whyte	5	175	2
19	Terry Williams	5	227	0
	TOPLAM	122	4.993	46

4.4. Öne çıkan kurumlar ve işbirlikleri
4.4. Leading institutions and collaborations

Çalışmanın belirlenen zaman dilimine ait (1980-2024) Kurum İşbirliği Ağı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Proje karmaşıklığına ilişkin makalelerinin kurum işbirlikleri ağ haritası
Figure 6. *Network map of institutional collaborations of project complexity articles*

Ağdaki düğüm boyutlarının büyüklük/küçüklük durumu kurumların yayın sayıları arasındaki lineer ilişkinin sonucunu yansıtmaktadır. Başka bir deyişle düğümün büyüklüğü kurumun yayın sayısı ile sembolize edilmektedir. İki düğüm arasındaki bağlantıların kalınlığı ise kurumlar arasındaki işbirliğinin gücünü göstermektedir. En az 5 yayına sahip olan kurumlar, proje karmaşıklığı alanında önde gelen kuruluşlar olarak kabul edilmiş ve 1.311 kurum arasından 60'ı bu kriteri karşılamıştır.

Tablo 3 incelendiğinde Tongji Üniversitesi (Çin), 19 yayın ile en fazla çalışmaya sahip üniversite olarak öne çıkarken, Queensland University of Technology (Avusutralya), 910 atıf ile en fazla atıf alan ve 60,67'lik yayın başına en yüksek ortalama atıf verisiyle alandaki çalışmalarda önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, eşik değerlerini aşan kurumların coğrafi dağılımı incelendiğinde, Çin ve Avusturalya'nın konu hakkında araştırma yapan kurum ülkesi olarak dikkatleri çekmektedir (238 yayın içerisinde 109 yayın [%47]). İlave olarak, yayın sayılarına oranla yayın başına düşen atıf ortalaması üzerinden değerlendirildiğinde, University College London (İngiltere), Cranfield University (İngiltere), University of Strathclyde (İskoçya) ve Delft University of Technology (Almanya)'nin alana yönelik nitelikli çalışmalar ürettiği görülmektedir. Bu üniversitelerde gerçekleştirilen araştırmaların yakından takip edilmesinin, gelecekte bu alanda çalışma yapmayı planlayan araştırmacılar için önemli bir rehber niteliği taşıyacağı düşünülmektedir.

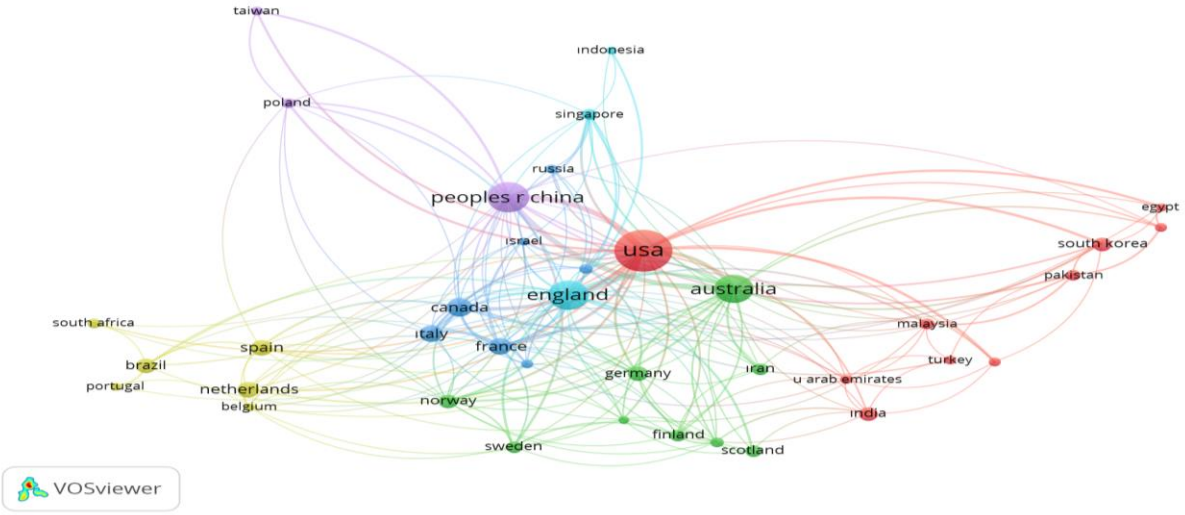
Tablo 3. Öne çıkan kurumlara ait metrik göstergeler (İlk 20 kurum)
Table 3*. Metric indicators of prominent institutions (Top 20 institutions)*

S.Nu	Üniversite/Kuruluş	Ülke	Yayın toplamı	Toplam atıf	Yayın başına atıf	Toplam bağlantı gücü
1	Tongji University	Çin	19	720	37.89	21
2	The University of Sydney	Avusturalya	16	467	29.19	8
3	Queensland University of Technology	Avusturalya	15	910	60.67	11
4	Hong Kong Polytechnic University	Çin	14	435	31.07	9
5	RMIT University	Avusturalya	14	292	20.86	6
6	University College London	İngiltere	14	763	54.50	9
7	The University of Melbourne	Avusturalya	13	128	9.85	4
8	Delft University of Technology	Almanya	11	362	32.91	3
9	University of Colorado	A.B.D.	11	143	13.00	6
10	University of Strathclyde	İskoçya	11	405	36.82	0
11	Norwegian University of Science and Technology	Norveç	10	264	26.40	4
12	Texas A&M University	Amerika	10	305	30.50	7
13	University of Manchester	İngiltere	10	286	28.60	3
14	Chongqing University	Çin	9	130	14.44	9
15	Cranfield University	İngiltere	9	379	42.11	2
16	Curtin University	Avusturalya	9	157	17.44	8
17	Nanyang Technological University	Singapur	9	289	32.11	10
18	National University of Singapore	Singapur	9	180	20.00	6
19	Polytechnic University of Milan	İtalya	9	66	7.33	1
20	Purdue University	A.B.D.	9	201	22.33	5

4.5. Öne çıkan ülkeler ve işbirlikleri
4.5. Leading countries and collaborations

Proje Karmaşıklığı kavramına yönelik ülkeler arasındaki işbirliğini analiz etmek amacıyla yayın sayısı en az 10 olacak şekilde eşik değerler belirlenmiş, bu bağlamda asgari yayına sahip olan ülkeler öne çıkanlar olarak

kabul edilmiştir. 84 ülke arasından 38'i bu eşik değeri karşılamış olup (Şekil 7), düğüm noktalarının büyüklüğü yayın sayısıyla, düğüm bağlantılarının kalınlığı ise iki ülke arasındaki işbirliğinin yoğunluğuyla doğru orantılıdır.



Şekil 7. Ülkelerin iş birliklerine yönelik ağ görselleştirmesi
Figure 7. *Network visualization of countries' collaborations*

Tablo 4'te yer alan toplam bağlantı gücü, ülkelerin diğer ülkelerle işbirliği düzeylerini göstermekte olup, ABD, Çin, İngiltere, Avusturalya, Kanada ve Fransa gibi ülkeler, yüksek yayın sayılarına sahip olmalarının yanı sıra, yoğun işbirliği içinde bulundukları diğer ülkelerle karşılıklı olarak bilgi alışverişi ve akademik etkileşim içerisinde olduklarını ortaya koymaktadır.

Tablo 4. Öne çıkan kurumlara ait metrik göstergeler
Table 4*. Metric indicators of prominent institutions*

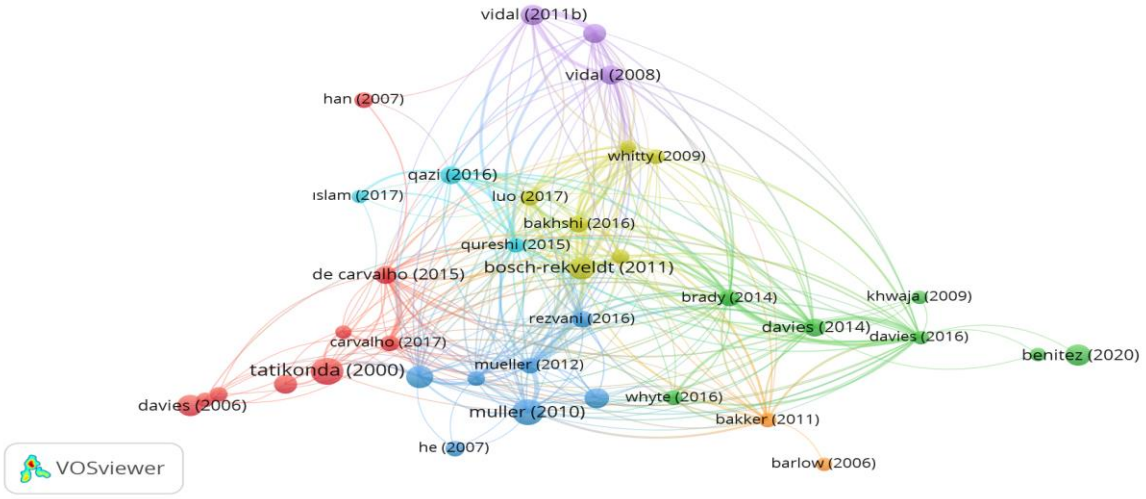
No	Ülke	Toplam yayın	Toplam atıf	Bağlantı gücü toplamı	No	Ülke	Toplam yayın	Toplam atıf	Bağlantı gücü toplamı
1	A.B.D.	265	7690	141	**20**	Malezya	18	263	13
2	Çin	141	2405	87	**21**	Pakistan	18	214	14
3	İngiltere	133	3605	86	**22**	Güney Afrika	17	60	5
4	Avusturalya	126	3319	89	**23**	Danimarka	16	268	17
5	Kanada	52	1368	45	**24**	Polonya	15	212	18
6	Fransa	43	2239	47	**25**	İsviçre	15	171	18
7	İtalya	42	497	29	**26**	Türkiye	14	274	6
8	İspanya	39	385	17	**27**	Vietnam	13	236	11
9	Hollanda	37	1186	16	**28**	Rusya	12	89	9
10	Almanya	34	618	19	**29**	Suudi Arabistan	12	60	10
11	Brezilya	33	921	14	**30**	Tayvan	12	298	11
12	Hindistan	29	324	11	**31**	BAE	12	91	10
13	Norveç	28	783	29	**32**	İrlanda	12	265	12
14	Güney Kore	28	920	17	**33**	Yeni Zelanda	11	106	16
15	Finlandiya	23	429	15	**34**	Portekiz	11	172	5

Tablo 4. Devamı
Table 4. *Contiuning*

No	Ülke	Toplam yayın	Toplam atıf	Bağlantı gücü toplamı	No	Ülke	Toplam yayın	Toplam atıf	Bağlantı gücü toplamı
16	İsveç	23	908	18	**35**	İsrail	11	324	14
17	İran	22	326	10	**36**	Belçika	10	130	14
18	İskoçya	21	726	10	**37**	Mısır	10	79	10
19	Singapur	19	469	24	**38**	Endonezya	10	125	5

4.6. Atıf verilerine göre yayınlar
4.6. Publications according to citation data

Akademik disiplin içerisinde yapılmış çalışmaların belirli çevrelerde veya araştırma gruplarınca referans olarak kullanılması ilgili çalışmaların ne kadar etkili olduğunu veya başvuru olarak kullanıldığının göstergesi sayılabilir. Bu bağlamda, belirli bir atıf eşiğini aşan yayın sayısının, o alandaki etkili çalışmaların tespit edilmesine olanak sağladığı söylenebilir. Bu bölümde, proje karmaşıklığı ile ilgili en az 100 kere referans edilmiş veya atıf almış yayınlar, etkili çalışmalar kapsamında değerlendirilmiştir (Şekil 8). 1.120 yayın arasından 37'si bu eşik değeri karşılamıştır.



Şekil 8. Proje karmaşıklığı çalışmalarına ait yayınların atıf durumunun ağ görselleştirmesi
Figure 8. *Network visualization of citation status of publications of project complexity articles*

Çalışmaların etkililik durumunu gösteren ilk 15 yayın Tablo 5'te sıralanmış olup, M.V. Tatikonda ile S.R. Rosenthal (386 atıf), müteakiben Ralf Muller ile Rodney Turner (358 atıf) ve Pedro Serrador ile Jeffrey K. Pinto'ya ait çalışmalar öne çıkmaktadır. Söz konusu yayınların içeriğindeki ortak özellikler incelendiğinde genel hatları teorik bazlı araştırmaların gömülü kuram esasında nitel analiz teknikleri ile yazılmış olduğu buna karşın proje karmaşıklığının ölçümlenebilmesi noktasında Analitik Hiyararşi Prosesi, Yapısal Eşitlik Modeli, vb. daha nicel teknikleri içeren çalışmalar dikkat çekmektedir.

Tablo 5. Proje karmaşıklığına ilişkin en etkili 15 çalışma (En düşük atıf sayısı: 100)
Table 5*. Top 15 most influential studies on project complexity (Minimum number of citations: 100)*

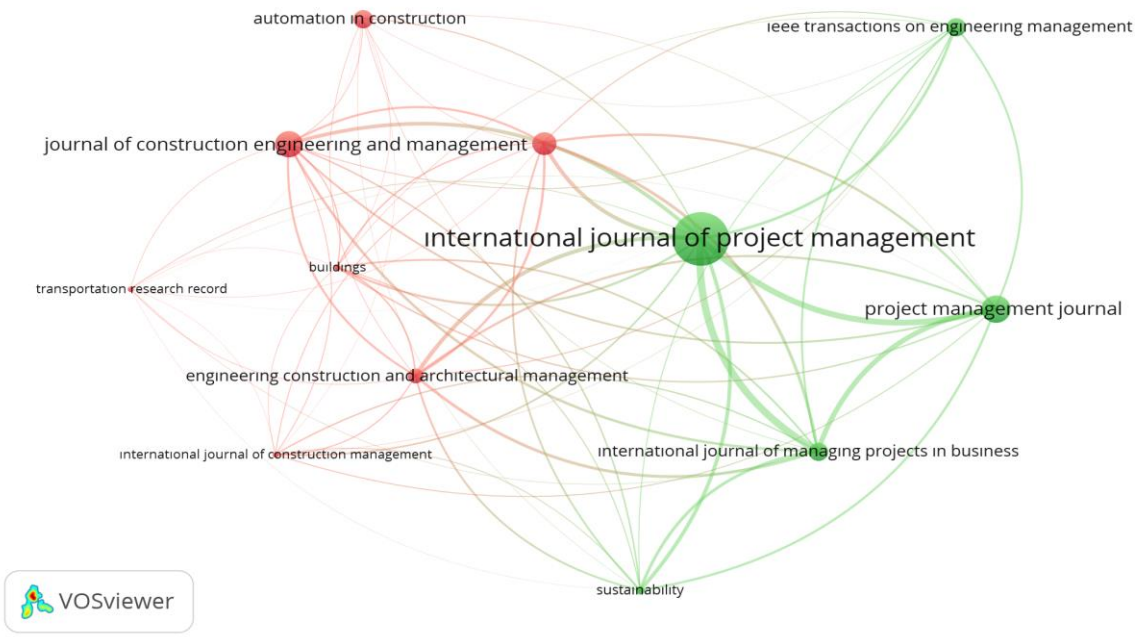
S.No	Başlık	Yazar(lar)	Kaynak	Yayın Yılı	Atıf Sayısı
1	Technology novelty, project complexity, and product development project execution success: a deeper look at task uncertainty in product innovation	M.V. Tatikonda S.R. Rosenthal	IEEE Transactions on Engineering Management	2000	386

Tablo 5. Devamı
Table 5. *Contiuning*

2	Leadership competency profiles of successful project managers	Ralf Muller, Rodney Turner	International Journal of Project Management	2010	358
3	Does agile work? A quantitative analysis of agile project success	Pedro Serrador Jeffrey K. Pinto	International Journal of Project Management	2015	287
4	Grasping project complexity in large engineering projects: The TOE (Technical, Organizational and Environmental) framework	M Bosch-Rekveldt Y Jongkind H Mooi	International Journal of Project Management	2011	279
5	The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance	Lucas Santos et al.	International Journal of Production Economics	2020	247
6	How do practitioners use conceptual modelling in practice?	Islay Davies et al.	Data and Knowledge Engineering	2006	241
7	Using a delphi process and the analytic hierarchy process (AHP) to evaluate the complexity of projects	Ludovic-Alexandre Vidal Franck Marle	Expert systems with applications	2011	230
8	Forecasting success on large projects: Developing reliable scales to predict multiple perspectives by multiple stakeholders over multiple time frames	Rodney Turner Roxanne Zolin	Project Management Journal	2012	224
9	The effect of reward structures on the performance of cross-functional product development teams	Shikhar Sarin Vijay Mahajan	Journal of Marketing	2001	205
10	Understanding project complexity: implications on project management	Ludovic-Alexandre Vidal Franck Marle	Kybernetes	2008	200
11	Measuring project complexity using the analytic hierarchy process	Ludovic-Alexandre Vidal Franck Marle	International Journal of Project Management	2011	193
12	Project complexity and risk management (ProCRiM): Towards modelling project complexity driven risk paths in construction projects	A. Qazi, et al.	International Journal of Project Management	2016	179
13	Dynamic capabilities in complex projects: The case of London Heathrow Terminal 5	A. Davies et al.	Project Management Journal	2016	175
14	Impact of risk management on project performance: the importance of soft skills	Marly Monteiro et al.	International Journal of Production Research	2015	171
15	Clarifying the project complexity construct: Past, present and future	J. Bakhshi et al.	International Journal of Project Management	2016	163

4.7. Atıf verilerine göre kaynaklar
4.7. Sources according to citation data

Kaynak temelli ağ görselleştirmesi kapsamında, asgari 10 yayını bulunan bilgi sağlayıcılarının başat ve alanın hakimiyetini elde bulunduran dergiler kapsamında değerlendirilmiş ve 499 kaynak arasından 12'si bu eşik değeri karşılamıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Proje karmaşıklığı çalışmalarına ait kaynakların atıf durumunun ağ görselleştirmesi
Figure 9. *Network visualization of the citation status of sources of project complexity studies*

Bu görselde, birbirine yakın konumlanan kaynaklar arasında belirgin ilişkiler bulunurken, daha uzak mesafedeki kaynaklar arasında doğrudan bir ilişki tespit edilmemiştir. Örneğin, merkezi konumda yer alan *International Journal of Project Management*, *International Journal of Managing Projects in Business* ve *Project Management Journal* gibi dergiler, diğer kaynaklarla güçlü bir etkileşim içinde olup, alana önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (Şekil 9). Buna karşılık, *Transportation Research Record* ve *Automation in Construction* gibi daha uzak konumlanmış kaynaklar arasında doğrudan bir ilişki gözlenmemektedir.

Tablo 6'daki sıralamada, *Sustainability*, *Transportation Research Record* ve *Buildings* gibi kaynakların proje karmaşıklığı alanında önemli sayıda yayın üretmesine rağmen yüksek atıf sayısına ulaşamadığı görülmektedir. Buna karşılık, *Automation in Construction* ve *IEEE Transactions on Engineering Management* gibi dergiler ise daha az sayıda yayın yapmalarına rağmen ortalama atıf sayıları bakımından öne çıkmaktadır. Gelecek araştırmalar için bu kaynakların incelenmesi, kavramın yaygınlık ve kullanım alanlarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Tablo 6. Proje karmaşıklığı alanındaki kaynakların atıf sayısına yönelik metrik verileri
Table 6. *Metric data for the number of citations of sources in the project complexity domain*

Sıra no	Kaynak	Yayın sayısı	Atıf sayısı	Yayın başına atıf
1	International Journal of Project Management	65	4.316	66.40
2	International Journal of Managing Projects In Business	48	735	15.31
3	Journal of Constructıon Engineering and Management	38	1.338	35.21
4	Project Management Journal	34	1.426	41.94
5	Journal of Management in Engıneering	32	1.055	32.97
6	Engineering Constructıion and Architectural Management	31	553	17.84
7	Sustainability	30	178	5.93
8	IEEE Transactions on Engineering Management	15	746	49.73

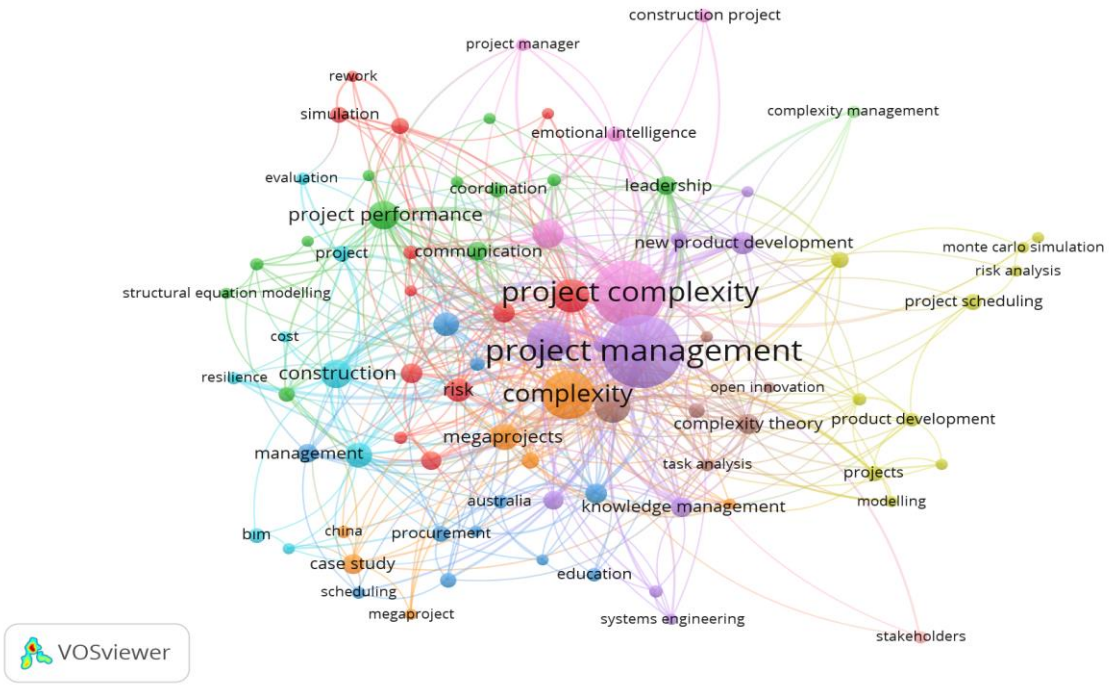
Tablo 6. Devamı
Table 6. *Contiuning*

Sıra no	Kaynak	Yayın sayısı	Atıf sayısı	Yayın başına atıf
9	Buildings	14	96	6.86
10	Automation in Construction	12	725	60.42
11	Transportation Research Record	10	32	3.20
12	International Journal of Construction Management	10	95	9.50

4.8. Anahtar kelimelerin analizi
4.8. Analysis of keywords

4.8.1. Sıklık analizi
4.8.1. Frequency analysis

Bilimsel topluluklarda araştırma yapanların incelemek istedikleri alana ilişkin katalizör gibi davranarak süreci hızlandıran ve ana temayı özetleyeci bakış açısı sunan anahtar kelimeler, yazarlar tarafından makalenin ana içeriğini şekillendiren temel unsurlardan birisidir. Bu çalışmada, 1.120 makalede kullanılan 3.197 anahtar kelimenin analizi için en az 5 kez kullanılmış olma kriteri belirlenmiş ve bu eşik değeri karşılayan 83 anahtar kelime tespit edilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Anahtar kelimelerin ağ görselleştirmesi
Figure 10. *Network visualization of keywords*

Tablo 7 anahtar kelimelerin sıklık sıralamasını göstermektedir. İlk 4 anahtar kelime, proje karmaşıklığının proje yönetimi ile bağlantısını ve projelerin çeşitlilik açısından karmaşık yönlerini Risk yönetimi ve belirsizlik konusunun ön planda olması ise, projelerin başarı kriterlerini tanımlayan ve yöneten bütçe, zaman, kalite/kapsam (Demir üçgeni) mekanizmalarının etkisini yansıtmaktadır. Müteakiben, inşaat ve yapı (Construction), Mega Projeler (Mega projects), İnşaat/Yapı Yönetimi (Construction management), İnşaat ve Yapı Endüstrisi (Construction industry) ve İnşaat/Yapı Projeleri (Construction projects) gibi anahtar kelimelerin sıklığı dikkat çekmektedir. Bu durumun altında yatan nedenlerden birisi olarak konutlar, otoyollar,

kamu hizmeti tesisleri, köprüler, tüneller, barajlar ve kara/deniz/hava/demir yolu ulaştırması gibi gittikçe daha teknik altyapı ve işgücü gerektiren uzmanlıkların mülk sahipleri, danışmanlar, müteahhitler, tedarikçiler gibi değişik paydaş gruplarının talepleri için birleştirilmesindeki karşılıklı bağımlılıkların sıklıkla yaşandığı (Leitao vd., 2020) sektörlerin başında gelen süreçlerden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Tablo 7. Anahtar kelimelerin sıklıkları
Table 7. *Frequencies of keywords*

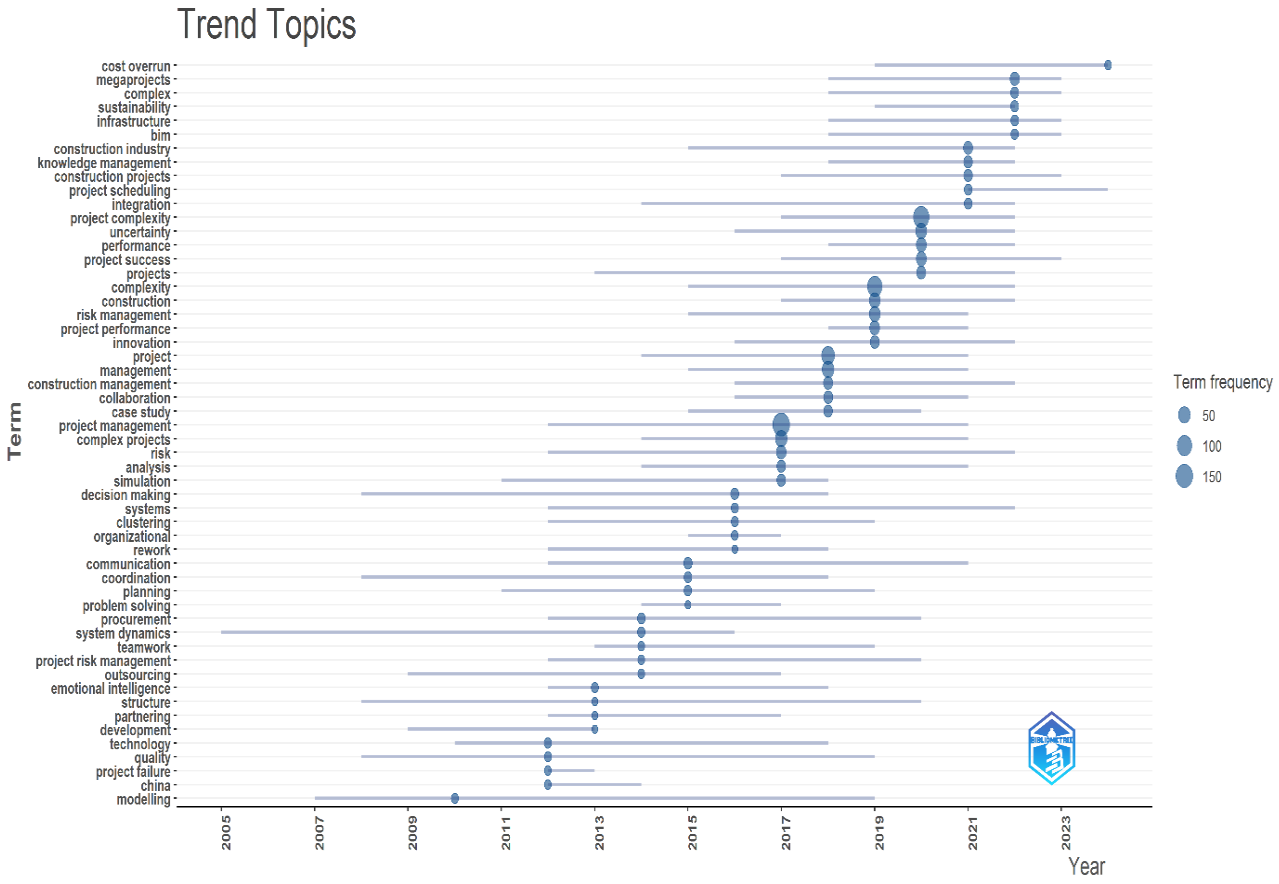
S.no	Anahtar kelime	Sıklık	S.no	Anahtar kelime	Sıklık
1	project management	158	**39**	complex systems	7
2	project complexity	130	**40**	construction project	7
3	complexity	72	**41**	education	7
4	complex projects	52	**42**	product development	7
5	risk management	37	**43**	project risk management	7
6	uncertainty	35	**44**	complexity management	6
7	construction	28	**45**	cost overrun	6
8	project performance	28	**46**	decision-making	6
9	project success	28	**47**	evaluation	6
10	megaprojects	23	**48**	governance	6
11	construction management	22	**49**	project manager	6
12	risk	20	**50**	resilience	6
13	construction industry	19	**51**	scheduling	6
14	new product development	17	**52**	stakeholder engagement	6
15	knowledge management	15	**53**	stakeholders	6
16	systems thinking	15	**54**	task analysis	6
17	collaboration	14	**55**	teamwork	6
18	complexity theory	14	**56**	alignment	5
19	construction projects	14	**57**	building information modeling (bım)	5
20	management	13	**58**	design management	5
21	communication	12	**59**	innovation	5
22	decision making	12	**60**	megaproject	5
23	leadership	12	**61**	monte carlo simulation	5
24	risk assessment	12	**62**	networks	5
25	performance	10	**63**	open innovation	5
26	procurement	10	**64**	outsourcing	5
27	project scheduling	10	**65**	project failure	5
28	simulation	10	**66**	rework	5
29	system dynamics	10	**67**	risk analysis	5
30	ınnovation	10	**68**	rework	5
31	complex project	9	**69**	sensitivity analysis	5
32	project planning	9	**70**	social network analysis	5
33	bım	8	**71**	stakeholder management	5

Tablo 6. Devamı
Table 6. *Contiuning*

S.no	Anahtar kelime	Sıklık	S.no	Anahtar kelime	Sıklık
34	coordination	8	**72**	structural equation modelling	5
35	emotional intelligence	8	**73**	systems engineering	5
36	problem solving	8	**74**	team performance	5
37	sustainability	8	**75**	technology	5
38	trust	8			

4.8.2. Trend analizi
4.8.2. Trend analysis

Anahtar kelimelerin akademik bir çalışmada kullanımının yıllara göre sıklık durumunun incelenmesi ise, o döneme ilişkin akademideki yaygın kalıpları ve uzmanlık alanlarını belirlenmesinde etkili bir yöntem olmakla birlikte tematik alanların gelişiminde bilgi alanın geleceğine ışık tutan bir teknik olarak kullanılabilir. Şekil 11, anahtar kelimelerin zamansal dağılımını göstermektedir. Diyagramdaki çizginin uzunluğu, söz konusu terimin yayınlar arasında ne kadar tutarlı olduğunu ve işlendiğini göstermektedir. Noktaların boyutunda ise en küçüğü 0-50 sıklığı temsil ederken, bunu 50-100 ve 150-200 sıklık temsili takip etmektedir.



Şekil 11. Anahtar kelimelerin zamansal analizi
Figure 11. *Temporal analysis of keywords*

1980-2005 yılları arasında yavaş gelişim gösteren proje karmaşıklığı kavramının bu dönemden sonra kazandığı ivme doğrultusunda 2005-2020 yılları arasında Sistem dinamiği (System dynamic; 2005-2016), Kalite (Quality, 2008-2019), Yapı (Structure, 2008-2020), Koordinasyon (Coordination, 2006-2018) ve Karar verme (Decision making, 2008-2018) terimlerinin dikkat çektiği görülmektedir. Bu anahtar kelimelerin ortak

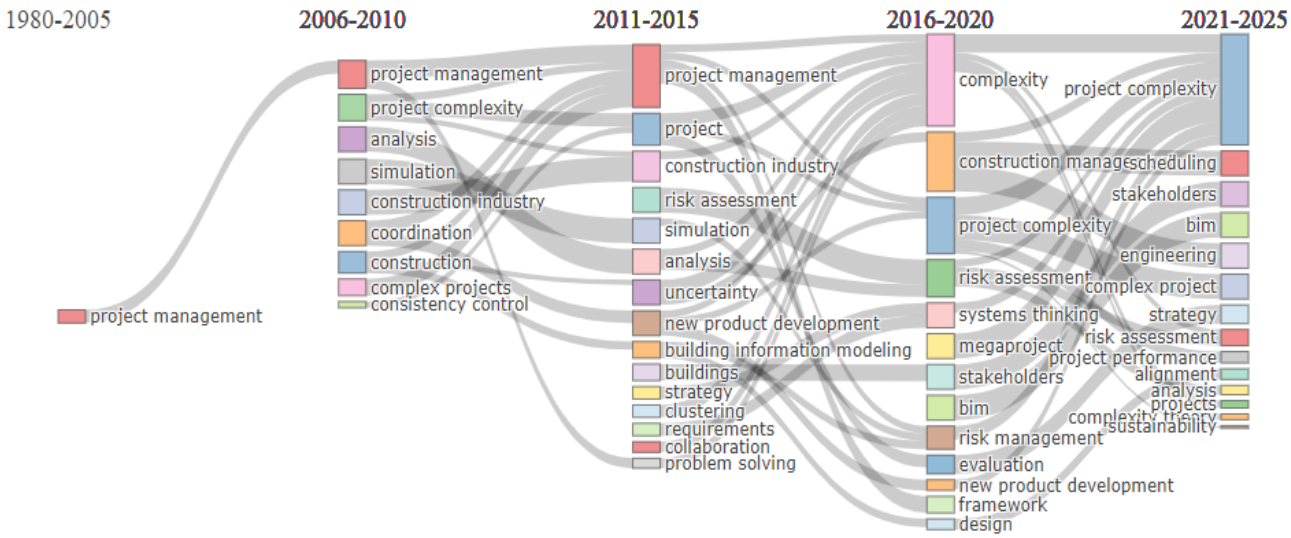
bağlantıları ise Proje yönetimi düşüncesinin, daha katı yaklaşımı benimseyen bir veya iki hedefin (zaman ve maliyet gibi) optimizasyonundan, karmaşık projelerin davranışını anlamaya yönelik çevresel, teknolojik, organizasyonel, davranışsal, politik ve diğer kaygıları da hesaba katacak daha yumuşak Esnek Sistem Metodolojisine (Checkland, 1972) dönük bir paradigma değişiminin yansımaları olarak değerlendirilmiştir.

2018-2023 son (5) yılık dönem içerisinde ise Mega projeler (Mega projects), İnşaat ve yapı (Construction), İnşaat/Yapı Yönetimi (Construction management), İnşaat ve yapı endüstrisi (Construction industry) ve İnşaat/yapı projeleri (Construction projects), Yapı (Infrastructure) gibi anahtar kelimelerin öne çıkmasında toplumun gereksinimlerinin karşılanmasında büyük çaplı altyapı ihtiyaçlarının karşılanmasındaki mal ve hizmetlerin üretimini gerektiren projelerin genel itibari ile inşaat ve yapı üzerinden nitelendirilmesi; Bilgi Yönetimi (Knowledge management), Bütünleşme (Integration) ve Yapı bilgi modellemesi (Building information modelling-BIM) gibi kavramların yukarıda belirtilen Mega Projelerde etkinliğin, verimliliğin ve yatırımların geri dönüşümünün artırılmasında artan karmaşıklıkla mücadelede Endüstri 4.0 gelişmelerine paralel yansımaların bir sonucu; Maliyet aşımları (Cost overrun), Proje takvimi (Project scheduling) ve Proje performansı gibi terimlerin ise tanımlaması ve açıklaması zor olan proje karmaşıklığını nicel verilere indirmeye çalışarak metrik bakış açısıyla somutlandırma sürecinin etkilerinden ileri geldiği değerlendirilmiştir. Sürdürülebilirlik (Sustainability) kavramının yakın zamanda işlenmeye başlanarak sıklığının artmasında ise 2020 yılında meydana gelen COVID-19 pandemisinin iş yapış şekilleri ve anlayışının projeler üzerindeki etkili olduğu ve geçici organizasyonlar konumunda yer alan proje yönetimi perspektifinde bir ikilem oluşturduğu ve bunun incelenmeye değer bir bakış açısından ileri geldiği düşünülmüştür.

4.8.3. Kavramsal analiz
4.8.3. Conceptual analysis

Çalışmanın bu bölümünde kavramsal gelişmelerin anlaşılması adına, bütüncül süreç belli dönemlere ayrılarak karşılaştırmalı analiz edilmiştir. Bu yöntem akademik disiplinlerdeki çok sayıda tema evriminin izlenmesinde (Mozelius & Humble, 2022) kullanılmakta olup, zaman içerisinde konuların nasıl ortaya çıktığını, kaybolduğunu, birleştiğini veya yeniden ortaya çıktığını açıklayan arayüz özelliğine sahiptir. Çalışmada kavramsal evrenlerin oluşturulması 4 evrede gerçekleştirilmiştir. Bu dönemler Proje karmaşıklığının kuluçka dönemi olarak nitelendirilebilecek 1980-2005 dönemi ve müteakiben gelişim evresi ile giderek artan yoğunluktaki (5)'er yıllık zaman dilimleridir. (*Anahtar kelime sayısı 250, minimum küme sıklığı 3 olarak belirlenmş ve ağırlıklandırılma indeksi kelime oluşumlarına göre belirlenmiştir.)*

Şekil 12, 1980'den 2024'e kadar olan kavramsal akışta, 1980-2005'de ortaya çıkan ilk temanın proje yönetimi olduğunu, 2006-2010'da proje yönetimi ve problem çözme şeklinde ayrıştığını, 2011-2015'te ise karmaşıklık, proje karmaşıklığı, risk yönetimi ve 2016-2020'de ana yapı iskeleti adında yeni bir tema oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 12. Proje karmaşıklığının 1980-2024 döneminde kavramsal gelişimi
Figure 12. *Conceptual development of project complexity in the period 1980-2024*

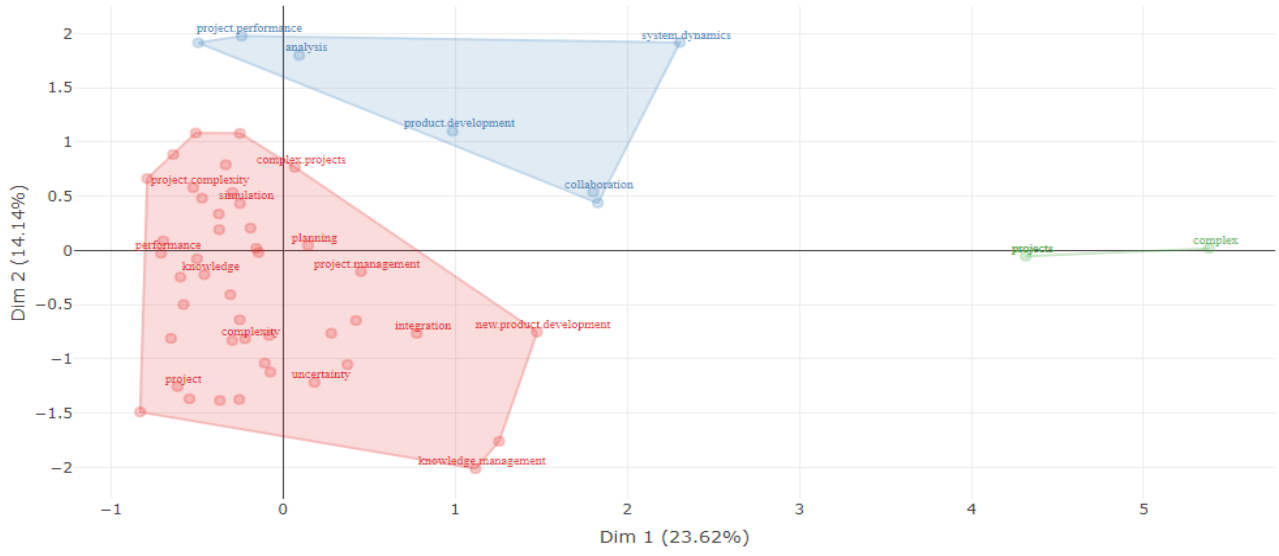
2006-2010 dönemde proje karmaşıklığı, analizler, simülasyon, yapı endüstrisi, koordinasyon, yapı, karmaşık projeler ve tutarlılık kontrolleri şeklinde yeni temalar oluşmuş ve yeni temalar içerisinden, koordinasyon 2011-2015'de yeni ürün geliştirme, yapı teması ise aynı dönem içerisinde belirsizlik ve yapı bilgi modellemesi temalarının türemesini sağlamıştır. Ayrıca bu dönemde risk değerlendirmesi, binalar, strateji, kümelenme ve gereklilikler şeklinde yeni kavramların proje karmaşıklığı alanı ile ilk kez ilişkilendirildiği göze çarpmaktadır. 2016-2020'de ise daha önceki dönemden proje yönetimi, proje, yapı endüstrisi, analizler, belirsizlik, kümelenme, yeni ürün geliştirme, iş birliği ve problem çözme kavramlarının karmaşıklık çatısı altında birleştiği dikkatleri çekmektedir. Benzer şekilde aynı dönemde strateji ve gereklilikler teması sistem düşüncesi altında birleşmiştir. Bu dönemde; önceki dönemden yapı bilgi modellemesi tasarım, binalar teması paydaşlar, ve proje teması değerlendirme temalarını oluşturmuş ve mega projeler kavramı bu dönemde türemiştir. 2021-2025 döneminde, bu döneme kadar gittikçe büyüyen ve oluşan yeni temaların yalınlaştırma ve bütünleştirme yolundaki değişimi dikkat çekmektedir. Nitekim bu dönemde önceki dönemden karmaşıklık, inşaat/yapı yönetimi, proje karmaşıklığı, risk değerlendirmesi, sistem düşüncesi, mega projeler, risk yönetimi ve yeni ürün geliştirme başlıklarının proje karmaşıklığı temasında toplandığı ve en sıklıkla kullanılan tema olduğu görülmektedir. Ayrıca inşaat/yapı yönetiminin mühendislik, tasarımın uyumlaştırma, proje karmaşıklığının ise sürdürülebilirlik başlıklarını türettiği gözlenmektedir.

4.8.4. Faktör analizi
4.8.4. Factor analysis

Faktör analizinin temel amacı, gözlemlenen değişkenler veya temalar arasında derinlemesine bir anlayış geliştirmek ve bu gözlemlenebilir unsurların arkasında yatan, çeşitli verilerin bir araya getirilebileceği faktörleri belirlemektir. Bu analiz, veri setindeki karmaşık yapıların anlaşılmasına olanak tanırken, aynı zamanda bu değişkenlerin birbirleri ile olan ilişkilerini ve etkileşimlerinin de anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Bölgesel haritalama yoluyla bir anahtar kelime ile diğeri arasındaki ilişkiyi haritalayarak, proje karmaşıklığı konusundaki araştırma makalelerinde sıklıkla görülen her kelimenin bağlamsal yapısının görselleştirilmesini içeren kavramsal bir yapı oluşturulmuştur. Her bir kelime Dim 1 ve Dim 2 değerlerine göre konumlandırılmış olup, Dim, bibliyometrik analizlerde özel bir terim olan Küçültücü parçacığın kısaltmasıdır ve böylece değerleri önemli ölçüde farklılık göstermeyen kelimeler arasında bir eşleme imkânı sunmaktadır (Rusydiana, 2021).

Şekil 13'teki kavramsal haritada kırmızı, mavi ve yeşil alan olmak üzere üç bölüm bulunmaktadır ve her renk kümesi birbiriyle ilişkili kelimeleri içermektedir. Kırmızı alan çok sayıda ve çeşitlilikteki terimleri içermekte olup proje karmaşıklığı alanındaki birbiri ile ilişkili en sık kavramları kapsamaktadır.



Şekil 13. Faktör analizine göre kavramsal yapı haritası
Figure 13. *Conceptual structure map according to factor analysis*

Şekil 13'e göre kırmızı bölgedeki sıklıkla kullanılan ve birbiri ile ilişkili olan terimlerin başında proje yönetimi, karmaşık projeler, proje karmaşıklığı, belirsizlik ve bilgi yönetimi gibi kavramlar gelmektedir. Mavi bölgede ise sürdürülebilirlik, proje performansı, sistem dinamikleri, iş birliği ve ürün geliştirme bulunmaktadır. Yeşil alanda ise projeler ve karmaşık temaları bulunmaktadır.

5. Tartışma ve sonuçlar

5. Discussion and conclusions

Bibliyometrik veriler, belirli bir alanın literatürdeki performansını değerlendirmek, bilimsel faaliyet gerçekleştiren kurum ve kuruluşların konuya ilişkin operasyonlarını yönetmelerine yardımcı olmak, bilimsel girdi ve çıktıları değerlendirmek için gerekli rafine bilgileri sağlayabilir. Ayrıca, bibliyometrik analizden elde edilen bulgular, araştırmacıları belirli bir çalışma alanında katkıyı artıran temel faktörleri ortaya çıkarmaya, daha etkili ve daha fazla çalışma yapmaya yönlendirebilir.

Proje Karmaşıklığı alanındaki çalışmaların büyük çoğunluğunu makaleler oluşturmaktadır. Makaleleri takiben bildiri kitapçıkları ikinci sırada yer almaktadır. Bu alana ilişkin bilimsel çalışmalarda başat konumda bulunan makale ve kongre/sempozyum vb. bildiri kitapçıkları ağırlıklarının yüksek olmasının altında, yayıncıların internet ortamında açık erişim politikasını benimsemesinin ve teknolojik gelişmelerin bilgiye ulaşımı kolaylaştırmasındaki mekanizmaların etkili olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmada, proje yönetimiyle ilişkili olarak proje karmaşıklığıyla ilgili Web of Science Core Collection veri tabanından elde edilen 1.210 makalenin bibliyometrik analizi ile alanındaki en etkili yazarlar, ülkeler, kurumlar, dergiler ve temalar listelenmiştir. İstatiski veriler kapsamında proje karmaşıklığı alanında yapılan araştırmaların hemen hemen %50'lik kısmı 2017-2024 zaman diliminde gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte proje karmaşıklığı çalışmaları yıllar içerisinde kartopu gibi büyüyen bir yaklaşımla bilim insanları ile uygulayıcılar tarafından artan şekilde ilgi görmektedir.

Alana yönelik yapılan araştırmalar arasında, en çok atıf alan yazarlar; M.V. Tatikonda ve S.R. Rosenthal ("Technology novelty, project complexity, and product development project execution success: a deeper look at task uncertainty in product innovation" başlıklı makalesi ile)'dir. En yüksek bağlantı gücüne sahip yazarlar ise Franck Marle ve Ludovic-Alexandre Vidal'dir ("Using a Delphi process and the Analytic Hierarchy Process (AHP) to evaluate the complexity of projects " başlıklı çalışmaları ile). En fazla yayın üreten kurum Tongji Üniversitesi, en yüksek toplam atıf sayısına sahip ülke ise A.B.D'dir. Ayrıca, bu alanda en çok atıf alan kaynak olarak International Journal of Project Management öne çıkmaktadır. Mevcut bilgi birikimi göz önüne alındığında, temel kaynak araştırmaları ve okumalar için bu yazarlar ve dergilere odaklanılabilir. Kavramı derinlemesine incelemek isteyenler ise Çin, İngiltere ve Avusturalya gibi ülkelerdeki çalışmaları takip edebilirler.

Anahtar kelimeler üzerinden yapılan sıklık, trend, kavramsal, tematik ve faktör analizleri doğrultusunda bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirildiğinde proje karmaşıklığının proje yönetimi kavramından türetildiği ve ilişkili kavramların 2020 yılına kadar artarak devam ettiği, bu dönemden sonra daha bütüncül bir yaklaşımla ele alınarak kavramların azalarak yenilendiği göze çarpmaktadır. Anahtar kelimelerin gerek kendi içerisinde gerekse kaynak yayınlarda, makale başlıklarında ve özet bölümlerinde yönetim kavramının ön plana çıktığı görülmektedir. Bu bir bakıma projelerin giderek daha karmaşık hale geldiğini, bu nedenle araştırmacıların proje karmaşıklığı kavramına giderek daha fazla dikkat çektiğini ve durumun yönetilebilir olduğunu düşündürtmektedir. Bu düşüncenin altında yatan sebeplerden bir tanesi yine alanla ilişkili olan performans ve başarı kavramlarıdır ve diğer anahtar kelimelerle beraber düşünüldüğünde proje karmaşıklığının proje yönetimi başarısı ve proje yönetim performansı ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.

Kavramların artış gösterdiği döneme kadar dikkat çeken temalarda yapı endüstrisi ve inşaat sektörü göze çarpmaktadır. Bu durumun altında yatan nedenlerden birisi olarak konutlar, spor kompleksleri, otoyollar, kamu hizmeti tesisleri, köprüler, tüneller, barajlar ve kara/deniz/hava/demir yolu ulaştırması vb. artan toplumsal ihtiyaçların mega projeler çatısı altında birleştirilmesi ve proje karmaşıklığını açıklayıcı en temel ve somut örneklerin başında gelmesidir. Bununla birlikte proje yöneticileri, üst yönetim, kaynak yöneticileri, sponsorlar gibi proje yönetimindeki paydaşlar tarafından proje karmaşıklığının daha anlaşılır ve çözümlenebilir hale getirilmesinde sektörel projelerin doğrudan ve dolaylı çıktılarının olumlu/olumsuz etkilerine yönelik yansımaları daha net anlaşılabilecektir. 2020 yılından sonra popüler olan kavramlardan birisi olarak

sürdürülebilirliğin ise küresel çapta etkili olan Covid-19 pandemisi ile ilişkili olarak iş yapış şekillerindeki değişimin yansıması olarak düşünülmesidir.

Tematik analiz doğrultusunda proje karmaşıklığının gelecekteki çalışma alanlarının neler olabileceğine bakıldığında ise Endüstri 4.0 gelişmelerine paralel şekilde otomasyon, blok zincir, makine öğrenmesi ve simülasyon süreçleri ile ilişkili olabilecek bilgi teknolojileri ile kesişimi incelemeye değer gözükmektedir. Niş alandaki kamu sektöründeki proje karmaşıklığı ile özel sektör projelerindeki karmaşıklığın proje başarı kriterleri veya proje değerlendirme kriterleri açısından anlamlı farklılıklarının bulunup bulunmadığı bir başka inceleme konusu olarak görülebilir.

Bu çalışmanın akademisyenler ve uygulayıcılar için teorik ve pratik çıkarımları açısından ise sistematik bilgi ve araştırma alanı hakkında geniş bir anlayış sağlayacağı; proje çalışanları ve yöneticileri açısından proje karmaşıklığının etkisini algılama ve kurumsal performansın artırılmasında bir bakış açısının oluşmasına katkı sağlayacağı değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın literatüre olan katkılarının yanı sıra hala bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Birincisi veri setinin oluşturulmasında yalnızca Web of Science veri tabanındaki akademik çalışmalara odaklanıldığından, proje karmaşıklığıyla ilgili Scopus, Google Scholar, EBSCO ve PubMed gibi diğer veri tabanlarındaki veriler çalışmaya dahil edilmemiştir. Bu nedenle gelecek araştırmalar için bu veri tabanlarında yapılacak çalışmaların proje karmaşıklığına ilişkin literatürün daha fazla anlaşılmasına imkân tanıyacağı değerlendirilmektedir. Diğer bir sınırlılık ise bibliyometrik analizin doğasında bulunan değişik frekans aralıklarının ve belirlenen zaman aralığının farklı seçimi çok daha değişik sübjektif sonuçlara neden olmasıdır. Bu bağlamda konu hakkında çalışma yapacak araştırmacıların bu hususu dikkate alarak analizlerini gerçekleştirmesi bilimin tarafsızlığı ilkesi ile örtüşecektir.

Yazar katkısı
Author contribution

Yazarlar bu çalışmanın hazırlanmasına eşit derecede katkıda bulunmuş ve birlikte çalışmışlardır. Araştırmacılardan Kaya Ali LEKESİZGÖZ, sistematik literatür taraması ve teorik arka plan hazırlama süreci ile veri toplama aşamalarına katkı sağlamış ve yazım aşamasında görev almıştır. Prof. Dr. Yasin ŞEHİTOĞLU çalışma fikrinin oluşturulması ve geliştirilmesi, araştırmanın tasarımı ve yöntemleri üzerinde çalışmış, verilerin toplanıp bibliyometrik haritaların oluşturulmasında etkili olan VOSViewer ve Bibliometrix (Biblioshiny) programları verilerinin analiz edilmesi ve yorumlanması ile makalenin biçimlendirilmesinde 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 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 tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar
References

Ahmi, A. (2022). Bibliometric Analysis using R for Non-Coders: A practical handbook in conducting bibliometric analysis studies using Biblioshiny for Bibliometrix R package.

Aladayleh, K. J., Al Qudah, S. M. A., Fuentes Bargues, J. L., & Ferrer Gisbert, P. (2023). Global trends of the research on COVID-19 risks effect in sustainable facility management fields: a bibliometric analysis. *Engineering Management in Produc-tion and Services*, 15(1), 12-28. doi: 10.2478/emj-2023-0002

Anderson, P. (1999). Perspective: Complexity theory and organization science. *Organization science*, 10(3), 216-232.

Antoniadis, D. N., Edum-Fotwe, F. T., & Thorpe, A. (2011). Socio-organo complexity and project performance. *International Journal of Project Management*, 29(7), 808-816. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.02.006

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of informetrics*, 11(4), 959-975. https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007.

Aritua, B., Smith, N. J., & Bower, D. (2009). Construction client multi-projects–A complex adaptive systems perspective. *International Journal of Project Management*, 27(1), 72-79. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.02.005

Baccarini, D. (1996). The concept of project complexity-a review. *International Journal of Project Management*, 14(4), 201-204.

Bakshi J., Ireland V., and Gorod A. (2016). Clarifying the project complexity construct: Past, present and future. *International Journal of Project Management* 34, 1199–1213. doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.06.002

Bar-Yam, Y. (2003). Dynamics of complex systems. Reading, MA: Perseus Books.

Benbya, H. and McKelvey, B., (2006). Using coevolutionary and complexity theories to improve IS alignment: a multi-level approach. *J. Inf. Technol*. 21 (4), 284-298. https://doi.org/10.1057/palgrave.jit.2000080

Bennett, J. & Fine, B. (1980). *Measurement of complexity in construction projects.* Department of Construction Management, University of Reading: Reading, UK.

Bennett, P. & Cropper, S. (1990). Uncertainty and conflict: Combining conflict analysis and strategic choice. *J. Behav. Decis. Mak.*, 3, 29–45.

Bordons, M., Aparicio, J., González-Albo, B. & Díaz-Faes, A. A., (2015). "The relationship between the research performance of scientists and their position in co-authorship networks in three fields", *Journal of Informetrics*, Vol. 9, No. 1, 135-144. doi: 10.1016/j.joi.2014.12.001

Bradley, G. (2010). *Benefit realisation management: A practical guide to achieving benefits through change*. Gower Publishing Company

Broadus, R. N. (1987). Toward a definition of "bibliometrics". *Scientometrics*, 12(5–6), 373–379.

Bubshait, K.A. and Selen, W.J. (1992) Project characteristics that influence the implementation of project management techniques: A survey. *Int. J. Proj. Manag. J*., 23, 43–47.

Chapman, R. J. (2016). A framework for examining the dimensions and characteristics of complexity inherent within rail megaprojects. *International Journal of Project Management*, 34(6), 937–956. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.05.001

Checkland, P. (1972). Towards a systems-based methodology for real-world problem solving. *Journal of Systems Engineering*, 3(2), 87-116.

Checkland, P. (1999). *Systems thinking*. Rethinking management information systems, pp. 45-56

Cicmil, S. and Marshall, D., (2005). Insights into collaboration at the project level: complexity, social interaction and procurement mechanisms. *Build. Res. Inf.* 33 (6). https://doi.org/10.1080/09613210500288886

Davis, K., (2014). Different stakeholder groups and their perceptions of project success. *Int. J. Proj. Manag*. 32, 189–201. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.02.006

DeRosa, J.K., Grisogono, A.M., Ryan, A.J. & Norman, D., (2008). A Research Agenda for the Engineering of Complex Systems. 2nd Annual IEEE Systems Conference, pp. 1–8.

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W.M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *J. Bus. Res*, 133, 285–296.

Flyvbjerg, B., Stewart, A., Budzier, A., (2016). The Oxford Olympics study 2016: cost and cost overrun at the games. Saïd Business School Research Papers, pp. 1–27. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2804554

Geraldi, J. G. (2009). What complexity assessments can tell us about projects: Dialogue between conception and perception. *Technology Analysis & Strategic Management*, 21(5), 665–678. https://doi.org/10.1080/09537320902969208

Geraldi, J., Maylor, H., & Williams, T. (2011). Now, let's make it really complex (complicated): A systematic review of the complexities of projects. *International Journal of Operations & Production Management*, 31(9), 966–990. doi: 10.1108/01443571111165848

Gidaldo, K. (1993). *Numerical index of complexity in building construction to its effect on production time*. University of Brighton: Brighton, UK.

Gido, J. & Clements, J. P. (2012). *Successful project management*. Mason, OH: South-Western Cengage Learning.

Glouberman, S. and Zimmerman, B., (2002). Complicated and complex systems: What would successful reform of Medicare look like? Commission on the Future of Health Care in Canada Toronto

Gransberg, D. D., Shane, J. S., Strong, K., & del Puerto, L. C. (2013). Project complexity mapping in five dimensions for complex transportation projects. *Journal of Management in Engineering*, 29(4), 316–326. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000163

Guthrie J., Ricceri F., & Dumay J. (2012). Reflections and projections: A decade of intellectual capital accounting research. *The British Accounting Review*. 44, 66-82. http://dx.doi.org/10.1016/j.bar.2012.03.004

Ireland, V. (1985). The role of managerial actions in the cost, time and quality performance of high-rise commercial building projects. *Constr. Manag. Econ.* 3 (1), 59–87.

Jaafari, A. (2003). Project management in the age of complexity and change. *Proj. Manag. J.* 34 (4), 47–58

Jamshidi, M., (2008). *System of systems engineering. Innovations for the 21st century.* John Wiley & Sons.

Johnson, B. R. (2010). Eliminating the mystery from the concept of emergence. *Biology & Philosophy*, 25(5), 843–839. doi.org/10.1007/s10539-010-9230-6

Keller, R.T. (1994). Technology-information processing fit and the performance of R & D project groups: a test of contingency theory. *Acad. Manag. J.* 37 (1), 167–179.

Larson, E. W. & Gray, C. F. (2014). *Project management: The managerial process*, New York, NY: McGraw-Hill Irwin.

Leitao J, Gil P, Ribeiro B, Cardoso A. (2020) . A survey on home energy management. *IEEE Access*. 8:5699–722. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963502

Levitt, R.E., Thomsen, J., Christiansen, T.R., Kunz, J.C., Jin, Y. & Nass, C., (1999). Simulating project work processes and organizations: toward a microcontingency theory of organizational design. *Manag. Sci.* 45 (11), 1479–1495.

Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour*, New York, NY: Oxford University Press.

Morris, P.W.G. (1994). *The Management of projects*; Thomas Telford: London, UK

Morris, P.W.G. (2002) Science, objective knowledge and the theory of project management. *Proc. Inst. Civ. Eng. Civ. Eng*., 150, 82–90. https://doi.org/10.1680/cien.2002.150.2.82

Mozelius, P. and Humble N. (2022). Content analysis or thematic analysis-similarities, differences and applications in qualitative research. *European Conference on Research Methodology for Business and Management Studies* 21(1). doi: 10.34190/ecrm.21.1.316

North, M. J. & Macal, M. M. (2007). *Managing business complexity*. Oxford, England: Oxford University Press.

Padalkar, M., & Gopinath, S. (2016). Are complexity and uncertainty distinct concepts in project management? A taxonomical examination from literature. *International Journal of Project Management*, 34(4), 688–700. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.02.009

Pritchard, A. (1969). Statistical bibliography or bibliometrics? *Journal of Documentation*, 25(4), 348–349.

Project Management Institute (PMI). (2013). *A guide to the project management body of knowledge* (PMBOK® guide) - Fifth edition, Newtown Square, PA: Author.

PMI. (2020). *Pulse of the profession 2020: Research highlights by region and industry*. Newton Square, PA US: Project Management Institute.

Rand, G.K., (2000) Critical chain: the theory of constraints applied to project management. *Int. J. Proj. Manag*. 18 (3), 173–177. https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00019-8

Rejeb, A., Rejeb K. and Treiblmaier H. (2023). Mapping metaverse research: Identifying future research areas based on bibliometric and topic modeling techniques. *Information* 14: 356. https://doi.org/10.3390/info14070356

Remington, K., & Pollack, J. (2007). *Tools for complex projects,* Aldershot, UK: Gower Publishing.

Rusydiana, Aam. (2021). Bibliometric analysis of journals, authors, and topics related to COVID-19 and Islamic finance listed in the Dimensions database by Biblioshiny. *Science Editing*. 8. 72-78. 10.6087/kcse.232.

Saynisch, M. (2010). Beyond frontiers of traditional project management: an approach to evolutionary, self-organizational principles and the complexity theory-results of the research program. *Proj. Manag. J.* 41 (2), 21–37. https://doi.org/10.1002/pmj.20159

Shenhar, A. J., & Dvir, D. (1996). Toward a typological theory of project management. *Research Policy*, 25(4), 607-632. https://doi.org/10.1016/0048-7333(95)00877-2

Simon, H. A. (1962). The architecture of complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106(6), 467–482.

Singh, H. and Singh, A., (2002). Principles of complexity and chaos theory in project execution: a new approach to management. *Cost Eng.* 44 (12), 23–33.

Snowden, D.J. & Boone, M.E., (2007). A leader's framework for decision making. *Harv. Bus. Rev.* 85 (11), 68.

Söderlund, J. (2004). On the broadening scope of the research on projects: a review and a model for analysis. *International Journal of Project Management*, 22(8), 655–667. doi: 10.1016/j.ijproman.2004.05.0

The Economist, (2017). Why Berlin's new airport keeps missing its opening date. *The Economist*. URL: https://www.economist.com/blogs/economist-explains/2017/01/economist-explains-18, Erişim Tarihi:04.07.2024

Tuçay S. S. & Sürgevil O. (2017) Yönetim ve organizasyon bilim alanında ortak yazarlılık. *Journal of Business Research*, s. 393-423. doi: 10.20491/isarder.2017.306

Turner, R. & Zolin, R., (2012). Forecasting success on large projects: developing reliable scales to predict multiple perspectives by multiple stakeholders over multiple time frames. *Proj. Manag. J.* 43, 87-99. https://doi.org/10.1002/pmj.21289

Vidal, L. and Marle, F. (2008). Understanding project complexity: Implications on project management. *Kybernetes*, 37, 1094–1110. http://dx.doi.org/10.1108/03684920810884928

Vidal, L., & Marle, F. (2008). Understanding project complexity: Implications on project management. *Kybernetes*, 37(8), 1094–1110. https://doi.org/10.1108/03684920810884928

Wallin, J. A. (2005). Bibliometric methods: Pitfalls and possibilities. *Basic and Clinical Pharmacology and Toxicology*, 97(5), 261-275. https://doi.org/10.1111/j.1742-7843.2005.pto_139.x

Whittington R., Pettigrew A., Peck S., Fenton E. & Canyon M. (1999). Change and complementarities in the new competitive landscape: A European panel study, 1992–1996. *Organization Science*, 10 (5), 583-600

Wonziak, T.M. (1993). Significance vs Capability: "Fit for Use" Project Controls. *Am. Assoc. Cost Eng. Int. Trans*., 2, 1–8.

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 432-450 doi: 10.17714/gumusfenbil.1607018 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Farklı bitki türlerinin ağır metal içerikleri üzerine taş ocaklarının etkisinin değerlendirilmesi

Evaluation of the effect of quarries on heavy metal contents of different plant species

Şule GÜZEL İZMİRLİ*

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 53100, Rize

• Geliş tarihi / *Received*: 25.12.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 12.04.2025

Öz

Çevre kirliliği insanlığın karşı karşıya olduğu en büyük tehdittir; hastalık ve ölümlerin en önde gelen nedeni olarak kabul edilmektedir. Taş ocağı ve madencilik faaliyetleri gibi antropojenik uygulamalar bitki topluluğunun yapısını ve işleyişini değiştirebilir. Bu çalışmada, aktif ve pasif taş ocağı istasyonlarının otsu ve odunsu bitki türlerinin ağır metal içerikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Taş ocağı madenciliğinin çevresel etkilerini ortaya çıkarmak için otsu (*Juncus effusus* subsp. *effusus*) ve odunsu (*Alnus glutinosa* subsp. *barbata*) bitki örneklerinde krom (Cr), demir (Fe), nikel (Ni), bakır (Cu), çinko (Zn), arsenik (As), kurşun (Pb) ve mangan (Mn) içerikleri indüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) ile analiz edildi. *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın Cr, Fe, Cu, As, Pb ve Mn içeriklerinde $P < 0.01$, Ni içeriklerinde ise $P < 0.05$ seviyesinde anlamlı farklılıklar tespit edildi ve Mn elementi hariç en yüksek ağır metal içerikleri *Alnus glutinosa* subsp. *barbata* 'da bulundu. En düşük ve en yüksek ağır metal konsantrasyonları sırasıyla yıkanmış ve yıkanmamış örneklerde belirlendi. Aktif taş ocağı istasyonundan alınan bitki örneklerinde yüksek seviyede ağır metal konsantrasyonları bulunurken, en düşük konsantrasyonların ise temiz alanlardan alınan örneklerde olduğu tespit edildi. Cu, Mn, Fe ve Zn konsantrasyonlarının literatürde belirtilen maksimum izin verilebilir limitin üzerinde olduğu, bitkilerin aktif olarak işleyişte olan taş ocaklarından etkilendiği ve zamanla bitki yüzeylerinde ağır metal birikiminin olduğu sonucuna varıldı.

Anahtar kelimeler: Ağır metal, *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*, *Juncus effusus* subsp. *effusus*, Rize, Taş ocağı

Abstract

Environmental pollution is the greatest threat facing humanity and is recognised as the leading cause of disease and death. Anthropogenic practices such as quarrying and mining activities can alter the structure and functioning of the plant community. In this study, the effects of active and passive quarry stations on heavy metal contents of herbaceous and woody plant species were investigated. Chromium (Cr), iron (Fe), nickel (Ni), copper (Cu), zinc (Zn), arsenic (As), lead (Pb), and manganese (Mn) contents in herbaceous (Juncus effusus subsp. effusus) and woody (Alnus glutinosa subsp. *barbata) plant samples were analysed by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) to reveal the environmental impacts of quarry mining. Significant differences were detected at the $P < 0.01$ level in Cr, Fe, Cu, As, Pb and Mn contents and at the $P < 0.05$ level in Ni contents of Juncus effusus subsp. effusus and Alnus glutinosa subsp. barbata and the highest heavy metal contents, except for Mn were found in Alnus glutinosa subsp. barbata. The lowest and highest heavy metal concentrations were determined in washed and unwashed samples, respectively. While high concentrations of heavy metals were found in plant samples taken from the active quarry station, the lowest concentrations were found in samples taken from clean areas. It was concluded that Cu, Mn, Fe and Zn concentrations were above the maximum permissible limits stated in the literature, plants were affected by actively operating quarries and heavy metal accumulation occurred on plant surfaces over time.*

Keywords*: Heavy metal, Alnus glutinosa subsp. barbata, Juncus effusus subsp. effusus, Rize, Quarry*

*Şule GÜZEL İZMİRLİ; sule.guzel@erdogan.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Taş ocağı işletmeciliği, gelişmiş ülkeler de dahil olmak üzere dünya çapında ilgi duyulan bir konudur (Lameed & Ayodele, 2010). Taş ocağı işletmeciliği, kaya, ebatlı taş, inşaat agregası, çakıl gibi kaynakların yer yüzeyinden elde edilmesi sürecidir (Vincent vd., 2012). Bu kaynaklar, granit, mermer, kumtaşı ve arduvaz gibi ev döşemelerinde kullanılan malzemeleri sağlar. Kireçtaşı ayrıca seramik karolar yapmak için çimento ve kil için de kullanılır (Lameed & Ayodele, 2010). Bir arazi kullanım uygulaması olarak taş ocakçılığı, yakıt olmayan minerallerin kayadan çıkarılmasıdır ve katı minerallerin yüksek oranda kullanılması çevresel kirleticilerin oluşmasına neden olabilir (Ogbonna vd., 2011). Taş ocağı işletmeciliği, çevreyi ve insan sağlığını etkileyen bir madencilik faaliyeti türüdür. Taş ocağından çıkarma sırasında ağır metaller yeraltı suyuna, havaya ve toprağa salınır. Çıkarma işlemi hem patlayıcılara hem de ağır makinelere bağlıdır ve bu işlemler gürültü ve hava kirliliğine, habitatın tahrip olmasına, verimli toprağın yer değiştirmesine ve biyolojik çeşitliliğin zarar görmesine neden olur, bu aynı zamanda yaban hayatı, çiftlik hayvanları ve çevrede yaşayan insanlar için de tehdit oluşturur (Sayara vd., 2016).

Taş ocakçılığından kaynaklanan tozun, yaprak yüzeylerine yerleşerek yaprak ve atmosfer ara yüzeyinde gerçekleşen normal fotosentetik ve diğer değişimlere müdahale etmesi nedeniyle bitkilerin büyümesini ve çiçeklenmesini durdurduğu bildirilmiştir (Madhaven & Sanjay, 2005). Hem aktif hem de terk edilmiş taş ocağı/maden sahalarında çoğunlukla pirit ve arsenopirit olmak üzere belirli sülfür minerallerinin havaya ve suya maruz kalması sonucu oluşan asit maden drenajından kaynaklanan ağır metal kirliliği Sengupta (1992) ve Yaacob vd. (2009) tarafından araştırılmıştır. Yaacob vd. (2009) yüzey suyu, toprak ve maden atıklarındaki As, Cu, Fe, Mn, Pb ve Zn konsantrasyonlarının yasal sınırları aştığını bildirmiştir.

Katı maden arama, madencilik, kamu altyapısı inşası, endüstriler ve metal teknolojisindeki rutin uygulamalarının bir sonucu olarak üretimlerindeki ciddi artış nedeniyle dünya çapında ağır metallere maruz kalma potansiyeli konusunda artan bir endişe vardır. Gelişmekte olan ülkelerde her yıl yaklaşık 4 milyon insan taş ocakçılığı, kumlama ve tehlikeli kimyasalların emisyonundan kaynaklanan çevre kirliliği nedeniyle ölmektedir (Odeyemi vd., 2021). Taş ocağı madenciliği süreçlerinin farklı aşamaları, metallerin toprak, su ve işletme alanlarının çevresindeki bitki türleri gibi çevresel ortamlara nüfuz etmesine neden olmaktadır. Diğerlerinin yanı sıra mangan, arsenik, bakır ve çinkonun, taş ocağının faaliyet gösterdiği yerlerdeki toprak, toz, su ve bitki türlerinde önemli seviyelerde bulunmaları nedeniyle taş ocağı faaliyetleriyle ilişkili olduğu bildirilmiştir (Tiimub vd., 2015). Taş ocağı madencilik faaliyetleri, ağır metallerin yeraltı sularına, yüzey sularına sızmasına ve ortam havasına daha fazla salınmasına neden olarak taş ocağının faaliyet gösterdiği yerde bulunan örneklerin ağır metallere aşırı maruz kalmasına neden olabilir (Ali vd., 2019).

Topraktaki tüm toksik elementler arasında ağır metaller daha ön plandadırlar, çünkü ağır metaller yüksek toksisite, parçalanmama ve biyolojik birikim özelliklerine sahiptir (Fashola vd., 2016). Ağır metaller ayrıca daha toksik metil bileşiklerine dönüşebilirler ve hatta bazıları besin zinciri yoluyla insan vücudunda zararlı konsantrasyonlarda birikerek insan sağlığını ciddi şekilde tehlikeye atabilir. Bu durum ağır metal kirliliğini ciddi bir sağlık ve ekolojik çevre sorunu haline getirmekte ve geniş çapta endişe yaratmaktadır (Jiang vd., 2021). Hava kirliliğinde rol oynayan faktörler arasında eser metaller özel bir konuma sahiptir, çünkü bunlar tutucu kirleticilerdir ve biyolojik olarak birikme eğilimindedirler ve bazıları küçük miktarlarda bile kanserojen veya zehirleyici etkiler gösterirler. Cr, As, Ni, Zn ve Pb gibi bazı metaller çoğunlukla endüstriyel kökenli ve kanserojendir. Bunlar arasında Pb, As ve Cr, özellikle potansiyel toksisiteleri ve canlılar üzerindeki etkileri açısından zehirli metallerdir (Guney vd., 2023). Cd, Cr, As, Hg, Pb, Cu, Zn ve Ni gibi ağır metaller, kirlilik özelliklerine göre insan sağlığı ve ekolojik çevre üzerindeki etkileri nedeniyle Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından kontrol altına alınması gereken öncelikli kirleticiler olarak listelenmiştir (Chen vd., 2015). Makro besinler olarak Zn, Mn, Fe, Cu, Co, Cr ve Ni, hayvanlar ve bitkiler de dahil olmak üzere canlılar için mikro elementler olarak gereklidir. Bununla birlikte, yüksek miktarlarda yıkıcı sonuçlara da neden olabilirler. As, Cd, Hg ve Pb gibi eser metal elementler, küçük dozlarda bile canlı vücudunda ciddi toksisitelerini ortaya koymaktadır (Guney vd., 2023).

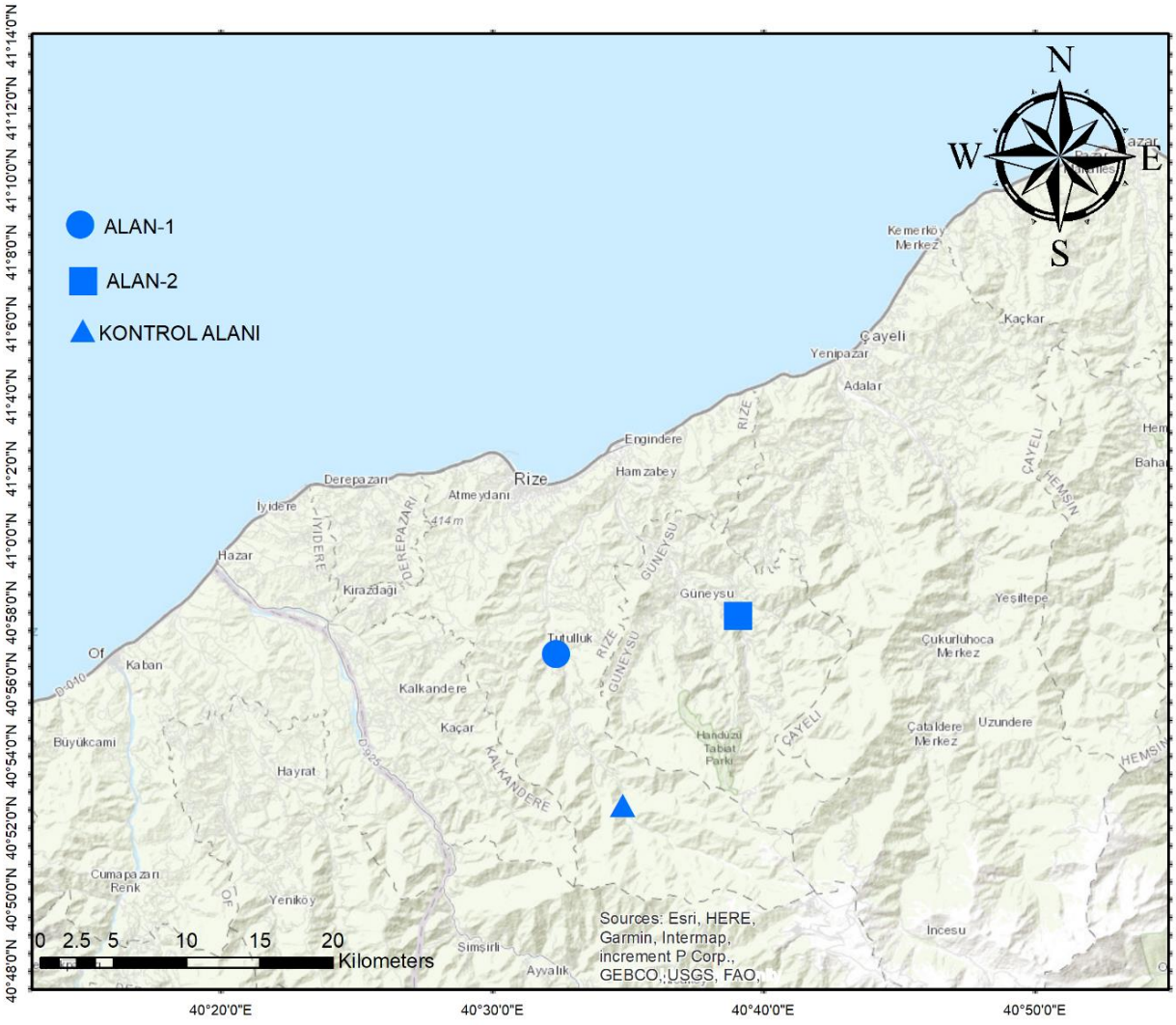
Rize'de taş ocaklarının ağır metal kirliliği açısından çevre üzerindeki etkisine ilişkin bilgi eksikliği bulunmaktadır. Taş ocağı sahalarının çevresindeki toksik ağır metallerin temel konsantrasyonlarının araştırılmasına ihtiyaç vardır. Daha önce hiçbir araştırma Rize ilindeki taş ocaklarının ağır metal kirliliği üzerindeki potansiyel etkisini araştırmamıştır. Rize ilindeki taş ocakları aracılığıyla ağır metallerin olası

salınımı hakkındaki bilgi boşluğunu doldurmayı hedefleyerek, aktif ve pasif taş ocaklarından kaynaklanabilecek ağır metal kirliliği ilk kez bu çalışmada araştırılmıştır. Bu çalışmanın temel amaçları; 1) çok yıllık otsu bir tür olan *Juncus effusus* L. subsp. *effusus* ile odunsu bir tür olan *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. subsp. *barbata* (C.A.Mey.) Yalt.'nın ağır metal içerikleri üzerine taş ocaklarının etkisini belirlemek, 2) taş ocaklarının farklı bitki türlerinin Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb ve Mn seviyelerini nasıl etkilediğini tespit etmek, 3) otsu ve odunsu türleri ağır metal biriktirme yetenekleri açısından değerlendirmek, 4) bitki örneklerinin ağır metal içeriği üzerine yıkama uygulamasının olası etkisini belirlemek, 5) hem seçili alanlar hem de uygulamalar neticesinde elde edilen veriler karşılaştırılarak bitki türlerinin ağır metal kirlilik profillerini ortaya çıkarmaktır. Bu amaçlarla; çalışmanın sonuçlarının bu alanda yapılacak çalışmalara öncülük etmesi hedeflenmiştir.

2. Materyal ve metot
2. Material and method

2.1. Çalışma alanı
2.1. Research area

Çalışma, Rize ilinin Merkez ve Güneysu ilçelerinde yer alan taş ocakları sahalarında gerçekleştirildi (Şekil 1). Güneysu ilçesindeki pasif taş ocağı, Merkez ilçesindeki aktif taş ocağı ve kontrol alanı olmak üzere üç farklı alandan örnekleme yapıldı (Tablo 1).



Şekil 1. Örneklem alanın haritası
Figure 1. *Map of the sample area*

Tablo 1. Örnek konumlarının koordinatları
Table 1. *Coordinates of sample locations*

Lokaliteler	Enlem	Boylam
Alan-1 (pasif)	40.947409°	40.538671°
Alan-2 (aktif)	40.964933°	40.650563°
Kontrol alanı (temiz)	40.876701°	40.580136°

2.2. Örnekleme ve hazırlık
2.1. Sampling and preparation

Alnus glutinosa (L.) Gaertn. subsp. *barbata* (C.A.Mey.) Yalt. (kara kızılağaç) Betulaceae familyasına ait, toprak kalitesini iyileştirme yeteneğiyle bilinen odunsu bir bitkidir. Bozulmuş orman ekosistemlerinde, *Alnus glutinosa* subsp. *barbata* önemli bir öncü türdür (Wolfe vd., 2022). Diğer ağaçlarla karşılaştırıldığında, çevresel strese karşı daha dayanıklıdır (Monzón & Azcón, 2001). *Alnus glutinosa* subsp. *barbata* doğal yaşam alanının yanı sıra, bozulmuş ortamlarda da büyüyebilir (Oliveira vd., 2005) ve bozulmuş bölgelerde bozulmuş toprağın kalitesinin geri kazanılmasına yardımcı olur (Świątek vd., 2019). *Juncus effusus* subsp. *effusus* L., Juncaceae familyasından çok yıllık bir bitkidir. Neredeyse küresel bir dağılıma ve çeşitli toksik metal(loid)lere karşı yüksek bir dirençle kanıtlanan geniş bir ekolojik toleransa sahiptir (Müller vd., 2020). Çok yıllık otsu bir bitki türü olan *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve ağaç türü olan *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'dan bitki örnekleri Haziran 2022 tarihinde üç farklı alandan alındı. Örnekleme alanlarına ilişkin bilgiler Tablo 1'de verildi. Örnekleme alanlarından toplanan bitki numuneleri ağır metal analizleri için laboratuvara getirildi.

Laboratuvara getirilen bitki örneklerinin yarısı saf su ile yıkandı, örnekler yıkanmış ve yıkanmamış olmak üzere iki farklı gruba ayrıldı. Her iki gruba ait bitki örnekleri 70 ℃'de 48 saat boyunca sabit ağırlığa ulaşana dek kurutuldu ve kurutulan örnekler porselen havanda toz haline getirildi. Toz haline getirilen örnekler ağır metal analizleri için hazırlandı.

2.3. Kimyasallar ve reaktifler
2.3. *Chemicals and reagents*

Mevcut araştırmada tercih edilen analitik sınıf kimyasallar ve reaktifler Merck, Darmstadt-Almanya firmasından temin edildi. Çözeltilerin ve seyreltmelerin hazırlanmasında ultra saf su (Human Corporation Zeneer power-I, 18,2 MΩ·cm) kullanıldı. Çalışmada kullanılan tüm laboratuvar malzemeleri 24 saat boyunca %20 HNO_3 çözelti banyosunda dekontamine edildi ve ultra saf suyla yıkandı. Malzemeler temiz hava koşullarında kurutuldu. Kalibrasyon standart çözeltilerinin hazırlanması, tüm analiz edilen elementleri (Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb ve Mn) içeren standart stok çözeltilerinin (Agilent 8500–6940 2A, 27 element karışımı) 1000 ppm'lik uygun seyreltmesinde gerçekleştirildi.

2.4. Metal analizi ve validasyon
2.4. Metal analysis and validation

Öğütücüden geçirilerek homojen hale getirilmiş ve kurutulmuş 0.2 g-0.5 g aralığındaki bitki numuneleri 7 mL suprapur %65 HNO_3 ve 1 mL suprapur %30 H_2O_2 içeren teflon kaplar içerisinde Milestone SK10 ünitesinde HPR-FO-47, HPR-FO-59, HPR-FO-61 prosedürlerine uygun şekilde çözündürüldü. Çözündürme esnasında 15 dakika içerisinde oda sıcaklığından 200 ºC sıcaklığa çıkma, ardından 15 dakika 200 ºC sabit sıcaklıkta kalma işlemi, ardından bir saat içinde oda sıcaklığına inme işlemi uygulandı. Çözelti, 50 mL'lik bir polipropilen falkon tüplerine aktarıldı ve 50 mL çizgisine kadar ultra saf su ile doldurulduk. Blank (kör) çözelti, numunelerle aynı prosedürle hazırlandı.

Elementlerin konsantrasyonları, Endüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma Kütle Spektrofotometresi (ICP-MS, Agilent 7700X) ile ölçüldü. Analiz her numune için üç kez gerçekleştirildi. ICP-MS ile elementleri tanımlamak için kullanılan çalışma koşulları Tablo 2'de verildi. Standart çözeltiler (27 element karışımı: 8500-6940 2A ve 8500-6940 Cıva) Agilent firmasından temin edildi ve kalibrasyon eğrilerinin çizilmesinde kullanıldı. Kalibrasyon eğrisinin doğrusallığı, tespit sınırı ve kantifikasyon sınırı, ICP-MS yöntemi ile bulunan ölçümlerin doğrulanmasına dahil edildi. Araştırılan ağır metallerin kalibrasyon eğrileri doğrusallık gösterdi. Eğri

denklemi ve korelasyon katsayısı (R) belirlendi ve yöntemin doğrusallığına dair bir gösterge sağlandı. Bu elementler için doğrusal kalibrasyon eğrileri 0.9997 ila 1.0000 arasında korelasyon faktörleri ile bulundu. Tespit sınırı (LOD) tanımı, blankın on ölçümünün standart sapmasının üç katı olarak yapıldı ve ardından kalibrasyon eğrisinin eğimine bölündü. Miktar tayini sınırı (LOQ) tanımı, LOD'nin 3 katı olarak yapıldı. Yöntemin duyarlılığı, tespit sınırı (LOD) ve miktar tayini sınırı (LOQ) değerlerinin belirlenmesi yoluyla değerlendirildi. İncelenen elementlerin LOD ve LOQ sonuçları Tablo 4'te sunulmaktadır. ICP-MS yönteminin gün içi ve günler arası kesinliği ve doğruluğu, kalite kontrol (25, 200 ve 400 ppm) örneklerinin üç tekrarı kullanılarak değerlendirildi. Yöntemin doğruluğu ve kesinliği, kontrol örneklerinin hem günlük hem de günlük olmayan analiz sonuçları için sırasıyla yüzdelik bağıl hata (RE%) ve yüzdelik bağıl standart sapma (RSD%) değerlerinin hesaplanması yoluyla incelendi. Kabul kriterleri, tatmin edici kesinlik ve doğruluğu göstermek için %15'in altındaki değerleri gerektiriyordu. Geri kazanım yüzdesi değeri için %80-120 aralığı kabul edilebilir aralıktır. Bu kriter, numunelerden elde edilen Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb ve Mn miktarlarının kabul edilebilir aralıkta olduğunu doğrulayarak, yöntemin analiz için uygulanabilirliğini ve güvenilirliğini daha da doğrular.

Kalite kontrolü üçlü ölçüm ve sertifikalı referans malzemeler kullanılarak gerçekleştirildi. Sertifikalı referans materyali (CRM) olarak IAEA-336 liken numunesi kullanıldı ve tüm elementler %90 doğrulukla ölçüldü. Tablo 3, ICP-MS sistemi tarafından belirlenen değerler ile sertifikalı konsantrasyon değerlerini göstermektedir. Bu çalışmada, EPA 6020 (Çevresel numunelerde ICP-MS ile çoklu element tayini) yöntemi kullanılarak 1 ppm dahili standart (ISTD Agilent 5188-6525), numunelerle birlikte sürekli olarak analiz edildi.

Tablo 2. ICP-MS cihazının çalışma koşulları
Table 2. *Operating conditions of the ICP-MS device*

Cihaz	Agilent 7700 x ICP-MS
RF Gücü	1550 W
RF Uyumu	2.1 V
Örnek Derinliği	8.0 mm
Örnek Alım Hızı	0.1 mL min^{-1}
Plazma Gaz Akış Hızı	15 L min^{-1}
Yardımcı Gaz Akış Hızı	1.0 L min^{-1}
Taşıyıcı Gaz Akış Hızı	0.95 L min^{-1}
He Gaz Akış Hızı	4.3 mL min^{-1}
Sprey Odası	Yumuşak Çift Geçişli Tip
Sprey Odası Sıcaklığı	2 °C
Meşale	Kuvarz Meşale

Tablo 3. Bitki (IAEA 336) standart referans materyali için sertifikalı ve ölçülen değerlerin (ppm) karşılaştırılması
Table 3. *Comparison of certified and measured values (ppm) for plant (IAEA 336) standard reference material*

Elementler	**Liken**				
	Sertifikalı Değerler	**Ölçülen Değerler**	**Geri Kazanım Yüzdesi (%)**	**R^2**	**%RSD**
As	630	624	99.11	1.0000	8.04
Cr	1060	1048	98.85	0.9999	2.07
Cu	3600	3540	98.34	1.0000	1.23
Mn	63000	62024	98.45	0.9999	0.71
Ni	1070	1075	100.50	0.9999	1.73
Pb	4900	4812	98.20	1.0000	2.70
Zn	30400	31838	104.73	0.9997	0.63
Fe	430000	432710	100.63	0.9999	0.72

2.5. İstatistiksel analiz
2.5. Statistical analysis

Elde edilen verilerin analizleri SPPS Version 29.0 (IBM SPSS Statistics for Windows, Armonk, NY) yazılımı kullanılarak yapıldı. Verilerin normal dağılımdan önemli ölçüde sapıp sapmadığını belirlemek için Kolmogorov-Smirnov (n>30) normallik testi kullanıldı. Normal olmayan dağılımın ardından veriler

parametrik olmayan Kruskal-Wallis ve Mann-Whitney U testleri kullanılarak analiz edildi. *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın lokalitelere göre ağır metal içeriklerinin değişimi Kruskal Wallis H testi ile test edildi. Lokaliteler, uygulamalar (yıkanmış-yıkanmamış) ve bitkiler arasındaki ağır metal içerikleri Mann Withney U testi ile karşılaştırıldı. Ağır metal konsantrasyonları arasındaki ilişkiler Spearman'ın Korelasyon analizi ile incelendi. Önemlilik düzeyi $P < 0.05$ olarak kabul edildi. Deneyler üç tekrarlı olarak gerçekleştirildi.

3. Bulgular
3. Results

Juncus effusus subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın ağır metal içeriklerinin lokalitelere göre istatiksel olarak önemli farklılık gösterip göstermediğini tespit etmek için uygulanan Kruskal Wallis H testi sonuçlarına bakıldığında sadece Ni ve Zn elementleri $P < 0.05$ seviyesinde, Cu ve Mn elementleri ise $P < 0.01$ seviyesinde önemli farklılıklar gösterdi (X^2 sırasıyla; 6.818; 7.587; 18.743 ve 23.983). Lokaliteler arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını belirlemek için Mann Withney U testi uygulandı. Pasif ve aktif alanlardan alınan bitki örneklerinin Fe ve Mn içeriklerinde $P < 0.05$ seviyesinde. Cu içeriğinde ise $P < 0.01$ seviyesinde anlamlı farklılıklar tespit edildi (sırasıyla; U=37.000, z= -2.021; U=36.000, z= -2.078 ve U=12.000, z= -3.464). Pasif ve kontrol (temiz) alanlardan alınan bitki örneklerinin Cu, Zn ve Mn içeriklerinde $P < 0.01$ seviyesinde anlamlı farklılıklar tespit edildi (sırasıyla; U=3.000, z= -3.984; U=27.000, z= -2.598 ve U=5.000, z= -3.868). Aktif ve kontrol (temiz) alanlardan alınan bitki örneklerinin Zn ve As içeriklerinde $P < 0.05$ seviyesinde, Ni ve Mn içeriklerinde ise $P < 0.01$ seviyesinde anlamlı farklılıklar tespit edildi (sırasıyla; U=36.000, z= -2.078; U=36.000, z= -2.078; U=27.500, z= -2.570 ve U=0.000, z= -4.157).

Bitki çeşitlerinin lokalitelere göre ağır metal içerikleri değerlendirildiğinde, en yüksek konsantrasyonlarının aktif taş ocakları alanından alınan örneklerde tespit edildiği, en düşük konsantrasyonların ise kontrol alanından alınan örneklerde olduğu belirlendi (Tablo 4). *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb ve Mn konsantrasyonları sırasıyla 0.808-1.604, 359.935-1119.938, 1.200-1.856, 12.925-38.491, 29.397-213.925, 0.059-0.205, 0.505-2.767 ve 100.952-430.408 ppm arasında değişmiş olup, ortalamaları ise sırasıyla 1.115, 644.681, 1.468, 22.285, 97.778, 0.121, 1.288 ve 264.152 ppm olarak belirlendi. Genel olarak ortalama ağır metal içerikleri Fe > Mn > Zn > Cu > Ni > Pb > Cr > As şeklinde tespit edildi (Tablo 4). Tüm örnekleme noktaları toplu olarak değerlendirildiğinde *Juncus effusus* subsp. *effusus*'un Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb ve Mn konsantrasyonları sırasıyla 0.361-1.380, 86.987-175.937, 0.315-1.832, 5.717-28.339, 29.009-112.281, 0.012-0.036, 0.115-0.226 ve 202.220-823.613 ppm arasında değişmiş olup, ortalamaları ise sırasıyla 0.642, 115.943, 0.932, 12.580, 71.269, 0.024, 0.169 ve 514.777 ppm olarak belirlendi. Genel olarak ortalama metal konsantrasyonları Mn > Fe > Zn > Cu > Ni > Cr > Pb > As şeklinde tespit edildi (Tablo 4).

Juncus effusus subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın ağır metal içeriklerinin uygulamaya göre (yıkanmış-yıkanmamış) istatiksel olarak önemli farklılık gösterip göstermediğini tespit etmek için Mann Withney U testi uygulandı. Yıkanmış ve yıkanmamış bitki örneklerinin Cr içeriği $P < 0.01$, Ni içeriği ise $P < 0.05$ seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar gösterdi (sırasıyla; U=80.000, z= -2.594 ve U=99.500, z= -1.978). Bitki türleri bireysel olarak değerlendirildiğinde, *Juncus effusus* subsp. *effusus*'un Ni ve As içerikleri $P < 0.05$, Cr, Fe ve Pb içerikleri ise $P < 0.01$ seviyesinde önemli farklılıklar gösterdi (sırasıyla; U=18.000, z= -1.987, U=18.000, z= -1.987, U=9.000, z= -2.782; U=9.000, z= -2.782 ve U=9.000, z= -2.782). *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın Cr içeriği $P < 0.05$, Ni içeriği ise $P < 0.01$ seviyesinde anlamlı farklılıklar gösterdi (sırasıyla; U=17.000, z= -2.075 ve U=9.500, z= -2.744). Tüm bitki çeşitlerinin uygulamalara göre ağır metal içerikleri değerlendirildiğinde, en yüksek konsantrasyonlarının yıkanmamış örneklerde tespit edildiği, en düşük konsantrasyonların ise yıkanmış örneklerde olduğu belirlendi (Tablo 5).

Bitkiler arasında ağır metal içerikleri bakımından herhangi bir farklılığın olup olmadığını belirlemek için Mann Withney U testi uygulandı. *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın Cr, Fe, Cu, As, Pb ve Mn içeriklerinde $P < 0.01$, Ni içeriklerinde ise $P < 0.05$ seviyesinde anlamlı farklılıklar tespit edildi (sırasıyla; U=45.000, z= -3.702; U=0.000, z= -5.125; U=57.000, z= -3.322; U=0.000, z= -5.125; U=0.000, z= -5.125; U=67.000, z= -3.006 ve U=90.000, z= -2.279). Sperman'ın sıralama korelasyon katsayısı analizine göre Cr içeriği ile Fe, Ni, Cu, As ve Pb içerikleri arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki bulundu (sırasıyla; $r_{sperman}$ =0.795, $P < 0.01$; $r_{sperman}$ =0.381, $P = 0.022$; $r_{sperman}$ =0.383, $P < 0.021$; $r_{sperman}$ =0.567, $P < 0.01$ ve $r_{sperman}$ =0.794, $P < 0.01$). Cr içeriği ile Zn içeriği arasında pozitif, Mn içeriği arasında negatif ve anlamsız ilişki bulundu (sırasıyla; $r_{sperman}$ =0.135, $P = 0.432$; $r_{sperman}$ = -0.294, $P < 0.82$).

Tablo 4. Lokalitelere göre bitki örneklerinde bazı ağır metallerin konsantrasyon değerleri (ppm) (Ortalama±SH)
Table 4. *Concentration values of some heavy metals in plant samples according to localities (ppm) (Average±SE)*

Juncus effusus* subsp. *effusus								
Lokaliteler	**Cr**	**Fe**	**Ni**	**Cu**	**Zn**	**As**	**Pb**	**Mn**
Kontrol alanı (temiz)	0.461±0.043	92.965±2.362	0.459±0.063	6.009±0.115	35.541±2.573	0.015±0.001	0.143±0.012	238.611±12.894
Alan-1 (pasif)	0.593±0.012	120.504±3.317	0.565±0.003	9.428±0.132	78.670±1.283	0.025±0.001	0.165±0.008	554.392±39.878
Alan-2 (aktif)	0.871±0.223	134.360±18.187	1.772±0.025	22.302±2.088	99.598±5.618	0.031±0.001	0.199±0.011	751.327±31.718
Genel	0.642±0.082	115.943±7.174	0.932±0.146	12.580±1.823	71.269±6.763	0.024±0.001	0.169±0.008	514.777±53.798
Minimum	0.361	86.987	0.315	5.717	29.009	0.012	0.115	202.220
Maksimum	1.380	175.937	1.832	28.339	112.281	0.036	0.226	823.613
Alnus glutinosa* subsp. *barbata								
Lokaliteler	**Cr**	**Fe**	**Ni**	**Cu**	**Zn**	**As**	**Pb**	**Mn**
Kontrol alanı (temiz)	0.924±0.057	411.296±19.038	1.376±0.044	15.439±2.057	32.657±0.975	0.078±0.005	0.562±0.022	116.512±5.966
Alan-1 (pasif)	1.130±0.115	572.743±59.626	1.462±0.036	19.217±1.360	85.462±4.593	0.107±0.012	0.973±0.044	278.606±9.415
Alan-2 (aktif)	1.290±0.044	950.005±52.753	1.566±0.129	32.198±1.527	175.215±11.286	0.178±0.009	2.329±0.177	397.338±14.851
Genel	1.115±0.056	644.681±60.450	1.468±0.048	22.285±1.963	97.778±14.776	0.121±0.011	1.288±0.192	264.152±28.515
Minimum	0.808	359.935	1.200	12.925	29.397	0.059	0.505	100.952
Maksimum	1.604	1119.938	1.856	38.491	213.925	0.205	2.767	430.408
LOD	0.029	0.603	0.026	0.125	1.673	0.045	0.038	0.035
LOQ	0.087	1.809	0.078	0.375	5.019	0.135	0.114	0.105

SH: Standart Hata; SE: Standard Error; LOD: Tespit Sınırı; LOQ: Miktar Tayini Sınırı

Tablo 5. Yıkanmış ve yıkanmamış bitki örneklerinde bazı ağır metallerin konsantrasyon değerleri (ppm) (Ortalama±SH)
Table 5. *Concentration values of some heavy metals in washed and unwashed plant samples (ppm) (Average±SE)*

				Juncus effusus* subsp. *effusus				
Uygulamalar	**Cr**	**Fe**	**Ni**	**Cu**	**Zn**	**As**	**Pb**	**Mn**
Yıkanmamış	0.850±0.130	133.633±11.209	1.001±0.207	14.291±3.200	78.281±10.269	0.027±0.002	0.193±0.008	577.161±82.056
Yıkanmış	0.433±0.033	98.253±3.853	0.863±0.215	10.869±1.777	64.257±8.755	0.020±0.002	0.145±0.008	452.392±67.780
Genel	0.642±0.082	115.943±7.174	0.932±0.146	12.580±1.823	71.269±6.763	0.024±0.001	0.169±0.008	514.777±53.798
Minimum	0.361	86.987	0.315	5.717	29.009	0.012	0.115	202.220
Maksimum	1.380	175.937	1.832	28.339	112.281	0.036	0.226	823.613
				Alnus glutinosa* subsp. *barbata				
Uygulamalar	**Cr**	**Fe**	**Ni**	**Cu**	**Zn**	**As**	**Pb**	**Mn**
Yıkanmamış	1.233±0.081	722.134±95.964	1.596±0.066	22.296±3.300	103.406±21.419	0.126±0.018	1.468±0.320	270.822±39.752
Yıkanmış	0.997±0.056	567.229±69.440	1.341±0.036	22.273±2.343	92.150±21.477	0.116±0.014	1.108±0.213	257.482±43.178
Genel	1.115±0.056	644.681±60.450	1.468±0.048	22.285±1.963	97.778±14.776	0.121±0.011	1.288±0.192	264.152±28.515
Minimum	0.808	359.935	1.200	12.925	29.397	0.059	0.505	100.952
Maksimum	1.604	1119.938	1.856	38.491	213.925	0.205	2.767	430.408

SH: Standart Hata; SE: Standard Error

4. Tartışma
4. Discussion

Çalışmada, aktif ve pasif taş ocaklarının bulunduğu alanlar ile kontrol alanı olarak seçilen temiz alandan toplanan çok yıllık otsu bir bitki olan *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve odunsu bir tür olan *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb ve Mn içerikleri (ppm) tespit edilmiş olup, literatür ışığında değerlendirilmiştir.

Bitki kökleri ağır metallere maruz kalan en önemli organlar olup toprakta bulunan ağır metalleri bitki bünyesine alırlar. Çoğunlukla kökler ile alınan bu kirleticiler bitki yaprakları ile de bitki bünyesine giriş yapabilmektedirler. Küresel düzeyde kirliliğe neden olan ağır metaller insan sağlığı ve tüm canlılar için ciddi tehditler ve riskler oluşturur. Taş ocağı faaliyetleri, diğer pek çok insan faaliyeti gibi çevre üzerinde önemli etkilere sahiptir (Okafor, 2006).

Bu çalışmada aktif taş ocağının etrafında yetişen *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın sırasıyla ortalama Cr içerikleri 0.871-1.290 ppm, Fe içerikleri 134.360-950.005 ppm, Ni içerikleri 1.772-1.566 ppm, Cu içerikleri 22.302-32.198 ppm, Zn içerikleri 99.598-175.215 ppm, As içerikleri 0.031-0.178 ppm, Pb içerikleri 0.199-2.329 ppm ve Mn içerikleri ise 751.327-397.338 ppm olarak tespit edilmiş olup en yüksek ağır metal içerikleri bu alanlarda yetişen bitkilerde bulundu. Greksa vd. (2023)'nin yapmış oldukları çalışmalarında, *Juncus effusus* L. yapraklarının örnekleri arasında önemli bir fark ($P < 0.05$) olduğunu ve toplam Zn konsantrasyonunun yapraklar için 36.2 ppm ile 264.59 ppm arasında ve kökler için 53.20 ppm arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. *J. effusus*'un sürgünlerindeki metal(loid) içeriklerine bakıldığında, As için 0.001-0.002 ppm, Ni için 0.035-0.313 ppm, Pb için 0.00024-0.00041 ppm, Zn için 35.08-212.27 ppm, Cu için 58.39-347.07 ppm, Fe için 666.79-2082.25 ppm arasında değişen konsantrasyonlar içerdiği tespit edilmiştir (Khan vd., 2024). *J. effusus*'un sürgün ve köklerinde Pb, Cu ve Zn içerikleri sırasıyla 201.03-315.84 ppm, 26.98-28.11 ppm ve 1361.49-1193.41 ppm olarak belirlenmiştir (Mou vd., 2021). Aynı cinse ait *Juncus rigidus* Desf.'un rizomundaki Pb ve Ni konsantrasyonları sırasıyla 3.55-15.55 ve 0.10-0.30 ppm arasında yer almıştır (Hamza, 2022). Ugulu vd. (2024) *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın Cr ve Cu içeriklerini sırasıyla 0.938 ve 9.918 ppm olarak tespit etmişlerdir. Farklı habitat ortamlarında yetişen *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın Cu, Pb ve Zn konsantrasyonlarının sırasıyla 12.8-34.2, 1.84-9.72 ve 57.1-110 ppm arasında değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir (Pecina vd., 2020). *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'da Mn içeriğinin 507-2803 ppm, Zn içeriğinin 61-457 ppm ve Pb içeriğinin ise 0.0-34.8 ppm arasında değiştiğini tespit etmişlerdir (Grygar vd., 2023). Hrdlička ve Kula (2024), *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın Mn içeriğinin 400–1000 ppm olarak belirlenen toksisite sınırını aştığını, Zn içeriğinin 250 ppm fitotoksisite sınırının üzerinde olmadığını, Cu içeriğinin yapraklarda 40 ppm veya 100 ppm olan kritik seviyenin üzerinde olmadığını, Pb içeriğinin ise değişkenlik gösterdiğini ifade etmişlerdir. Yan vd. (2016) yaprak döken ağaç yapraklarında daha düşük Zn içeriği değerleri bildirmişlerdir. Karasal bitkilerde çeşitli ağır metallerin normal konsantrasyon aralıklarının Cr için 0.1-18 ppm, Cu için 5-30 ppm arasında değiştiği literatürdeki bazı çalışmalarda bildirilmiştir (Zayed & Terry, 2003; Kabata-Pendias & Pendias, 2011). Literatürde farklı odunsu türler üzerinde yapılan çalışmalar ele alındığında, evsel, endüstriyel ve ağır metal kirliği oluşturan birçok farklı yerlerden toplanan *Alnus nitida* (Spach) Endl.'nın ağır metal birikim miktarı, bitkinin farklı kısımlarında değişiklik göstermiştir. En fazla ağır metal birikimi yapraklarda gözlemlenirken, en düşük birikim kökte (yapraklar > sürgün > kabuk > kök) görülmüştür. Cu, Mn, Zn, Cr ve Pb konsantrasyonları sırasıyla 78.9, 269.1, 324.45, 2194.1 ve 321.9 ppm olarak tespit edilmiştir (Haq vd., 2022). İki farklı plantasyondan seçilen *Pinus brutia* Ten.'nın Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Ni ve Pb içeriklerinin 2.139-6.622 ppm, 76.823-167.778 ppm, 66.227-45.380 ppm, 12.915-24.400 ppm, 0.427-0.674 ppm, 1.115-2.759 ppm ve 0.433-0.618 ppm, *Quercus trojana* Webb'nın Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Ni ve Pb içeriklerinin 3.081-5.967 ppm, 90.140-166.090 ppm, 24.519-97.397 ppm, 17.677-18.357 ppm, 0.442-0.721 ppm, 0.695-4.058 ppm ve 0.315-0.765 ppm, *Fraxinus ornus* L.'un Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Ni ve Pb içeriklerinin 3.395-4.791 ppm, 127.363-181.301 ppm, 24.911-22.138 ppm, 17.055-19.421 ppm, 0.547-0.739 ppm, 0.666-1.705 ppm ve 0.487-0.690 ppm ve *Robinia pseudoacacia* L.'nın Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Ni ve Pb içeriklerinin 2.670-5.791 ppm, 101.607-195.950 ppm, 21.918-27.669 ppm, 15.181-21.985 ppm, 0.456-0.881 ppm, 0.550-2.154 ppm ve 0.271-0.832 ppm arasında değiştiği ifade edilmiştir (Samara vd., 2022). *Betula pendula* Roth'da yaprak Mn içeriği değerleri 118-9743 ppm (Hrdlička & Kula, 2004), 284-1790 ppm (Wisłocka vd., 2006) ve 6956-10852 ppm (Wildová vd., 2021) aralığında değişmişken; *Larix decidua* Mill. için aralık 9689-13508 ppm ve *Vaccinium myrtillus* L. için 5982-12172 ppm (Wildová vd., 2021) olarak tespit edilmiştir. Lorenc-Plucinska vd. (2013), *Alnus incana* (L.) Moench (gri kızılağaç) ve *Alnus glutinosa* (siyah kızılağaç) fidelerinin Cu ve Pb konsantrasyonları sırasıyla 1510 ppm ve 490 ppm'e kadar yüksek olan topraklarda büyüyebildiklerini ifade etmişlerdir. Yapılan çalışmada hem bitki türlerinin kendi içlerindeki hem de bitki türleri arasındaki ağır metal içeriklerinin değişken olduğu, aktif ve pasif taş ocakları ile bağlantısı olmayan kontrol alanındaki bitkilerde bile ağır metallerin izlenildiği görüldü. En yüksek konsantrasyonların ise aktif taş ocağı alanında yetişen bitkilerde olduğu tespit edildi. Bu durum ağır metallerin konsantrasyonunun ve hareketliliğinin çeşitli faktörlere bağlı olması ile açıklanabilir. Ayrıca bunlara kaynaktan gelen kirleticilerin sayısı, kaynaktan uzaklık, hava sıcaklığı, mevcut nem, yağışın zamansal ve mekânsal dağılımı, hava kararlılığı ve rüzgarın hızı ve yönü dahil olabilir. Yukarıda belirtilen kontrol faktörlerine bağlı olarak, bazı kirleticiler

emisyon kaynağından binlerce kilometre uzağa kadar seyahat edebilir (Yin vd., 2011). Özellikle bazı odunsu bitki türleri yapraklarında risk unsurlarını biriktirebilir (Matys Grygar vd., 2021).

Ugulu vd. (2024) çalışmalarındaki otsu ve odunsu türlerin Cr ve Cu konsantrasyonlarının sırasıyla 0.170-8.649 ve 1.559-19.757 ppm arasında değiştiğini, ortalama konsantrasyonları ise 1.90695 ve 7.68473 ppm olarak ifade etmişlerdir. Grygar vd. (2023) çalışmalarındaki otsu bitkilerin genellikle odunsu bitkilerden daha az Mn ve Zn edindiğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde çalışmamızdaki otsu tür olan *Juncus effusus* subsp. *effusus*'un ağır metal içeriklerinin, odunsu bir tür olan *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın ağır metal içeriklerinden daha az olduğu tespit edildi (Tablo 4). Ağaçlar elementleri emme ve tutma yeteneğine sahip uzun ömürlü organizmalar olduğundan (Mankovská vd., 2004), bitki yapraklarındaki ağır metallerin konsantrasyonunun izlenmesi kirlenmiş bölgelerdeki en etkili biyolojik izleme uygulamalarından biridir. Yapraklarda bu birikimin mümkün olmasının nedeni, bu bitkilerin belirli hücre bölmelerinde ve hücre duvarlarında kompleks oluşturarak ve sekestrasyon yaparak risk unsurlarını detoksifiye edebilmesidir (Angulo-Bejarano vd., 2021). Sood vd. (2012), farklı bitki türleri veya bazı bitki türleri ve/veya türleri arasındaki birikim farkının, bunların tolerans seviyesinden kaynaklandığını bildirmiştir. Ayrıca, bu farkın fitoremediasyon potansiyeli, kimyasal türler ve metallerin başlangıç konsantrasyonu, sıcaklık, pH redoks potansiyeli, tuzluluk ve ağır metaller arasındaki etkileşimin sonucu olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmada odunsu tür olan *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın elementleri daha fazla oranda biriktirdiği açıktır ve bu durum kirliliğin ortaya çıkarılması için biyoizlenim imkanı sağlamaktadır.

Juncus effusus subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın sırasıyla yıkanmamış bitki sürgün ve yapraklarının ağır metal içerikleri yıkanmış sürgün ve yapraklara göre daha yüksekti (Tablo 5). Cezayir'de gerçekleşen bir çalışmada, üç farklı lokaliteden üç yıl boyunca alınan *Juncus effusus*'un yıkanmış kök ve sürgünlerinde sırasıyla Pb değerleri 3.47-10.25 ppm ve 6-10.97 ppm iken, Zn değerleri ise 21.46-63.15 ppm ve 31.54-46.38 ppm arasında değiştiği tespit edildi (Boukaka & Mayache, 2020). *Juncus* sp.'nin yıkanmış bitki dokularının (tüm bitki) Cr, Cu, Fe, Mn, Pb ve Zn içerikleri sırasıyla 0.205, 11, 461, 79, 9.919 ve 15.759 ppm olarak tespit edildi (Zare vd., 2020). Guney vd. (2023) farklı ağaç ve çalı türlerinde ve bu bitkilerin organlarında Pb ve Zn konsantrasyonlarının değişimini araştırdıkları çalışmalarında, en yüksek Pb ve Zn konsantrasyonunu sırasıyla 11.794 ppm ile *Tilia tomentosa* Moench'in yıkanmamış yapraklarında ve 0.063 ppm ile *Acer negundo* L.'nin yıkanmamış yapraklarında tespit etmişlerdir. Yıkanmış yaprak analizi, yalnızca yaprağın ağır metal içeriğini gösterirken, yıkanmamış yaprak analizi hem yapraktaki hem de yüzeyinde birikmiş ağır metal içeriğini yansıtır (Yaşar, 2009). Çalışmadaki her iki türün yıkanmamış örneklerinde ağır metal seviyesinin fazla oluşu bu durumu doğrular niteliktedir. Yıkanmamış örneklerin ağır metal içeriklerinin fazla olması, ağır metallerin zamanla bitki yapılarında biriktiğini göstermektedir.

Türkiye genelindeki taş ocaklarındaki ağır metallerin konsantrasyonu, jeolojik ve antropojenik faktörlerden etkilenerek önemli ölçüde değişmektedir. Çalışmalar, özellikle Orta Anadolu ve Karadeniz gibi bölgelerdeki taş ocaklarının, ekolojik ve sağlık riskleri oluşturan çeşitli düzeylerde ağır metal kirliliği sergilediğini göstermiştir. Üç farklı taş ocağından (Polatlı, Beylikova ve Sivrihisar) alınan sepiolit örnekleri üzerinde yapılan bir çalışmada ortalama Al, Fe ve Pb içerikleri 5456,5 ppm, 3831,5 ppm ve Pb 5,3 ppm olarak rapor edilmiştir. Beylikova ocağından alınan çoğu örnek kabul edilebilir sınırlar içinde kalsa da potansiyel sağlık risklerini gösteren birkaç metal için endişe verici zenginleştirme faktörleri göstermiştir (Hançerlioğulları vd., 2023). Kuzeybatı Karadeniz bölgesindeki terk edilmiş cıva ocağında son derece yüksek arsenik ve cıva konsantrasyonları tespit edilmiş olup önemli ekolojik risklerin mevcut olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca bu metaller için kontaminasyon faktörlerinin çok yüksek olduğu belirlenmiş, bu durumun geçmiş madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan ciddi çevresel etkilere işaret ettiği üzerine dikkat çekilmiştir (Horasan vd., 2021). Ifeoma vd. (2014) hem topraktaki hem de bitkilerdeki ağır metal konsantrasyonlarının, taş ocağı sahasının yakınında en yüksek seviyede olduğunu ve mesafeyle birlikte azaldığını ifade etmişlerdir. Benzer şekilde, Ishiagu taş ocağında, odunsu bitki *Milicia excelsa*'daki Zn, Pb ve Cd'nin en yüksek konsantrasyonları, taş ocağına en yakın olarak kaydedilmiştir (Ogbonna vd., 2011). Nijerya'da, taş ocağı sahalarına yakın tıbbi bitkiler, kontrol sahalarındaki bitkilere kıyasla daha yüksek ağır metal konsantrasyonları içermiştir (Ogbonna vd., 2020). Taş ocak alanları çevresindeki bitkilerde ağır metallerin konsantrasyonu genellikle yüksek bulunmuştur (Ekpo vd., 2012). Bu çalışmada, aktif taş ocağının olduğu alandaki bitkiler, pasif taş ocağı ve kontrol alanının olduğu alandaki bitkilerden önemli ölçüde daha yüksek Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb ve Mn içeriklerine sahipti (Tablo 4). Bu, taş ocağı sahasında gerçekleştirilen taş ocağı faaliyetlerinin bir sonucu olabilir. Ayrıca başka bir nedeni de metallerin topraktan köke hareketi, metal emilimi ve taşınması, toz parçacıklarının yapraklara yerleşmesidir (Ediagbonya vd., 2021). Taş ocak sahasından kaynaklanan hava

kirliliği, toksik olabilen ağır metaller içerir, stabildirler ve parçalanamaz veya yok edilemezler ve bu nedenle bitki ve orman toprağında birikme eğilimindedirler (Asati vd., 2016). Taş ocak sahasından kaynaklanan hava kirliliği bitkiler için yaprak yüzeylerine yerleşme açısından sorunlara neden olur ve ayrıca bitkiler üzerinde engel oluşturma ve iç yapılarını tahrip etme, kütikül ve yaprakların aşınması gibi fiziksel etkilere ve ayrıca hayatta kalmayı etkileyebilecek kimyasal etkilere de sahip olabilir (Lameed & Ayodele, 2010). Taş ocak sahasından salınan toz sadece bitki ve toprak üzerinde birikmez, aynı zamanda çevre için toksik olan ağır metaller içerir. Ayrıca, metallerin birikimi ve dağılımının metal biyoyararlanımına, bitki metabolizmasına ve ayrıca kirlenmiş alanlarda büyüyen mikroplara bağlı olduğu bildirilmektedir (Chowdhary vd., 2018).

Bu çalışmada, *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın ortalama genel Pb içerikleri sırasıyla 0.169 ve 1.288 ppm olarak tespit edilmiştir. Bitkilerde maksimum izin verilebilir kurşun sınırı Dünya Sağlık Örgütü'ne göre 10 ppm'dir (Dabanovic vd., 2016). Çalışmada analiz edilen örneklerin kurşun değerleri maksimum izin verilebilir limitin altındadır. *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın ortalama genel Cr içerikleri sırasıyla 0.642 ve 1.115 ppm olarak tespit edilmiştir. Maksimum izin verilebilir krom sınırı 1.3 ppm'dir (Dabanovic vd., 2016). Çalışmada analiz edilen örneklerin krom değerleri maksimum izin verilebilir limitin altındadır. *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın ortalama genel Ni içerikleri sırasıyla 0.932 ve 1.468 ppm olarak tespit edilmiştir. Maksimum izin verilebilir nikel sınırı 10 ppm'dir (Dabanovic vd., 2016). Çalışmada analiz edilen örneklerin nikel değerleri maksimum izin verilebilir limitin altındadır. Bitkilerin toprak üstü kısımları genellikle 1 ppm'in altında düşük As konsantrasyonları içerir (Kabata-Pendias & Pendias, 2011). *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın ortalama genel As içerikleri sırasıyla 0.024 ve 0.121 ppm olarak tespit edilmiştir. Çalışmada analiz edilen örneklerin arsenik değerleri literatürde belirtilen limitin altındadır. *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın ortalama genel Cu içerikleri sırasıyla 12.580 ve 22.285 ppm olarak tespit edilmiştir. Maksimum izin verilebilir bakır sınırı 10 ppm'dir (Dabanovic vd., 2016). Çalışmada analiz edilen örneklerin bakır değerleri maksimum izin verilebilir limitin üstündedir. *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın ortalama genel Mn içerikleri sırasıyla 514.777 ve 264.152 ppm olarak tespit edilmiştir. Maksimum izin verilebilir mangan sınırı 200 ppm'dir (Dabanovic vd., 2016). Çalışmada analiz edilen örneklerin mangan değerleri maksimum izin verilebilir limitin üstündedir. *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın ortalama genel Fe içerikleri sırasıyla 514.777 ve 264.152 ppm olarak tespit edilmiştir. Maksimum izin verilebilir demir sınırı 20 ppm'dir (Shah vd., 2013). Çalışmada analiz edilen örneklerin demir değerleri maksimum izin verilebilir limitin üstündedir. *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın ortalama genel Zn içerikleri sırasıyla 71.269 ve 97.778 ppm olarak tespit edilmiştir. Maksimum izin verilebilir çinko sınırı 50 ppm'dir (Dabanovic vd., 2016). Çalışmada analiz edilen örneklerin çinko değerleri maksimum izin verilebilir limitin üstündedir. Çalışmada ele alınan *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'da, morfolojik olarak herhangi bir toksisite görüntüsünün olmaması maruz kaldıkları ağır metal seviyesini tolere edebildiğini düşündürmektedir. Yapılan çalışmalar bazı bitkilerin dokularında herhangi bir toksisite belirtisi göstermeden önemli miktarda metal biriktirdiğini göstermektedir (Padmapriya vd., 2016). Literatürde çoğu elementin toksisite sınır değerleri belirlenmiş olsa da bu sınırlar her bitki türü için değişkenlik gösterebilir. Öncelikle bitkinin otsu veya odunsu yapıda olması, her elemente karşı farklı tolerans seviyelerine sahip olması ve genetik özellikleri nedeniyle bu değişkenlik ortaya çıkabilir (Yaşar, 2009).

Çevresel ortamlarda ve biyolojik sistemlerde ağır metaller arasındaki korelasyon, önemli bir araştırma alanıdır. Bu ilişki, genellikle metal iyonlarının ortak kaynaklardan gelmesi, benzer taşınım mekanizmalarına sahip olması veya birbirleriyle etkileşime girerek hareketliliklerini ve biyoyararlanımlarını değiştirmesiyle oluşur. Korelasyon ifadesi +1 ile -1 arasındaki değişimdir. 0.5 ile 1 arasındaki ifadeler yüksek korelasyonları, 0.3 ile 0.5 arasındaki ifadeler orta korelasyonları, 0.0 ile 0.3 arasındaki ifadeler zayıf ve değersiz korelasyonları gösterir (Tatar vd., 2019). Bu çalışmada elementler arasındaki korelasyonlar incelendiğinde, her iki bitki türünün Cr elementi ile Fe, Ni, Cu, As ve Pb elementleri arasındaki ilişkinin pozitif ve anlamlı olduğu, Zn ile ilişkinin pozitif ve anlamsız, Mn ile ilişkinin ise negatif ve anlamsız olduğu tespit edilmiştir. Elementler arasındaki ilişkinin seviyesine bakıldığında Cr ile Fe, As ve Pb elementleri yüksek seviyede, Cr ile Ni ve Cu elementleri orta seviyede, Cr ile Zn ve Mn elementleri ise düşük seviyede korelasyon göstermiştir. Ağır metaller arasındaki korelasyon, bu metallerin kaynakları ve taşınım yolları hakkında bilgi sağlar. Pozitif korelasyon, ilgili elementlerin ortak bir kaynağa sahip olduğunu, taşınım sırasında birlikte hareket ettiğini ve benzer davranış sergilediğini gösterirken; negatif korelasyon, bu elementlerin birbirlerinden farklı davranışlar gösterdiğini ve farklı kaynaklardan geldiğini ifade eder (Leventeli vd., 2019; Yalcin vd., 2019; Nodefarahani vd., 2020; Binici vd., 2021; Yalçın, 2021). Ağır metaller arasındaki korelasyon genellikle ortak kirlilik

kaynaklarından kaynaklanmaktadır. Örneğin, madencilik, metal sanayi ve endüstriyel atıklar, çoğunlukla birden fazla ağır metali içeren kirleticiler yaymaktadır. Araştırmalar, Pb, Cd, Zn ve Cu elementlerinin sıklıkla bir arada bulunduğunu göstermektedir (Alloway, 2013). Toprak ve su ortamlarında ağır metallerin hareketliliği ve biyoyararlanımı, büyük ölçüde pH seviyesi, organik madde miktarı ve diğer kimyasal bileşenlerle bağlantılıdır. Örneğin, As ve Fe arasında genellikle güçlü bir ilişki vardır; çünkü arsenik, demir oksitler tarafından tutulur ve redoks koşullarına bağlı olarak hareket kazanabilir (Smedley & Kinniburgh, 2002). Bazı ağır metaller, bitkiler ve mikroorganizmalar tarafından benzer biyokimyasal mekanizmalarla alındığından birbirleriyle korelasyon gösterebilir. Örneğin, Zn ve Cd, kimyasal özelliklerinin benzerliği nedeniyle bitkiler tarafından genellikle birlikte absorbe edilir ve aynı taşıma sistemleri aracılığıyla alınır (Clemens vd., 2013). Ağır metallerin bir arada bulunması toksik etkilerini artırabilir veya azaltabilir (Tchounwou vd., 2012). Toprak pH'sı, ağır metallerin çözünürlüğünü ve hareketliliğini önemli ölçüde belirleyen en temel faktörlerden biridir. Pb, Zn ve Cu, asidik toprak koşullarında benzer çözünebilirlik özellikleri sergilediklerinden yüksek korelasyon göstermektedir (Violante vd., 2010). Cd ve Zn, benzer kimyasal özellikleri dolayısıyla pH değişimlerine paralel tepkiler verir ve pH 5'in altında birlikte hareket etme eğilimi gösterir. Cu ve Zn, organik madde ile benzer bağlanma mekanizmalarına sahip olduklarından organik içeriği yüksek topraklarda korelasyonları artabilir (He vd., 2015). Kil mineralleri, ağır metallerin adsorpsiyonunda önemli rol oynar ve farklı metallerin birbirleriyle korelasyonunu etkileyebilir (Bradl, 2004; Park vd., 2011). Toprağın katyon değişim kapasitesi, ağır metallerin adsorbe edilme kapasitesini belirler ve farklı metallerin birbirleriyle rekabet halinde olmasına yol açabilir ve bazı metallerin negatif korelasyon göstermesine sebep olabilir. Şaşmaz vd., (2015) elementler arasında negatif ilişki (antagonizm) olduğunu bildirdi: Fe'nin Na, P, S, Mn ile ilişkisi ve Na ile P'nin Cu, Pb, Zn, As ile ilişkisi ve S'nin Cu, Pb ve Mn ile ilişkisi Cu, Pb, As ile ilişkisi. Bunun aksine, bu çalışmada sadece Mn elementi hariç diğer elementler arasında pozitif bir ilişki vardı. Benzer şekilde, Tatar vd. (2019) ise yaptıkları çalışmalarında tüm elementler arasında pozitif ilişkinin olduğunu ifade etmişlerdir. Sinerjik ve antagonistik etkiler Khan vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada da bildirilmiştir. Çeşitli metal uygulamalarındaki farklı tepkiler, aynı metalin değişken konsantrasyonlarda farklı tepki vermesi nedeniyle sinerjik ve antagonistik etkilerden kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, etkiler bitki türleri arasında da değişiklik göstermiş ve bu durum bitkilerin alım mekanizmalarıyla bağlantılı olabilir (Khan vd., 2016). Bazı elementler diğerlerinin emilimini artırırken diğerleri azaltır. Büyüme ortamındaki bir element, çevredeki diğer elementlerin etkilerini arttırarak (sinerjistik), azaltarak (antagonistik) veya ihmal düzeyinde daha hafif (basit etkileşim) etki yoluyla bitki tarafından emilimi etkileyebilir (Paustenbach, 2000). Elde edilen sonuçlar, ağır metal açısından yoğun ortamlarda yetişen bitkilerin alım kapasitesinde sinerjik bir etki olduğunu ve bitkilerin bu element iyonlarının birikim kapasitelerini artırdığını gösterdi. Cu, Cd, Pb ve As gibi ağır metallerin gerek madencilik faaliyetleri gerekse gübre, pestisit kullanımı başta olmak üzere topraklara karıştığı düşünüldüğünde (Dai vd., 2018), aralarında güçlü korelasyon saptanan söz konusu metallerin de benzer antropojenik kaynaklarla örneklem yapılan alanlara girdiği düşünülmektedir.

Ağır metaller atmosfere ulaştıktan sonra çökelerek toprağa veya su kaynaklarına karışabilir. Topraktaki ağır metaller, bitkiler aracılığıyla besin zincirine dahil olup insan ve hayvanların vücuduna geçebilir. Ayrıca, gıda yoluyla doğrudan insanlara ulaşabileceği gibi, hayvanların tükettiği yemler aracılığıyla da dolaylı olarak insanlara taşınabilir. Bunun yanı sıra, ağır metaller göller, akarsular ve nehirler gibi yüzey sularını kirletebildiği gibi, topraktan sızarak yer altı sularına da zarar verebilir. Ağır metal içeriği yüksek olan suların tarımda kullanılması, bitkiler, hayvanlar ve insanlar üzerinde ciddi olumsuz etkilere yol açabilir (Yerli vd., 2020). Ağır metaller bitki büyümesini engelleyebilir ve besin zincirlerini bozabilir, bu da biyolojik çeşitliliğin azalmasına yol açabilir (Abdullah vd., 2024; Fulke vd., 2024). Ağır metallerin toprak, su kaynakları ve diğer canlılar üzerindeki etkileri oldukça çeşitlidir ve bu durum ciddi çevresel sorunlara yol açabilir. Endüstriyel atıklar, madencilik faaliyetleri ve tarımsal ilaçlar gibi kaynaklardan suya karışan ağır metaller, su ekosistemleri için büyük bir tehdit oluşturur. Bu metaller, su canlılarının dokularında birikerek biyomagnifikasyona yol açar ve besin zinciri boyunca yoğunlukları giderek artar. Bunun sonucunda, suyun kalitesi bozulur ve ekosistemdeki doğal denge zarar görür (Şavran & Küçük, 2022). Ağır metaller, toprağın biyolojik yapısını bozarak verimliliğin düşmesine neden olur. Mikroorganizmaların faaliyetlerini engelleyerek organik madde döngüsünü sekteye uğratır ve bitkilerin gelişimini olumsuz etkiler (Aktop & Çağatay, 2020; Yerli vd., 2020; Şavran & Küçük, 2022). Ağır metaller besin zincirine toprak, su ve hava yoluyla girerek canlı organizmalarda birikime yol açar ve besin zinciri aracılığıyla diğer canlılara geçebilir. Zehirli metaller organizmalarda birikerek insanlar da dahil olmak üzere daha yüksek trofik seviyeleri etkiler (Pant & Singh, 2024; Bargah, 2024). Kirlenmiş topraklarda yetiştirilen sebzeler, yumrular, meyveler ve kuruyemişler gibi gıda ürünleri toksik ağır metaller biriktirebilir. Bu alanlardaki toprak, bu toksik maddelerin başlıca kaynağıdır. İnsanların toksik ağır metallere maruz kalması toz soluma, kirlenmiş su ve gıda ürünlerinin alımı yoluyla gerçekleşir. Gıda yoluyla ağır

metaller çeşitli organlarda birikerek karaciğer ve böbreklerde metabolizmanın değişmesine, kardiyovasküler, sinir ve kemik bozukluklarına neden olur (Mahmood & Malik, 2014). Sonuç olarak, ağır metallerin çevrede birikimi, toprak ve su kaynaklarının kalitesini düşürerek tüm ekosistemi ve insan sağlığını tehdit eder. Bu nedenle, ağır metal kirliliğinin önlenmesi ve mevcut kirliliğin azaltılması büyük önem taşır.

Taş ocaklarının etkili yönetimi, önemli çevresel ve sağlık riskleri oluşturan ağır metal kirliliğini azaltmak için çok yönlü bir yaklaşım gerektirir. Mevcut düzenlemelerin bu zorlukları kapsamlı bir şekilde ele almak için iyileştirilmesi gerekmektedir. Ağır metal kirliliğinin izlenmesi ve kontrolü, katı önlemlerin uygulanmasını, düzenleyici çerçevelerin güncellenmesini ve kirlilik değerlendirmesi ve önlenmesi için gelişmiş teknolojilerin benimsenmesini içerir. Ağır metallerin çevreye ve ekosistemlere olan zararlarını en aza indirmek için yönetimsel önlemler ve politika değişiklikleri büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda taş ocaklarının işletilmesi sırasında kirliliği erken tespit etmek ve ele almak için indüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS), atomik absorbsiyon spektrofotometrisi (AAS) gibi teknikler kullanılarak sahanın toprak ve su kalitesinin düzenli olarak değerlendirilmesi gerekmektedir (Itam vd., 2024). Madencilik faaliyetleri sonucunda oluşan ağır metal içeren atıkların çevreye zarar vermemesi için etkin atık yönetimi politikaları hayata geçirilmelidir (Li vd., 2013). Çevresel yönetmeliklerin güncellenmesi ve ağır metal kirliliğinin önlenmesi adına; toprak ve suda izin verilen ağır metal konsantrasyonlarına daha sıkı sınırlar koyarak mevcut düzenlemelerin güçlendirilmesi ve bunların uluslararası standartlarla uyumlu olması sağlanmalıdır (Singh vd., 2024). Ağır metal kirliliğine yol açabilecek malzemelerin uygunsuz şekilde atılmasını önlemek için taş ocağı operasyonlarında atık yönetimi için kapsamlı yönergeler geliştirilmelidir (Srinivas, 2023). Ayrıca, uygunsuzluk cezaları da dahil olmak üzere çevre düzenlemelerine uyumu sağlamak için uygulama mekanizmalarının geliştirilmesi gerekmektedir (Hu vd., 2014). Son olarak; ağır metal kirliliğini izlemek ve kontrol altına almak için gerçek zamanlı olarak ağır metal seviyelerini izlemek için sürekli izleme sistemleri kurulmalı ve sonuçlar kamuoyuyla paylaşılmalıdır. Ağır metallerin toprak ve sudan arındırılması için bakteriler, algler ve hiperakümülatör yeteneği yüksek bazı bitkiler etkili bir şekilde kullanılmalıdır. Metal sanayisi ve madencilik sektöründe ağır metal salınımını en aza indirmek amacıyla gelişmiş filtreleme sistemlerinin kullanımı zorunlu tutulmalıdır. Bu önlemler ve düzenleyici değişiklikler hayati önem taşısa da, taş ocağı operasyonları üzerindeki daha sıkı düzenlemelerin ekonomik etkilerini de dikkate almak önemlidir. Çevre korumayı ekonomik uygulanabilirlikle dengelemek, endüstriyel büyümeyi engellemeden ağır metal kirliliğini en aza indiren sürdürülebilir uygulamalar geliştirmek için endüstri paydaşları ve düzenleyici kurumlar arasında iş birliği gerçekleştirmek gerekli ve önemlidir.

5. Sonuç
5. Result

Bu çalışma, *Juncus effusus* subsp. *effusus* ve *Alnus glutinosa* subsp. *barbata* bitkilerinin ağır metal içerikleri üzerine Rize ilindeki aktif ve pasif taş ocaklarının etkisini ortaya çıkaran ilk çalışmadır. *Alnus glutinosa* subsp. *barbata* Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As ve Pb elementlerini en yüksek oranda biriktirirken, *Juncus effusus* subsp. *effusus* ise sadece Mn elementini en yüksek oranda biriktirmiştir. Bitkilerin Cu, Mn, Fe ve Zn içerikleri, sürdürülebilir büyümeleri için izin verilen sınır değerin üzerinde bulunmuştur. Uygulama sonuçları ele alındığında, yıkanmamış yaprakların daha yüksek oranda ağır metal içerdikleri tespit edilmiştir. Sperman'ın sıralama korelasyon katsayısı analizine göre Cr içeriği ile Fe, Ni, Cu, As ve Pb içerikleri arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki bulunmuştur. Elementler arasındaki ilişkinin seviyelerine bakıldığında Cr ile Fe, As ve Pb elementleri yüksek seviyede, Cr ile Ni ve Cu elementleri orta seviyede, Cr ile Zn ve Mn elementleri ise düşük seviyede korelasyon göstermiştir. Bitkiler ağır metal biriktirme yönünden kıyaslandıklarında, odunsu bir tür olan *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*'nın çalışılan metalleri daha fazla biriktirdiği ortaya çıkarılmıştır. Mevcut araştırma aktif ve pasif taş ocakları ile temiz alanlarda otsu ve odunsu türlerin biyoakümülasyonunun izlenmesinin avantajlarını sunmaktadır. Ağır metallerin çevresel ve ekolojik etkileri, ekosistemlerin tüm bileşenlerini etkileyerek geniş çaplı sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle, ağır metal kirliliğinin önlenmesi ve mevcut kirliliğin azaltılması için etkin politikalar ve sürdürülebilir temizleme teknolojilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Rize ilindeki taş ocaklarının bitkiler üzerindeki etkisi ile ilgili mevcut bilgi durumu eksiktir. Bu çalışma, taş ocaklarının çevresindeki toksik ağır metallerin kirlilik durumları hakkında bir veri tabanının oluşturulmasına ve gelecekteki çalışmalar ve karşılaştırmalar için referans noktası olarak hizmet etmeyi sağlayacaktır. Elde edilen bulgular, ağır metal kirliliğinin olduğu alanlarda alınacak önlemlere ilişkin yararlı bir bilimsel öngörü oluşturmaktadır. Sonuç olarak, çalışmanın sonuçları çalışma alanının belirli ekolojik ve insan sağlığı risklerine sahip olduğunu göstermiştir; bu nedenle ekolojik çevreyi ve insan sağlığını korumak için bölgedeki ağır metal kirliliğinin önlenmesi, kontrolü ve yönetimine dikkat edilmesi gerekmektedir.

Araştırmamızın sonuçlarını belli bir ölçüde etkileyebilecek bazı sınırlılıklar bulunmaktadır. Bulgularımız örneklem yapılan alan sayısının azlığı, sınırlı bitki çeşidine yer verilmesi, örnek sayısının azlığı, sadece bir kez örneklem yapılması, sınırlı sayıda metallere odaklanılması gibi belirli kısıtlamalardan etkilenebilir. Bir diğer kısıtlama ise çalışmanın sadece Rize ilinin iki farklı ilçesindeki taş ocaklarına odaklanmasıdır. Bu durum; bulguların Türkiye'deki veya dünyadaki diğer madencilik alanlarına genellenebilirliğini sınırlayabilir. Çalışılan bölgenin toprak özellikleri de ağır metallerin yararlanımlarını kısıtlayabilir. Ayrıca çalışma, ağır metal konsantrasyonları hakkında veri sağlarken, bu metallerin çalışılan bitkiler üzerindeki potansiyel biyolojik etkilerini veya insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştırmamaktadır.

Yapılan bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, madencilik alanları, endüstriyel atık sahaları ve ağır metal kirliliğine maruz kalan tarım topraklarında su ve toprak arıtımı için ağır metal toleransı ve hiperakümülasyon kapasitesi yüksek olan bitki türlerinin belirlenmesi, farklı ağır metaller için spesifik hiperakümülatör bitkilerin seçilmesi, fitoremediasyon potansiyeli yüksek uygun bitki türlerinin yetiştirilmesi önerilir. Bununla birlikte taş ocaklarının toprak erozyonu, su kaynakları, hava kalitesi, habitat kaybı, biyoçeşitlilik üzerine uzun vadeli etkilerinin ortaya çıkarılması, uydu görüntüleme ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) gibi uzaktan algılama teknikleri kullanılarak uzun vadeli ekolojik etkilerinin daha iyi anlaşılması ve çevresel yönetim stratejilerinin geliştirilerek sürdürülebilir çözümler üretilmesi önerilir. Çevre kirliliğini ve buna bağlı sağlık risklerini azaltmak için, kitleleri bilinçlendirme, endüstriyel atıkların uygun şekilde yönetimi, evsel ve endüstriyel atıkların çevredeki alanlara bırakılmasını düzenleyen mevcut yasalarda güncellemeler yapılması, endüstriyel alanların yerleşim yerlerinden uzaklaştırılması, mikrobiyal iyileştirme ve ilgili alanda bilinen tıbbi veya besinsel rolü olmayan yabani otların/ağaçların fitoremediatör olarak kullanılması gibi kirliliği azaltma stratejileri önerilir.

Teşekkür
Acknowledgement

Bitkilerin teşhisindeki katkılarından dolayı Prof. Dr. Serdar MAKBUL'a teşekkürlerimi sunarım. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederim.

Yazar katkısı
Author contribution

Araştırma, Metodoloji, Kavramsallaştırma, Kaynaklar, Yazma-İnceleme ve Düzenleme.

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

Abdullah, M., Ali, S.F., & Khan, S.U. (2024). The overview of the problem of heavy metals contamination in the environment. In: *Heavy Metal Contamination in the Environment* (pp. 1-18). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781032685793-1

Akkemik, Ü. (Ed.). (2014). Türkiye'nin doğal-egzotik ağaç ve çalıları: Gymnospermler, Angiospermler (AG). TC Orman ve Su İşleri Bakanlığı Orman Genel Müdürlüğü.

Aktop, Y., & Çağatay, İ.T. (2020). Ağır metallerin balıklarda birikimi ve etkileri. *Menba Kastamonu Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*, *6*(1), 37-44.

Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 6730305. https://doi.org/10.1155/2019/6730305

Alloway, B.J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Springer.

Angulo-Bejarano, P.I., Puente-Rivera, J., & Cruz-Ortega, R. (2021). Metal and metalloid toxicity in plants: an overview on molecular aspects. *Plants*, *10*, 635. https://doi.org/10.3390/plants10040635

Asati, A., Pichhode, M., & Nikhil, K. (2016). Effect of heavy metals on plants: an overview, *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, 5*(3), 56-66.

Bargah, R.K. (2024). Heavy metals: environmental pollution and impact on human health, Futuristic Trends in Chemical Material Sciences & Nano Technology, Vol. 3 Book 18,IIP Series, Page no.461-482, e-ISBN: 978-93-5747-640-9. https://www.doi.org/10.58532/V3BDCS18CH37

Binici, A., Pulatsü, S., & Bursa, N. (2021). Evaluation of sediment dredging on heavy metal concentrations in Mogan Lake's sediment (Ankara, Turkey). *COMU Journal of Marine Sciences and Fisheries*, *4*(2), 159-167. https://doi.org/10.46384/jmsf.987343

Boukaka, K., & Mayache, B. (2020). Phytoremediation of soil contaminated by heavy metals within a Technical Landfill Center Vicinity: Algerian case study. *Pollution*, *6*(4), 811-826. https://doi.org/10.22059/poll.2020.301691.792

Bradl, H. (2004). Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, *277*(1), 1-18. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.04.005

Chen, H.Y., Teng, Y.G., Lu, S.J., Wang, Y.Y., & Wang, J.S. (2015). Contamination features and health risk of soil heavy metals in China. *Science of the Total Environment*, *512*, 143–153. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.025

Chowdhary, P., Yadav, A., Singh, R., Chandra, R., Singh, D.P., Raj, A., & Bharagava, R.N. (2018). Stress response of *Triticum aestivum* L. and *Brassica juncea* L. against heavy metals growing at distillery and tannery wastewater contaminated site. *Chemosphere*, *206*, 122-131. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.156

Clemens, S., Aarts, M. G., Thomine, S., & Verbruggen, N. (2013). Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning. *Trends in Plant Science*, *18*(2), 92-99. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.003

Dabanovic, V., Soskic, M., Durovic, D., & Mugosa, B. (2016). Investigation of heavy metals content in selected tea brands marketed in Podgorica, Montenegro, *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, *7*(12), 4798-4704. http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.7(12).4798-04

Dai, L., Wang, L., Li, L., Liang, T., Zhang, Y., Ma, C., & Xing, B. (2018). Multivariate geostatistical analysis and source identification of heavy metals in the sediment of Poyang Lake in China. *Science of the Total Environment*, *621*, 1433-1444. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.085

Ediagbonya, T.F., Ogunjobi, J.A., & Olutayo, O.O. (2021). Effect of quarry activities on selected biological resources around quarry site within Onigambari forest plantation, Oyo State, Nigeria. *Environmental Geochemistry and Health*, *43*(6), 2271-2283. https://doi.org/10.1007/s10653-020-00555-w

Ekim, T. (2012). Türkiye Bitkileri Listesi; Damarlı Bitkiler.

Ekpo, F.E., Nzegblue, E.C., & Asuquo, M. (2012). A comparative study of the influence of heavy metals on soil and crops growing within quarry environment at Akamkpa, Cross River State, Nigeria. *Global Journal of Agricultural Sciences*, *11*(1), 1–4. https://doi.org/10.4314/GJASS.V11I1.1

Fashola, M.O., Ngole-Jeme, V.M., & Babalola, O.O. (2016). Heavy metal pollution from gold mines: environmental effects and bacterial strategies for resistance. *International journal of environmental research and public health*, *13*(11), 1047. https://doi.org/10.3390/ijerph13111047

Fulke, A.B., Ratanpal, S., & Sonker, S. (2024). Understanding heavy metal toxicity: Implications on human health, marine ecosystems and bioremediation strategies. *Marine Pollution Bulletin*, *206*, 116707. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116707

Greksa, A., Žunić, V., Mihajlović, I., Blagojević, B., Vijuk, M., Podunavac-Kuzmanović, S., Kovačević, S., & Štrbac, M. (2023). Analysis of urban runoff remediation potential of zinc with *Juncus effusus* L. and *Iris pseudacorus* L. plants. PREPRINT. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3612181/v1

Grygar, T. M., Hošek, M., Elznicová, J., Machová, I., Kubát, K., Adamec, S., Tůmová, Š., Rohovec, J., & Navrátil, T. (2023). Mobilisation of Cd, Mn, and Zn in floodplains by action of plants and its consequences for spreading historical contamination and fluvial geochemistry. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(14), 40461-40477. https://doi.org/10.1007/s11356-022-25113-y

Guney, D., Koc, I., Isinkaralar, K., & Erdem, R. (2023). Variation in Pb and Zn concentrations in different species of trees and shrubs and their organs depending on traffic density. *Baltic Forestry*, *29*(2), id661-id661. https://doi.org/10.46490/BF661

Hamza, S.M. (2022). Comparative study of physiological and phenotype characteristics of *Juncus rigidus* L. rhizome in two regions in Basrah government. *British Journal of Global Ecology and Sustainable Development*, *11*, 236-245.

Hançerlioğulları, A., Turhan, Ş., Baştuğ, A., & Madee, Y.G.A. (2023). Türkiye'deki ocaklardan alınan doğal kil mineral örneklerinde ağır metal konsantrasyonlarının belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, *26*(4), 1691-1696. https://doi.org/10.2339/politeknik.1356125

Haq, Z.U., Khan, S.M., Abdullah, Z.A., Iqbal, M., Khan, R., Rasheed, S., & Abbas, Z. (2022). Macro-and micro-anatomical diversity in the *Alnus nitida* (SPACH) endl. growing in varying climatic conditions of *Sino japanese* region of Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, *54*(3), 1055-1064. http://dx.doi.org/10.30848/PJB2022-3(36)

He, Z. L., Yang, X.E., & Stoffella, P.J. (2015). Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, *19*(2-3), 125-140. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.010

Horasan, B., Ozturk, A., & Tugay, O. (2021). Nb–Sr–Pb isotope analysis in soils of abandoned mercury quarry in northwest Black Sea (Turkey), soil and plant geochemistry, evaluation of ecological risk and its ımpact on human health. *Environmental Earth Sciences*, *80*(15), 1-19. https://doi.org/10.1007/S12665-021-09775-4

Hrdlička, P., & Kula, E. (2004). Changes in the chemical content of birch (*Betula pendula* Roth) leaves in the air polluted Krusne Hory mountains. *Trees*, *18*(2), 237–244. https://doi.org/10.1007/s00468-003-0301-z

Hrdlička, P., & Kula, E. (2024). Element contents and their seasonal dynamics in leaves of alder *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. *Environmental Monitoring and Assessment*, *196*(2), 224. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12367-x

Hu, H., Jin, Q., & Kavan, P. (2014). A study of heavy metal pollution in China: current status, pollution-control policies and countermeasures. *Sustainability*, *6*(9), 5820–5838. https://doi.org/10.3390/SU6095820

Ifeoma, E.L., Awotoye Olusegun, O., & Ogbonna Princewill, C. (2014). Spatial distribution of heavy metals in soil and plant in a quarry site in Southwestern Nigeria. *Research Journal of Chemical Sciences*, 4(8), 1-6.

Itam, Y.B., Ogar, V.O., Ekpenyong, E.E., & Ebong, E.E. (2024). Assessment of heavy metal contamination and risk associated with quarrying activities in Marksino Concession Area, Akamkpa. *International Journal of Environment and Pollution Research*, *12*(2), 12–39. https://doi.org/10.37745/ijepr.13/vol12n21239

Jiang, H.H., Cai, L.M., Hu, G.C., Wen, H.H., Luo, J., Xu, H.Q., & Chen, L.G. (2021). An integrated exploration on health risk assessment quantification of potentially hazardous elements in soils from the perspective of sources. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *208*, 111489. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111489

Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2011). *Trace elements in soils and plants.* Boca Raton: CRC.

Khan, A., Khan, S., Alam, M., Amjad Khan, M., Aamir, M., Qamar, Z., Rehman, Z., & Perveen, S. (2016). Toxic metal interactions affect the bioaccumulation and dietary intake of macroand micro-nutrients, *Chemosphere, 146*, 121-128. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.014

Khan, A.H.A., Velasco-Arroyo, B., Rad, C., Curiel-Alegre, S., Rumbo, C., De Wilde, H., Pérez-de-Mora, A., Martel-Martín, S., & Barros, R. (2024). Metal (loid) tolerance, accumulation, and phytoremediation potential of wetland macrophytes for multi-metal (loid)s polluted water. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17. https://doi.org/10.1007/s11356-024-35519-5

Lameed, G.A., & Ayodele, A.E. (2010). Effect of quarrying activity on biodiversity: Case study of Ogbere site, Ogun State Nigeria. *African Journal of Environmental Science and Technology, 4*(11), 740-750. https://doi.org/10.5897/AJEST10.166

Leventeli, Y., Yalcin, F., & Kilic, M. (2019). An investigation about heavy metal pollution of Duden and Goksu Streams (Antalya,Turkey). *Applied Ecology and Environmental Research, 17*(2), 2423-2436.http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1702_24232436

Li, X.Y., Liu, L.J., Wang, Y.G., Luo, G.P., Chen, X., Yang, X.L., Myrna Hall, H.P., Guo, R.C., Wang, H.J., Cui, J.H., & He, X.Y. (2013) Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China. *Geoderma, 192*, 50–58. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.011

Madhaven, P., & Sanjay, R. (2005). *Budhpura 'Ground Zero'Sandstone quarrying in India*, India Committee of the Netherlands, Netherlands, 32.

Mahmood, A., & Malik, R.N. (2014). Human health risk assessment of heavy metals via consumption of contaminated vegetables collected from different irrigation sources in Lahore, Pakistan. *Arabian Journal of Chemistry, 7*(1), 91-99. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.07.002

Maňkovská, B., Godzik, B., Badea, O., Shparyk, Y., & Moravčík, P. (2004). Chemical and morphological characteristics of key tree species of the Carpathian Mountains. *Environmental Pollution, 130*(1), 41-54. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.10.020

Matys Grygar, T., Faměra, M., Hošek, M., Elznicová, J., Rohovec, J., Matoušková, Š., & Navrátil, T. (2021). Uptake of Cd, Pb, U, and Zn by plants in floodplain pollution hotspots contributes to secondary contamination. *Environmental Science and Pollution Research, 28*(37), 51183-51198. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14331-5

Monzón, A., & Azcón, R. (2001). Growth responses and N and P use efficiency of three *Alnus* species as affected by arbuscular-mycorrhizal colonisation. *Plant Growth Regulation, 35*, 97–104. https://doi.org/10.1023/A:1013875501259

Mou, F., Yang, J., Li, B., Chen, J., & Wang, J. (2021). Characteristics of heavy metal accumulation in five wild plants in Huize Lead-Zinc mining area. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 261, p. 04015). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126104015

Müller, A., Österlund, H., Marsalek, J., & Viklander, M. (2020). The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. *Science of the Total Environment, 709*, 136125. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125

Nodefarahani, M., Aradpouri S., Noori, R., Tang, Q., Partani, S., & Klöve, B. (2020). Metal pollution assessment in surface sediments of Namak Lake, Iran. *Environmental Science and Pollution Research, 27, 45639-45649*. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10298-x

Odeyemi, F.A., Soyinka, O.O., Amballi, A.A., & Adenusi, H.A. (2021). Heavy Metals Exposure Through Quarry Operation in Ago Iwoye, Ogun State, Nigeria. *FUW Trends in Science & Technology Journal, 6*(1), 270-27.

Ogbonna, C.E., Nwafor, F.I., & Ogbonnaya, O.O. (2020). Dust accumulation, heavy metal content and stomata morphology of some medicinal plants at Rock Quarrying locations at Lokpaukwu, Nigeria. *International Journal of Environment and Climate Change, 10*(12), 540-549. https://doi.org/10.9734/IJECC/2020/V10I1230331

Ogbonna, P.C., Emea, R., & Teixeira da Silva, J.A. (2011). Heavy metal concentration in soil and woody plants in a quarry. *Toxicological & Environmental Chemistry, 93*(5), 895-903. https://doi.org/10.1080/02772248.2011.564361

Okafor, F.C. (2006). Rural Development and the Environmental Degradation versus Protection: In Sada, P.O. & Odemerho, T. (eds.). Environmental Issues and Management in Nigerian Development, 150-163, Unical Press.

Oliveira, R.S., Castro, P.M.L., Dodd, J.C., & Vosátka, M. (2005). Synergistic effect of *Glomus intraradices* and *Frankia* spp. on the growth and stress recovery of *Alnus glutinosa* in an alkaline anthropogenic sediment. Chemosphere, *60*, 1462–1470. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.01.038

Padmapriya, S., Murugan, N., Ragavendran, C., Thangabalu, R., & Natarajan, D. (2016). Phytoremediation potential of some agricultural plants on heavy metal contaminated mine waste soils, salem district, tamilnadu. *International Journal of Phytoremediation*, *18*(3), 288-294. https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1085832

Pant, M., & Singh, J. (2024). *Distribution of heavy metals contamination in the environment and their toxicological impacts*. 95-113. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781032685793-7

Park, J.H., Lamb, D., Paneerselvam, P., Choppala, G., Bolan, N.S., & Chung, J.W. (2011). Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials, 185*(2-3), 549-574. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.082

Paustenbach, D.J. (2000). The practice of exposure assessment: a state-of-the-art review. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B: Critical Reviews*, *3*(3), 179-291. https://doi.org/10.1080/10937400050045264

Pecina, V., Juřička, D., Kynický, J., Baltazár, T., Komendová, R., & Brtnický, M. (2020). The need to improve riparian forests management in uranium mining areas based on assessment of heavy metal and uranium contamination. *Forests*, *11*(9), 952. https://doi.org/10.3390/f11090952

Samara, T., Spanos, I., Papachristou, T.G., & Platis, P. (2022). Assessment of heavy metal pollution using forest species plantations of post-mining landscapes, Ptolemais, N. Greece. *Mining*, *2*(3), 578-588. https://doi.org/10.3390/mining2030031

Sasmaz, M., Topal, E.I.A., Obek, E., & Sasmaz, A. (2015). The potential of *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. to remove Cu, Pb, Zn, and As in gallery water in a mining area in Keban, Turkey. *Journal of Environmental Management*, *163*, 246-253. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.029

Sayara, T., Hamdan, Y., & Basheer-Salimia, R. (2016). Impact of air pollution from quarrying and stone cutting industries on agriculture and plant biodiversity. *Resources and Environment*, *6*(6), 122–126. https://doi.org/10.5923/j.re.20160606.04

Sengupta, M. (1992). Environmental Impacts of Mining, Lewis Publishers. Monitoring, restoration and control. Boca Raton, FL: Lewis Publishers. United Nation, 9781003164012, Boca Raton. https://doi.org/10.1201/9781003164012

Shah, A., Niaz, A., Ullah, N., Rehman, A., Akhlaq, M., Zakir, M., & Suleman Khan, M. (2013). Comparative study of heavy metals in soil and selected medicinal plants. *Journal of Chemistry*, 2013: 621265. https://doi.org/10.1155/2013/621265

Singh, A., Singh, B. P., Raghav, Y., & Mishra, V. (2024). *Regulatory frameworks and guidelines aimed at controlling and minimizing heavy metals exposure*. 171–179. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781032685793-11

Smedley, P.L., & Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behaviour, and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry, 17*(5), 517-568. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5

Sood, A., Uniyal, P.L., Prasanna, R., & Ahluwalia, A.S. (2012). Phytoremediation potential of aquatic macrophyte, Azolla. *Ambio*, *41*(2), 122-137. https://doi.org/10.1007/s13280-011-0159-z

Srinivas J., Purushotham A.V., Singh, P.K. (2023). Heavy metal contamination in industrial areas - suggestions, recommendations and future perspectives: a review. *International Journal of Science and Research, 12*(2), 1085-1091. https://doi.org/10.21275/sr23218195916

Świątek, B., Woś, B., Chodak, M., Maiti, S. K., Józefowska, A., & Pietrzykowski, M. (2019). Fine root biomass and the associated C and nutrient pool under the alder (*Alnus* spp.) plantings on reclaimed technosols. Geoderma, *337*,1021–1027. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.025

Şavran, G., & Küçük, F. (2022). Sucul Canlılarda Ağır Metal Birikimi ve Etkileri. *Akademia Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi*, *8*(1), 65-78.

Tatar, S., Obek, E., Arslan Topal, E.I., & Topal, M. (2019). Uptake of some elements with aquatic plants exposed to the effluent of wastewater treatment plant. *Pollution*, *5*(2), 377-386. https://doi.org/10.22059/poll.2019.269722.542

Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., & Sutton, D.J. (2012). *Heavy metal toxicity and the environment. In: Luch, A. (eds) Molecular, Clinical and Environmental Toxicology.* Experientia Supplementum, vol 101. Springer, Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

Tiimub, B.M., Sarkodie, P.A., Monney, I., & Maxwell, O. (2015). Heavy metal contamination of soil by quarry dust at Asonomaso in the Ashanti Region of Ghana. *Chemistry and Materials Research*, *7*, 42-50.

Ugulu, I., Sahin, I., & Akcicek, E. (2024). Source identification and assessment of heavy metal contamination in different plant species in the alpine ecosystems of Mt. Madra. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 103656. https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103656

Vincent, K.N., Joseph, N.N., & Raphael, K.K. (2012). Effects of quarry activities on some selected communities in the lower Manya Krobo District of the Eastern Region of Ghana. *Atmospheric and Climate Sciences, 2*(3), 1-11. https://doi.org/10.4236/acs.2012.23032

Violante, A., Cozzolino, V., Perelomov, L., Caporale, A. G., & Pigna, M. (2010). Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 10*(3), 268-292. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000100005

Wildová, E., Elznicová, J., & Kula, E. (2021). Seasonal Dynamics of manganese accumulation in European larch (*Larix decidua* Mill.), silver birch (*Betula pendula* Roth), and bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) over ten years of monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment, 193*(9),612. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09415-1

Wisłocka, M., Krawczyk, J., Klink, A., & Morrison, L. (2006). Bioaccumulation of heavy metals by selected plant species from uranium mining dumps in the Sudety Mts., Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, *15*(5), 811-818.

Wolfe, E.R., Singleton, S., Stewart, N.U., Balkan, M.A., Ballhorn, D.J. (2022). Frankia diversity in sympatrically occurring red alder (*Alnus rubra*) and Sitka alder (*Alnus viridis*) trees in an early successional environment. Trees, *36*(5), 1665-1675. https://doi.org/10.1007/s00468-022-02317-w

Yaacob, W.Z.W., Pauzi, N.S.M., & Mutalib, H.A. (2009). Acid mine drainage and heavy metals contamination at abandoned and active mine sites in Pahang. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, *55*, 15-20. https://doi.org/10.7186/bgsm55200903

Yalcin, M.G., Coskun, B., Nyamsari, D.G., & Yalcin, F. (2019). Geomedical, ecological risk, and statistical assessment of hazardous elements in shore sediments of the Iskenderun Gulf, Eastern Mediterranean, Turkey. *Environmental Earth Sciences, 78*(15), 438. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8435-5

Yalçın, F. (2021). Data Analysis of Heavy metals in Akkaya Lake reservoir soils using multivariate statistical analysis. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, *9*(1), 249-257. https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i1.249-257.4040

Yan, T., Lü, X., Yang, K., & Zhu, J. (2016). Leaf nutrient dynamics and nutrient resorption: A comparison between larch plantations and adjacent secondary forests in Northeast China. *Journal of Plant Ecology*, *9*(2), 165-173. https://doi.org/10.1093/jpe/rtv034

Yaşar, Ü. (2009). *Cercis siliquastrum l.* subsp. *siliquastrum (*fabaceae*)'un ağır metal kirliliğinde biomonitor olarak kullanımı* [Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi]

Yerli, C., Çakmakcı, T., Sahin, U., & Tüfenkçi, Ş. (2020). Ağır metallerin toprak, bitki, su ve insan sağlığına etkileri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, *9*(Özel Sayı), 103-114. https://doi.org/10.46810/tdfd.718449

Yin, S., Shen, Z., Zhou, P., Zou, X., Che, S., & Wang, W. (2011). Quantifying air pollution attenuation within urban parks: An experimental approach in Shanghai, China. *Environmental pollution*, *159*(8-9), 2155-2163. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.009

Zare, K., Sheykhi, V., & Zare, M. (2020). Investigating the heavy metals' removal capacity of some native plant species from the wetland groundwater of Maharlu Lake in Fars province, Iran. *International Journal of Phytoremediation*, *22*(7), 781-788. https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1710815

Zayed, A., & Terry, N. (2003). Chromium in the environment: factors affecting biological remediation. *Plant Soil*, *249*, 139-156. https://doi.org/10.1023/A:1022504826342

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 451-462 doi: 10.17714/gumusfenbil.1627107 Research Article

Theoretical investigation of the effects of large cage guest CF_3Br and small cage guests CH_4, CO_2 and H_2S on the stability of double clathrate hydrates

Büyük kafes konuğu CF_3Br ve küçük kafes konukları CH_4, CO_2 ve H_2S'in çift klatrat hidratların kararlılığı üzerindeki etkilerinin teorik incelenmesi

Zafer MAŞLAKCI*

Bandirma Onyedi Eylul University, Susurluk Agriculture and Forestry Vocational School, Department of Chemical and Chemical Processing Technologies, 10600, Balikesir, Türkiye

• Received: 25.01.2025 • Accepted: 12.04.2025

Abstract

Guest-host interactions in double clathrate hydrates were investigated through computational molecular-level simulations. This approach focuses on important molecular properties of CF_3Br clathrate hydrates that were not previously well-characterized. The aim of this study is to investigate the characteristics of guest-host interactions of the CF_3Br molecule in clathrate hydrate structures using quantum mechanical calculations. In the present study, a water cluster comprising small and large cages, referred to as the cluster, was used to mimic s-II clathrate hydrates. The s-II cluster was filled with CF_3Br as the large cage (l-c) molecule and H_2S, CO_2, CH_4 as the small cage (s-c) molecules. The $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster, containing a combination of l-c and s-c molecules, underwent energy optimization at the BLYP/6-31++G(d,p) level using Gaussian 16. As the molecular weight of the guest increased, the interaction between the guest and host molecules also increased for the $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster. The incorporation of CF_3Br into the large cage (l-c) strengthened the guest-host interactions, leading to greater structural stability. This highlights the potential of clathrate hydrates for applications in energy storage systems. The guest-host interactions of CF_3Br-containing double clathrate hydrates have been investigated at the molecular level for the first time, contributing to the development of the thermodynamic and kinetic properties of clathrate hydrates.

Keywords: CF_3Br, Clathrate hydrates, DFT, Double cage

Öz

Çift klatrat hidratlardaki konuk-konak etkileşimleri, hesaplamalı moleküler düzeyde simülasyonlar aracılığıyla incelenmiştir. Bu yaklaşım, daha önce iyi karakterize edilmemiş olan CF_3Br klatrat hidratların önemli moleküler özelliklerine odaklanmaktadır. Bu çalışmanın amacı CF_3Br molekülünün klatrat hidrat yapılarındaki konuk-konak etkileşimlerinin kuantum mekanik hesaplamalar ile özelliklerini incelemektir. Bu çalışmada, s-II klatrat hidratları taklit etmek için küçük ve büyük kafeslerden oluşan bir su kümesi, küme olarak adlandırılmıştır. S-II kümesi, büyük kafes (l-c) molekülü olarak CF_3Br ve küçük kafes (s-c) molekülleri olarak H_2S, CO_2, CH_4 ile doldurulmuştur. l-c ve s-c moleküllerinin bir kombinasyonunu içeren $5^{12}+5^{12}6^4$ kümesi, Gaussian 16 kullanılarak BLYP/6-31++G(d,p) seviyesinde enerji optimizasyonuna tabi tutulmuştur. $5^{12}+5^{12}6^4$ kümesi için konuk molekülün moleküler ağırlığı arttıkça, konuk ve konak moleküller arasındaki etkileşim de artmıştır. CF_3Br'nin büyük kafese (l-c) dahil edilmesi, konuk-konak etkileşimlerini güçlendirerek yapısal stabilitenin artmasına yol açmıştır. Bu durum, klatrat hidratların enerji depolama sistemlerindeki potansiyel uygulamalarını vurgulamaktadır. CF_3Br içeren çift klatrat hidratların konuk-konak etkileşimlerini moleküler seviyede ilk kez incelenmiş olup klatrat hidratların termodinamik ve kinetik özelliklerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: *CF_3Br, Klatrat hidratlar, DFT, Çift kafes*

*Zafer MAŞLAKCI; zmaslakci@bandirma.edu.tr

1. Introduction

Clathrate hydrates (also known as gas hydrates) are solid inclusion compounds comprising an ice-like network of host water molecules linked through hydrogen bonding. Unlike the ice structure, the arrangements of water molecules create cavities (host lattice) that can enclose a wide variety of small gas molecules (<10 Å, guests). Clathrate hydrates are known to have three distinct crystalline structures under appropriate thermodynamic conditions: structure I (sI), structure II (sII), and structure H (sH) (Sloan & Koh, 2008; Sloan, 2023). In clathrate hydrate structures, van der Waals interactions between water molecules and enclosed guest molecules stabilize the host lattice. However, recent studies have experimentally detected long-lived host-guest interactions. These interactions vary depending on the type of small and large cage guests and temperature; however, no consistent trend has been reported (Devlin & Monreal 2010a; Uras-Aytemiz et al., 2011). Similarly, the "all vapor method" has highlighted the significance of host-guest interactions in determining which guests occupy small cages and which species dominate (e.g., small cage guests like CO_2 and CH_4) (Uras-Aytemiz et al., 2011; Uras-Aytemiz et al., 2012). The term expressed as "equilibrium ratios" is used to determine the amount of competing molecules. The term "equilibrium ratios" refers to systems where molecules spend the majority of their time at the center of the cage, ensuring that the conditions for such behavior are met. Under these conditions, the molecules do not form hydrogen bonds. In the experimental study conducted entirely using the vapor method, the stability of small cage guests relative to each other while inside the small cage was investigated. The term "equivalency ratios" reflects the effect of guest-host interactions and is the main subject of this study.

Surfaces play a critical role in gas-hydrate interactions, particularly in the uptake and release of guest molecules and adsorbates. Despite their clear importance in clathrate hydrate formation, little is known about the molecular-level structure of the outermost surface of clathrate hydrates (Uras-Aytemiz et al., 2011; Uras-Aytemiz et al., 2012) or how interior structures and their transformations are influenced by adsorbates. Using advanced experimental methods with ice nanoparticles, significant progress has been made in understanding bare hydrate surfaces (Richardson et al., 1985; Fleyfel & Devlin 1988; Fleyfel et al., 1990; Hernandez et al., 1998; Gulluru & Devlin 2006; Devlin & Monreal 2010a; Devlin & Monreal 2010b; Uras-Aytemiz et al., 2011; Uras-Aytemiz et al., 2012). Generating bare clathrate hydrate surfaces without losing interior guests was identified as an essential first step, and this objective has now been achieved. It is crucial that guest molecules bind only weakly to the hydrate surface while maintaining a stable presence within the hydrate cages. Theoretical studies like this one investigate how guest molecules (CF_3Br in large cages and CH_4, CO_2, H_2S in small cages) influence the stability of the hydrate lattice. Crystal surfaces in clathrate hydrates are important because they can undergo structural relaxation, adsorption, or potential rearrangements due to guest-host interactions. If guest molecules contribute to stronger hydrogen bonding or alter the lattice parameters, these effects could extend to surface stability, impacting nucleation and growth processes. Some studies have shown that guest molecule size and polarity affect surface adsorption and the dissolution behavior of clathrate hydrates. For instance, studies on CH_4 or CO_2 hydrates (Kvamme et al., 2007; Falenty et al., 2014) suggest that guest molecules contribute to lattice distortions. The study examined the surface stability and decomposition processes of CO_2 hydrates, demonstrating that guest molecules exhibit different behaviors on the crystal surface. Specifically, it was reported that CO_2 is more stable on the surface, whereas CH_4 can escape from the hydrate surface more easily (Falenty and Kuhs, 2009). The interactions of CO_2 and CH_4 on hydrate surfaces have been experimentally investigated, and it has been shown that CO_2 can adsorb onto CH_4 hydrate surfaces (Uchida et al., 2002). The analysis of the surface decomposition mechanisms of natural gas hydrates has determined that surface stability varies depending on the composition of the guest molecules (Staykova et al., 2003). Molecular dynamics studies on the stability of hydrate surfaces containing CH_4 and CO_2 have shown that CO_2 is more stable than CH_4 due to its surface interactions (Jacobson et al., 2010). Previous studies have reported that hydrogen bonding occurs between the guest and host molecules. In this context, Alavi and his group conducted a series of calculations: they examined alcohols (ethanol, 1-propanol, 2-propanol) in the sII structure, along with propane and butane molecules (large cage guests) and CH_4 molecules (small cage guests) (Alavi et al., 2010). In another study, they investigated ether molecules (such as THF and THP) as simple hydrates in the sII structure. These studies reported that ethers and alcohols form hydrogen bonds with host water molecules. A bulk study examining the hydrogen bonding between various guest molecules and host water molecules, as observed in experimental data, has been reported (Alavi and Ripmeester, 2012). What distinguishes this study from others is its investigation of the contribution of hydrogen bonding between small and large cage guest molecules and host water molecules. For this purpose, CO_2, H_2S, CH_4, and Xe were selected as small cage guests, and it was stated that CO_2

stabilizes the hydrogen bonding between THF molecules and water. Therefore, determining the characteristics of double-cage structures will enable a better understanding of interactions in crystal structures.

Starting with arrays of cold ice nanocrystals, a pair of hydrates was successfully prepared that met these criteria: specifically, a structure-II hydrate with large cage CF_3Br and small cage H_2S (Buch et al., 2009). FTIR spectra have been obtained for the 3-coordinated water molecules at dangling-oxygen and dangling-hydrogen surface sites in arrays of clathrate hydrate nanocrystals. In contrast to ice nanocrystals, studies have investigated whether a "regular" hydrate lattice structure extends to the outermost surface (Buch et al., 2009). This knowledge of gas hydrates has guided efforts to identify optimal guest mixtures for catalyzing all-vapor clathrate hydrate formation. The transformation of solids due to external factors is often strongly influenced by the intrinsic properties of surfaces. Similar to ice nanocrystals, numerous CH nanocrystalline particles are now easily accessible, and various studies on this subject are available in the literature (Davidson, 1973; Buch et al., 2004). For example, dangling group frequencies of CF_3Br-H_2S double clathrate hydrates can be observed even at 170 K, suggesting that clathrate hydrate nanoparticles are retained at higher temperatures than ice (Buch et al., 2009). Simple s-I H_2S clathrate hydrate or double s-II CF_3Br-H_2S can form at temperatures as low as 120 K within a one-hour time frame, with H_2S acting as one of the guests promoting low-temperature clathrate hydrate formation.

H_2S catalysis can facilitate the incorporation of relatively large guests into large clathrate hydrate cages under conditions where the same guests would not react with ice. It is known that H_2S not only forms the s-I clathrate hydrate structure but also contributes to the formation of many double clathrate hydrates, where it serves as the small cage guest (Buch et al., 2009). In order to examine the effect of methane and carbon dioxide on cage structures, sI and sII double cage structures were initially studied with small cages containing methane, while the large cages remained empty. Subsequently, methane was added to the center of the small cages of the sI and sII double cage structures, leaving the large cages empty. The effect of methane has been analyzed quantum mechanically using different basis sets (Fan et al., 2013; An et al., 2018).

DFT calculations have been conducted using a double-cage structure, which is a combination of 5^{12} and $5^{12}6^4$ cages. It has been shown that certain substances significantly increase the rate of formation and the final amount of hydrate formed in a catalytic manner when included in an all-vapor pre-mixture. This catalytic effect can largely be attributed to the ability of a guest molecule to create ice-like defects, as described by the Trout-Buch model (Davidson, 1973; Demurov et al., 2002; Buch et al., 2004; Buch et al., 2009; Fan et al., 2013; An et al., 2018). These defects facilitate the accelerated movement of guest molecules. Recent studies have reported clathrate hydrate formation results obtained at very low temperatures and pressures (Ghosh et al., 2019a; Ghosh et al., 2019b). Compared to several known hydrogen-bonding catalysts, the catalytic activity of CF_3Br must originate from a different mechanism. Bromine's effectiveness in catalyzing the formation of clathrate hydrates via defects associated with halogen bonds could enhance our general understanding of defect-based processes and potentially lead to the development of more powerful halogen-bond-based catalysts. For this purpose, the interactions of guest molecules in small cage structures (CH_4, CO_2, and H_2S) and the guest molecule in large cage structures (CF_3Br) were studied systematically. In this context, the stability of the CF_3Br molecule in the large cage and how the stability of the specified clathrate hydrates changes in the presence of small guest molecules placed in the small cage (equivalency ratios) were investigated.

2. Calculation method

In order to evaluate the stability of the small and large caged guest molecules, this study focuses on the interactions of guest molecules within the cages. A model is presented here, comprising a combination of 5^{12} and $5^{12}6^4$ cages for s-II clathrate hydrates, based on known structures from diffraction data. The effect of alternating the small-cage molecule while retaining the same large-cage guest on stability is determined. In this study, all structures have been subjected to an optimization procedure without fixing the water molecules (5^{12} refers to 12 pentagonal cage walls). In order to understand the catalytic ability of the CF_3Br molecule in clathrate hydrate structures, systematic quantum mechanical calculations at the DFT level were performed. In these calculations, the BLYP functional (Becke exchange functional combined with the Lee-Yang-Parr correlation functional) (Becke, 1988; Lee, Yang & Parr, 1988) was used along with the 6-31++G(d,p) basis

set. The 6-31++G(d,p) basis set includes polarization (d,p) and diffuse (++) functions, which enhance the accuracy of describing electron distribution, particularly in weak interactions such as hydrogen bonding and van der Waals forces, making it suitable for investigating guest-host interactions in clathrate hydrates (Alavi & Ripmeester 2010;2012; Buch et al., 2004;2009; Takeuchi et al., 2013; Jacobson et al., 2010; Yang et al., 2015). In the present study, a water cluster comprising a combination of small (5^{12}) and large ($5^{12}6^4$) cages, referred to hereafter as the $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster, was used as a model to mimic the s-II clathrate hydrate. The $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster was isolated from the s-II unit cell, as described in (Takeuchi et al., 2013), and is shown in Figure 1.

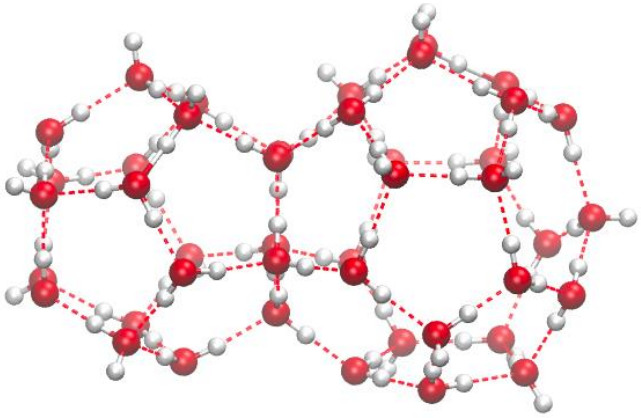


Figure 1. The $5^{12} + 5^{12}6^4$ cluster used as model for s-II clathrate hydrate.

The $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster was filled with CF_3Br as the l-c (large cage) molecule and H_2S, CO_2, and CH_4 as the s-c (small cage) molecules. Each combination of l-c and s-c molecules within the $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster was subjected to an energy optimization procedure at the BLYP/6-31++G(d,p) level using Gaussian 16 (Frisch et al., 2016). The initial orientation of all s-c and l-c molecules was kept consistent across combinations and used as the input geometry. As a result of the DFT calculations, the total charge of the studied structure was determined to be 0, and its multiplicity was found to be 1. This indicates that the structure is a neutral and singlet-state system.

The interaction energies of the $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster filled by CF_3Br as the l-c molecules, and H_2S, CO_2, CH_4 as the s-c molecules are calculated from the following equations;

ΔE_1 = E ($5^{12}+5^{12}6^4$ cluster contains only s-c molecules) – E (l-c and s-c empty $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster) – E (s-c molecule monomer)

ΔE_2 = E ($5^{12}+5^{12}6^4$ cluster contains only l-c molecules) – E (l-c and s-c empty $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster) – E (l-c molecule monomer)

ΔE_3 = E ($5^{12}+5^{12}6^4$ cluster contains l-c and s-c molecules) – E (l-c and s-c empty $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster) – E (l-c molecule monomer) – E (s-c molecule monomer)

3. Results and discussion

3.1. Dimer structures

The optimized structures of the $CF_3Br\cdots H_2O$, $H_2S\cdots H_2O$, $CO_2\cdots H_2O$, and $CH_4\cdots H_2O$ dimers are presented in Figure 2. In Table 1 presents the interaction energies, along with selected distances and angles, for the dimer molecules.

In the dimer structures presented in Figure 2, which were optimized, there is a weak van der Waals interaction between the CF_3Br molecule and the water molecule. Since CF_3Br is a polar molecule, it can interact strongly with the water molecule. This causes the oxygen atom of the water molecule to orient toward the CF_3Br molecule. The interaction between the H_2S molecule and the water molecule forms a structure where the sulfur atom (proton acceptor) interacts with the hydrogen atom of the water molecule

(proton donor). H_2S, being a partially polar molecule, can form hydrogen bonds with the water molecule. These bonds are strong in terms of interaction energy.

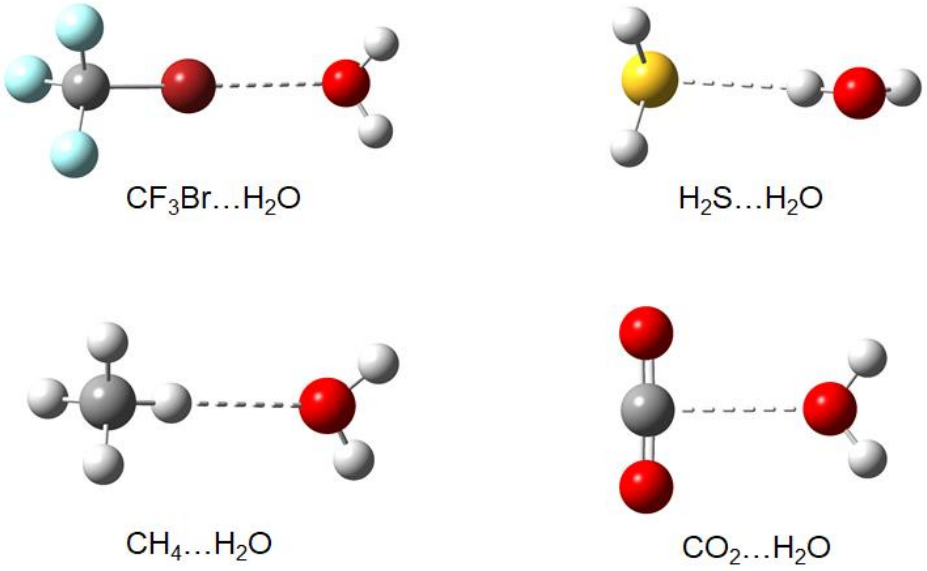


Figure 2. Optimized structures of dimer structures at the BLYP/6-31++G(d,p).

Table 1. The interaction energies and some structural parameters for the the dimers of both s-c and l-c guests with the water molecule calculated at the BLYP method 6-31++G(d,p) level.

System	Energy (kcal/mol)	Mean $O_w\cdots O_w$ (Å)	Shortest Guest$\cdots O_w$ (Å)		Diameter of cage (Å)	Distances (Å) and angles (deg)	
$CF_3Br\cdots H_2O$	-4.2	-	$Br\cdots O_w$	2.95	-	Br-C	1.96
						C-F	1.36
						O-H	0.98
						H-O-H	105.1
						C-Br$\cdots O_w$	179.2
$CH_4\cdots H_2O$	-0.1	-	$H\cdots O_w$	2.67	-	C-H	1.09
						O-H	0.97
						H-O-H	105.0
						H-C-H	109.7
						C-H$\cdots O_w$	178.9
$CO_2\cdots H_2O$	-3.4	-	$C\cdots O_w$	2.86	-	C-O	1.18
						O-H	0.97
						H-O-H	105.5
						O-C-O	177.8
						C$\cdots H_w$-O_w	127.3
$H_2S\cdots H_2O$	-5.9	-	$S\cdots O_w$	2.55	-	H-S	1.35
						O-H	0.98
						H-O-H	105.1
						H-S-H	92.54
						S$\cdots H_w$-O_w	166.5

In the $CH_4\cdots H_2O$ interaction, the geometry of the structure illustrates the behavior between the hydrogen atom of the CH_4 molecule (proton donor) and the oxygen atom of the water molecule (electron acceptor). In the interaction between CO_2 and the water molecule, the carbon atom acts as an electron-accepting Lewis acid, while the water molecule acts as an electron-donating Lewis base. Despite being a linear molecule, CO_2 contains partially polar regions. These polar regions interact with the oxygen atom of the water molecule. The CF_3Br, H_2S, and CO_2 molecules exhibit stronger interactions with the water molecule compared to other molecules. This makes them more stable within clathrate hydrate structures. CH_4, due to its apolar nature, exhibits weak interactions with water, which results in lower stability.

3.2. Double clathrate hydrates

The optimized structures of the $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster filled with CF_3Br as the l-c molecule and H_2S, CO_2, and CH_4 as the s-c molecules are shown in Figures 3 and 4. In the present study, the primary contribution to the guest-host interactions arises from van der Waals interactions.

In Table 2 presents the interaction energies, along with selected distances and angles, for the $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster filled with CF_3Br as the l-c molecule and H_2S, CO_2, and CH_4 as the s-c molecules. For comparison, the dimers of both the s-c and l-c guest molecules with a water molecule are also included (Table 1). It denotes the average oxygen-oxygen distance among all water molecules in the hydrate cage. The Ow symbol represents the oxygen atoms in the water molecules present in hydrate structures. The stability of clathrate hydrates and the properties of the cage structure vary depending on the Ow···Ow distance. The Ow···Ow distance indicates the width, compactness, and relationship of the hydrate structure with hydrogen bonds. While small guest molecules (e.g., CH_4, CO_2) do not significantly expand the cage, larger guest molecules (e.g., CF_3Br) can increase the Ow···Ow distance.

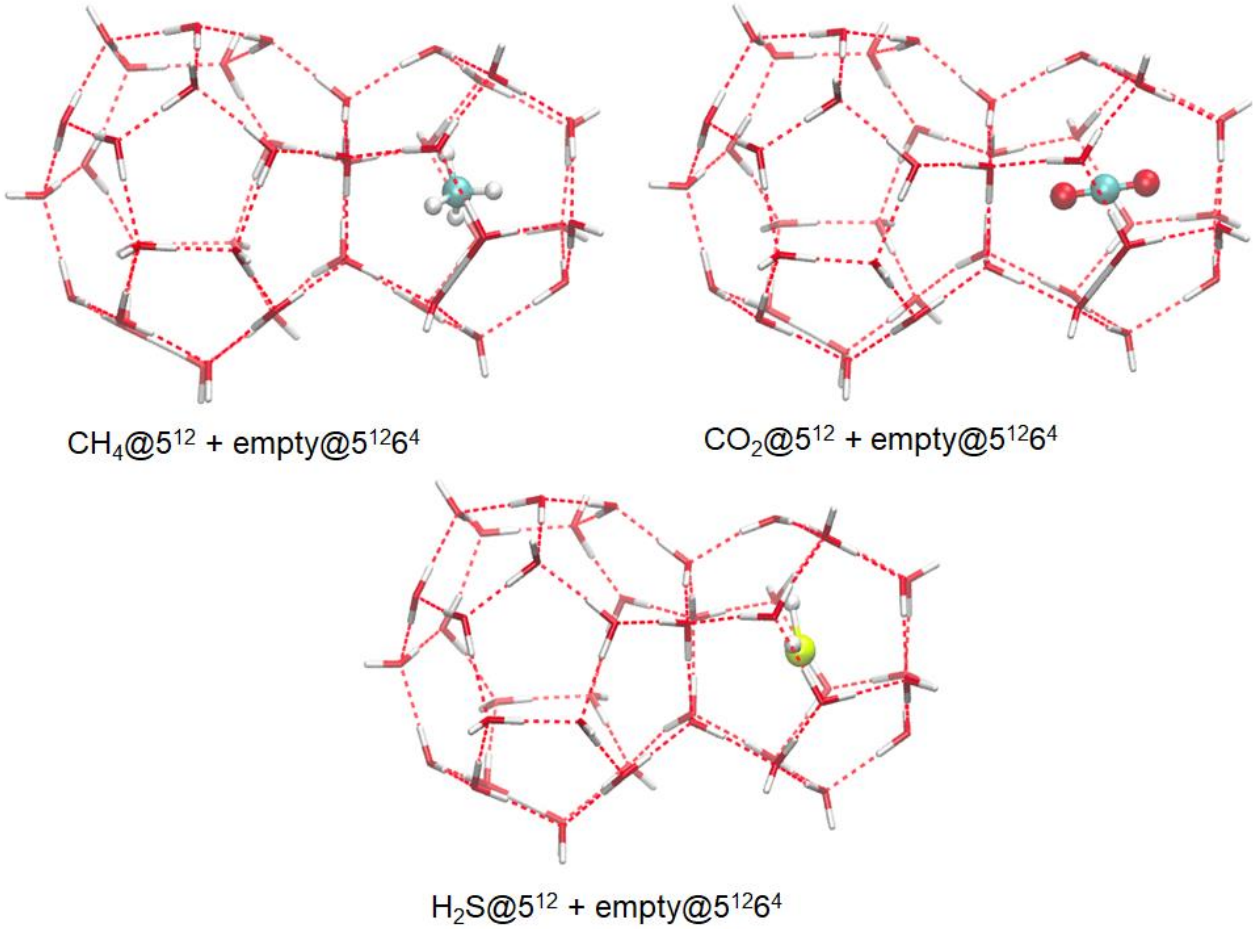


Figure 3. Optimized structures for the 5^{12} cluster filled by CH_4, CO_2 and H_2S as the s-c molecules. All calculations were done at the BLYP/6-31++G(d,p).

It is interesting to note that the shortest distances between the oxygen atoms of the cage water molecules and the guest molecules CF_3Br, CH_4, CO_2, and H_2S within the $5^{12}6^4$ cages are very similar to those observed in their respective dimers with water (shortest Guest···Ow distances). However, the angles (X···Yw, where Y = O or H) measured for the encaged molecules in the $5^{12}6^4$ cluster deviate from their respective dimer values. Specifically, the angles are as follows: 152–163° for encaged CF_3Br compared to 179° for the CF_3Br···H_2O dimer; 159–163° for encaged CH_4 compared to 178° for the CH_4···H_2O dimer; 134–143° for encaged CO_2 compared to 127° for the CO_2···H_2O dimer; and 152–168° for encaged H_2S compared to 166° for the H_2S···H_2O dimer.

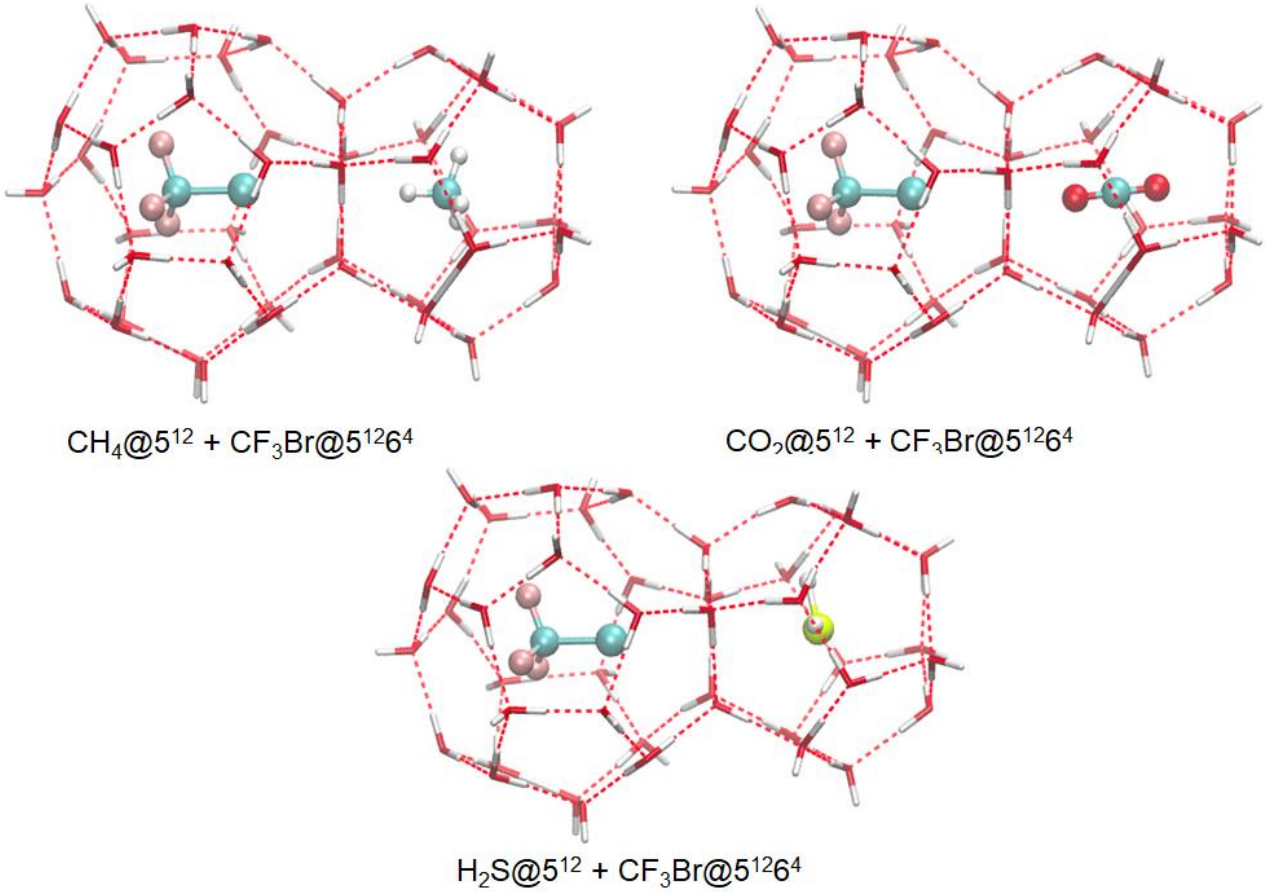


Figure 4. Optimized structures for the $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster filled by CF_3Br as the l-c molecule and CH_4, CO_2 and H_2S as the s-c molecules. All calculations were done at the BLYP/6-31++G(d,p).

The interaction energies of different cage structures obtained as a result of geometric optimizations are given in Figure 5. In Table 2, the interaction energies of the l-c molecules (ΔE_1) when the s-c is empty and those of the s-c molecules (ΔE_2) when the l-c is empty are provided. It is well established that host-guest interactions determine the stability of clathrate hydrate structures. Previous studies have shown that s-c molecules contribute to the catalytic activity of large-cage molecules. In other words, certain s-c molecules enhance the hydrogen bonding behavior of l-c molecules. (Davidson, 1973; Demurov et al., 2002; Buch et al., 2004; Buch et al., 2009; Alavi & Ripmeester, 2012; Fan et al., 2013; Takeuchi et al., 2013; An et al., 2018; Ghosh et al., 2019a; Ghosh et al., 2019b). According to the values given in Figure 5, negative interaction energy indicates that the configuration is energetically favorable and stable. This means that guest molecules (such as H_2S, CO_2, CH_4, etc.) form a stable interaction with the cage structure. The cage structures containing CF_3Br generally have more negative energy values, meaning they are more stable. When small cages are filled while large cages remain empty, the structures have positive interaction energies, indicating that they are less stable without guest molecules.

The interaction energies of both l-c and s-c molecules (ΔE_3) when they are present together are also given in Table 2. The results indicate that the interaction energy of $CH_4@5^{12}$ with an empty $5^{12}6^4$ cage (4.84 kcal/mol) is lower than that of $CO_2@5^{12}$ with an empty $5^{12}6^4$ cage (3.36 kcal/mol). For 5^{12}/(guest)@$5^{12}6^2$ clusters, the interaction energy increases with the molecular size of the guest molecule encapsulated in the $5^{12}6^2$ cavity. Similarly, for $CH_4@5^{12}$ with an empty $5^{12}6^4$ cage, when the $5^{12}6^4$ cavity is filled with a CF_3Br molecule, the interaction energy reaches -8.65 kcal/mol. The same trend is observed when CO_2 is in the small cage and CF_3Br is in the large cage. For $CO_2@5^{12}$ with an empty $5^{12}6^4$ cage and $H_2S@5^{12}$ with an empty $5^{12}6^4$ cage, when the $5^{12}6^4$ cavity is filled with a CF_3Br molecule, the interaction energies are -10.1 kcal/mol and -11.5 kcal/mol, respectively. The stability of the guest molecules relative to one another was analyzed under the condition referred to as equivalency ratios. The stability of the guest molecules relative to one another was analyzed using equivalency ratios, which compare the interaction energies of different guest species within the hydrate cages. The results show that, regardless of whether the large cages are empty or occupied by

CF_3Br, the interaction energies of small-cage guests follow the order $H_2S > CO_2 > CH_4$. This indicates that H_2S exhibits the strongest interaction with the hydrate framework, followed by CO_2 and CH_4. The equivalency ratio approach allows for a systematic comparison of the relative stability of guest molecules based on their binding strengths and preferred occupancy within the hydrate structure.

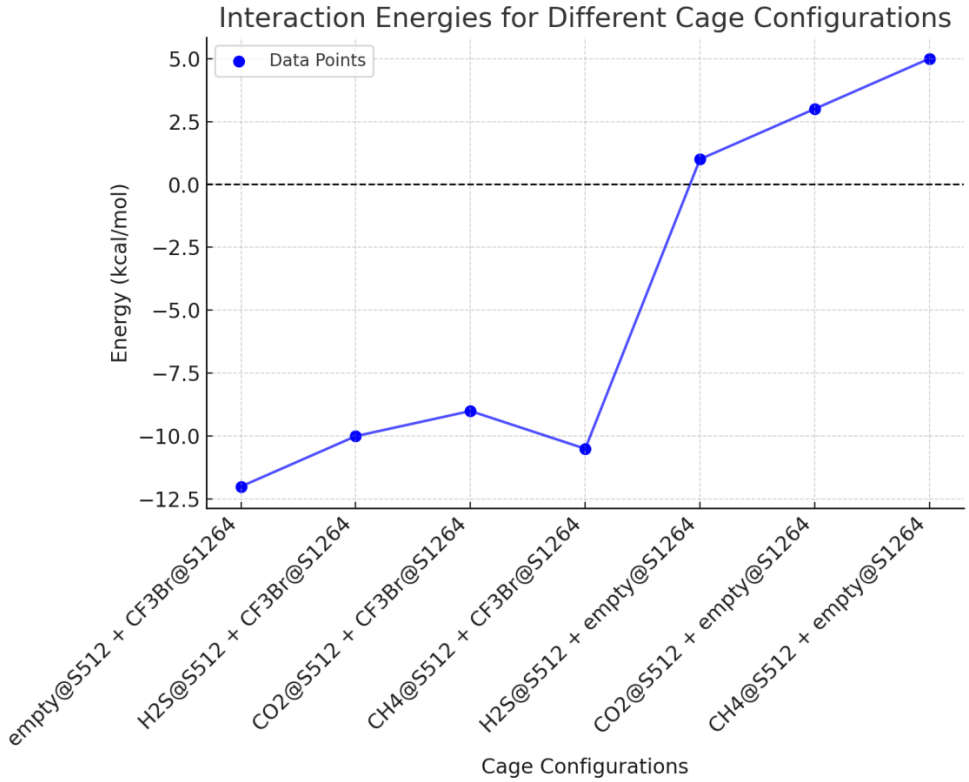


Figure 5. The optimized interaction energies for the $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster filled with CF_3Br as the large-cage (l-c) molecule and HCN, CO_2, and H_2S as the small-cage (s-c) molecules, calculated at the BLYP method and 6-31++G(d,p) level.

When the small cages are filled with CH_4, CO_2, and H_2S molecules while the large cages remain empty, the interaction energies follow the order $H_2S > CO_2 > CH_4$. When the large cages are filled with CF_3Br molecules, the order remains the same: $H_2S > CO_2 > CH_4$. The results indicate that the CF_3Br molecule interacts more strongly with the cage compared to the others. Among the small cage molecules, H_2S contributes the most to the stability of the CF_3Br molecule, with an interaction energy of -11.5 kcal/mol, while CH_4 contributes the least, with -8.65 kcal/mol. When compared individually, the energy values of the guest gas molecules vary depending on their positions and orientations within the cages. The polarization effects of water in these rings also influence the stability of the cage, along with the molecules in the small cage. The analysis of energy values for dimer structures formed by small and large cage guests with water reveals that the interaction energy follows the order $H_2S > CF_3Br > CO_2 > CH_4$. These findings suggest that the interactions observed in dimers are also present within cage structures. Similar to the results of previous studies (Uras-Aytemiz et al., 2012), it demonstrates that these interactions play a critical role in determining the stability of the cage.

In the presence of guest molecules in the small cage, it was observed that the interaction strength increased when the CF_3Br molecule was introduced into the large cage, compared to the case where the large cage was empty. Furthermore, the stability of the hydrates increases with the molecular size of the guest molecules in the cages, as well as with the interaction between the guest molecules and the water molecules (An et al., 2018).

Table 2. The interaction energies and some structural parameters for the $5^{12}+5^{12}6^4$ cluster filled by CF_3Br as the l-c molecules, and HCN, CO_2 and H_2S as the s-c molecules calculated at the BLYP/6-31++G(d,p).

System	Energy (kcal/mol)	Mean $O_w\cdots O_w$ (Å)		Shortest Guest…O_w (Å)		Diameter of cage (Å)		Distances (Å) and angles (deg)	
empty 5^{12} + empty $5^{12}6^4$	-	s-c	2.75	-		s-c	7.75	-	
		l-c	2.75	-		l-c	8.85	-	
empty 5^{12} + CF_3Br@$5^{12}6^4$	ΔE_2= -12.6	s-c	2.75	Br···O_w	3.54	s-c	7.95	Br-C	1.95
								C-F	1.36
								F-C-Br	111.0
								C-Br···O_w	163.4
		l-c	2.75	-		l-c	8.85	-	
CH_4@5^{12} + empty $5^{12}6^4$	ΔE_1 = 4.84	s-c	2.75	H···O_w	2.81	s-c	7.75	C-H	1.09
								H-C-H	109.8
								C-H···O_w	159.6
		l-c	2.75	-		l-c	8.85	-	
CO_2@5^{12} + empty $5^{12}6^4$	ΔE_1 = 3.36	s-c	2.75	C···O_w	3.07	s-c	8.05	C-O	1.18
								O-C-O	179.3
								C-O···H_w	134.4
		l-c	2.75	-		l-c	8.85	-	
H_2S@5^{12} + empty $5^{12}6^4$	ΔE_1 = 1.53	s-c	2.65	H···O_w	2.31	s-c	7.75	H-S	1.36
								H-S-H	91.8
								S-H···O	167.7
		l-c	2.75	-		l-c	8.85	-	
CH_4@5^{12} + CF_3Br @$5^{12}6^4$	ΔE_3 = -8.65	s-c	2.75	H···O_w	2.77	s-c	7.65	C-H	1.09
								H-C-H	109.2
								C-H···O_w	163.5
		l-c	2.65	Br···O_w	3.58	l-c	8.85	Br-C	1.95
								C-F	1.36
								F-C-Br	111.3
								C-Br···O_w	152.1
CO_2@5^{12} + CF_3Br @$5^{12}6^4$	ΔE_3 = -10.1	s-c	2.75	C···O_w	2.99	s-c	7.85	C-O	1.18
								O-C-O	179.4
								C-O···H_w	142.8
		l-c	2.65	Br···O_w	3.45	l-c	8.85	Br-C	1.95
								C-F	1.36
								F-C-Br	111.1
								C-Br···O_w	154.8
H_2S@5^{12} + CF_3Br @$5^{12}6^4$	ΔE_3 = -11.5	s-c	2.75	H···O_w	2.25	s-c	7.75	H-S	1.36
								H-S-H	91.8
								S-H···O	166.1
		l-c	2.75	Br···O_w	3.64	l-c	8.85	Br-C	1.95
								C-F	1.36
								F-C-Br	111.1
								C-Br···O_w	152.5

4. Discussion and conclusions

The results were discussed in terms of the stability of the CF_3Br molecule in the large cage and how the stability of the specified clathrate hydrates changes in the presence of small guest molecules (H_2S, CO_2, CH_4) placed in the small cage. The structure of an empty cage in the double cage system was found to be less stable than the double cage structure in which both cages were occupied by guest molecules. Compared to empty cages, the cages containing guest molecules were more stable.

In the presence of guest molecules in the small cage, it was observed that the interaction increased when the CF_3Br molecule was introduced into the large cage, compared to when the large cage was empty. This interaction was particularly stronger when an H_2S molecule was present in the small cage, compared to other small cage guest molecules such as CH_4 and CO_2. Here, the first steps were taken using the strong catalyst

CF_3Br, providing further insights into enhancing catalytic power and versatility through the combination of catalysts. The placement of CF_3Br in the large cage (l-c) enhanced the guest-host interactions, thereby increasing the stability of the structure. This demonstrated the potential applicability of clathrate hydrates in energy storage systems. It was observed that as the molecular weight of the guest molecule increases (e.g., H_2S, CO_2), the guest-host interactions become even stronger. This indicates the potential for achieving higher energy density and greater energy storage capacity.

From the results obtained by examining the stability of guest molecules in double cages, it has been observed that the presence of guest molecules in the cages influences each other. The effect of other alkanes on the stability of the double cage will also be explored in future studies. In addition to contributing to basic science, the findings of this study will advance hydrate research. In particular, these results are significant in providing a molecular perspective to recent and ongoing experimental studies (at low temperatures in crystal structures) on clathrate hydrates. Overall, understanding the physical chemistry of gas hydrates is valuable not only for the science of hydrogen-bonded systems but also for future technological advancements.

Acknowledgement

The numerical calculations in this article were partially performed at TUBITAK ULAKBIM, High Performance and Grid Computing Center (TRUBA resources).

Author contribution

The entire article was written by the primary author.

Declaration of ethical code

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

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

References

Alavi, S., Udachin, K., & Ripmeester, J. A. (2010). Effect of guest–host hydrogen bonding on the structures and properties of clathrate hydrates. *Chemistry A European Journal*, 16(3), 1017–1025. https://doi.org/10.1002/chem.200902351

Alavi, S., & Ripmeester, J. A. (2012). Effect of small cage guests on hydrogen bonding of tetrahydrofuran in binary structure II clathrate hydrates. *The Journal of Chemical Physics*, 137(5), 054712. https://doi.org/10.1063/1.4739928

An, T., Zhang, H., Zhang, Q., Wang, Y., & Shi, P. (2018). Influence of CH_4 and C_3H_8 molecules on stability of double-cage of sI clathrate hydrate. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1123, 128-134. https://doi.org/10.1016/j.comptc.2017.11.019

Buch, V., Bauerecker, S., Devlin, J. P., Buck, U., & Kazimirski, J. K. (2004). Solid water clusters in the size range of tens–thousands of H_2O: A combined computational/spectroscopic outlook. *International Reviews in Physical Chemistry*, 23(3), 375-433. https://doi.org/10.1080/01442350412331316124

Buch, V., Devlin, J. P., Monreal, I. A., Jagoda-Cwiklik, B., Uras-Aytemiz, N., & Cwiklik, L. (2009). Clathrate hydrates with hydrogen-bonding guests. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 11(44), 10245-10265. https://doi.org/10.1039/B911600C

Davidson, D. W. (1973). *Water: A Comprehensive Treatise*. In F. Franks (Ed.), Plenum, New York.

Demurov, A., Radhakrishnan, R., & Trout, B. L. (2002). Computations of diffusivities in ice and CO_2 clathrate hydrates via molecular dynamics and Monte Carlo simulations. *The Journal of Chemical Physics,* 116(2), 702-709. https://doi.org/10.1063/1.1425821

Devlin, J. P., & Monreal, I. A. (2010a). Instant Conversion of Air to a Clathrate Hydrate: CO_2 Hydrates Directly from Moist Air and Moist CO_2(g). *The Journal of Physical Chemistry A,* 114(50), 13129-13133. https://doi.org/10.1021/jp110614e

Devlin, J. P., & Monreal, I. A. (2010b). Clathrate–hydrate ultrafast nucleation and crystallization from supercooled aqueous nanodroplets. *Chemical Physics Letters,* 492(1-3), 1-8. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2010.03.072

Falenty, A., & Kuhs, W. F. (2009). "Self-preservation" of CO_2 gas hydrates: Surface microstructure and ice perfection. *The Journal of Physical Chemistry B, 113*(49), 15975–15988. https://doi.org/10.1021/jp906859a

Falenty, A., Hansen, T. C., & Kuhs, W. F. (2014). Formation and properties of ice XVI obtained by emptying a type sII clathrate hydrate. *Nature, 516*(7530), 231–233. https://doi.org/10.1038/nature14014

Fan, X., Xu, L., Liu, L., Minghui, Y., Qun, Z., & Mingli, Y. (2013). Polarization response of methane encapsulated in water cages. *Computational and Theoretical Chemistry,* 1013, 52-56. https://doi.org/10.1016/j.comptc.2013.03.013

Fleyfel, F., & Devlin, J. P. (1988). FT-IR spectra of 90 K films of simple, mixed, and double clathrate hydrates of trimethylene oxide, methyl chloride, carbon dioxide, tetrahydrofuran, and ethylene oxide containing decoupled water-d2. *The Journal of Physical Chemistry,* 92(3), 631-635. https://doi.org/10.1021/j100314a013

Fleyfel, F., Richardson, H. H., & Devlin, J. P. (1990). Comparative sulfur dioxide infrared spectra: Type I and II clathrate hydrate films, large gas-phase clusters, and anhydrous crystalline films. *The Journal of Physical Chemistry,* 94(18), 7032-7037. https://doi.org/10.1021/j100381a021

Frisch, M. J., Trucks, G. W., Schlegel, H. B., Scuseria, G. E., Robb, M. A., Cheeseman, J. R., et al. (2016). Gaussian 16, Revision C.01. Gaussian Inc., Wallingford CT.

Ghosh, J., Bhuin, R. G., Ragupathy, G., & Pradeep, T. (2019a). Spontaneous Formation of Tetrahydrofuran Hydrate in Ultrahigh Vacuum. *The Journal of Physical Chemistry C,* 123, 16300-16307. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b04370

Ghosh, J., Methikkalama, R. R. J., Bhuin, R. G., Ragupathy, G., Choudhary, N., Kumar, R., & Pradeep, T. (2019b). Clathrate hydrates in interstellar environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* 116, 1526-1531. https://doi.org/10.1073/pnas.1814293116

Gulluru, D. B., & Devlin, J. P. (2006). Rates and Mechanisms of Conversion of Ice Nanocrystals to Ether Clathrate Hydrates: Guest-Molecule Catalytic Effects at ∼120 K. *The Journal of Physical Chemistry A,* 110(5), 1901-1906. https://doi.org/10.1021/jp056254u

Hernandez, J., Uras, N., & Devlin, J. P. (1998). Coated Ice Nanocrystals from Water−Adsorbate Vapor Mixtures: Formation of Ether−CO_2 Clathrate Hydrate Nanocrystals at 120 K. *The Journal of Physical Chemistry B,* 102(23), 4526-4535. https://doi.org/10.1021/jp9811474

Jacobson, L. D., & Herbert, J. M. (2010). An efficient, fragment-based electronic structure method for molecular systems: Self-consistent polarization with perturbative two-body exchange and dispersion. *Journal of Chemical Physics*, 133(15), 154108. https://doi.org/10.1063/1.3490188

Kvamme, B., Graue, A., Buanes, T., Kuznetsova, T., & Ersland, G. (2007). Storage of CO_2 in natural gas hydrate reservoirs and the effect of hydrate as an extra sealing in cold aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 1*(2), 236–246. https://doi.org/10.1016/S1750-5836(06)00002-8

Richardson, H. H., Wooldridge, P. J., & Devlin, J. P. (1985). FT-IR spectra of vacuum deposited clathrate hydrates of oxirane, H_2S, THF, and ethane. *The Journal of Chemical Physics,* 83(9), 4387-4394. https://doi.org/10.1063/1.449055

Sloan, E. D. (2023). Fundamental principles and applications of natural gas hydrates. *Nature,* 426(6964), 353-359. https://doi.org/10.1038/nature02135

Sloan, E. D., & Koh, C. A. (2008). *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. 3rd ed. Taylor & Francis, New York.

Staykova, D. K., Kuhs, W. F., Salamatin, A. N., & Hansen, T. (2003). Formation of porous gas hydrates from ice powders: Diffraction experiments and multistage model. *The Journal of Physical Chemistry B, 107*(37), 10299-10311. https://doi.org/10.1021/jp027787v

Takeuchi, F., Hiratsuka, M., Ohmura, R., Alavi, S., Sum, A. K., & Yasuoka, K. (2013). Water proton configurations in structures I, II, and H clathrate hydrate unit cells. *The Journal of Chemical Physics,* 138(12), 124504. https://doi.org/10.1063/1.4795499

Uchida, T., Takeya, S., Kamata, Y., Ikeda, I. Y., Nagao, J., Ebinuma, T., Narita, H., Zatsepina, O., & Buffett, B. A. (2002). Spectroscopic observations and thermodynamic calculations on clathrate hydrates of mixed gas containing methane and ethane: Determination of structure, composition, and cage occupancy. *The Journal of Physical Chemistry B, 106*(48), 12426-12431. https://doi.org/10.1021/jp025884i

Uras-Aytemiz, N., Cwiklik, L., & Devlin, J. P. (2012). Tracking all-vapor instant gas-hydrate formation and guest molecule populations: A possible probe for molecules trapped in water nanodroplets. *The Journal of Chemical Physics,* 137(20), 204501. https://doi.org/10.1063/1.4767370

Uras-Aytemiz, N., Monreal, I. A., & Devlin, J. P. (2011). Communication: Quantitative Fourier-transform infrared data for competitive loading of small cages during all-vapor instantaneous formation of gas-hydrate aerosols. *The Journal of Chemical Physics,* 135(14), 141103. https://doi.org/10.1063/1.3652756

Yang, Y., Yu, H., York, D., Cui, Q., & Elstner, M. (2015). Extension of the Self-Consistent-Charge Density-Functional Tight-Binding Method: Third-Order Expansion of the Density Functional Theory Total Energy and Introduction of a Modified Effective Coulomb Interaction. *Journal of Physical Chemistry A,* 119(3), 620–632. https://doi.org/10.1021/jp508006r

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 463-473 doi: 10.17714/gumusfenbil.1647915 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Düşey gravite gradyentinin yersel ve global değişiminin izlenmesi: Sümela Manastırı örneği

Observation of local and global changes of vertical gravity gradient:the case of Sumela Monastery

Mehmet TÜTÜNCÜ*[1], Nazan YILMAZ[2]

[1]*Gümüşhane Üniversitesi, Kelkit Aydın Doğan Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 29100, Gümüşhane*

[2]*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon*

• Geliş tarihi / *Received*: 27.02.2025 • Kabul tarihi / *Accepted*: 12.04.2025

Öz

Düşey gravite gradyenti (DGG) topoğrafyada ölçülen gravitenin jeoide indirgenmesi için önemlidir. DGG'nin ölçümünün zor olması, uzun zaman almasından dolayı çalışmalarda genellikle global yerpotansiyel modellerden elde edilen DGG değerleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada Trabzon Sümela Manastırı çevresinde sarp ve dağlık bir güzergahta eş zamanlı olarak 115 noktada yapılan gravite ölçüleri ile hassas nivelman ölçüleri yardımıyla yersel olarak DGG değerleri belirlenmiştir. Çalışma sahasında aynı zamanda GNSS ölçüleri de yapılarak global yerpotansiyel modeller (EGM2008, ITU_GGC16, XGM2019) yardımıyla global DGG değerleri hesaplanmıştır. Yersel ölçülerden elde edilen DGG değerleri ile global yerpotansiyel modellerden elde edilen DGG değerleri karşılaştırılmıştır ve yersel DGG değerlerinin yükseklikle değişimi lineer ve kuadratik (non-lineer) denklemlerle ifade edilmiştir. Karşılaştırılan DGG büyüklük farklarına ait minimum, maksimum, ortalama ve karesel ortalama hata değerleri (KOH) hesaplanmıştır. DGG farklarına ait en küçük KOH değerine göre yersel ölçülere en iyi uyum sağlayan global yerpotansiyel modelin ITU_GGC16 olduğu tespit edilmiştir. İstatistiksel sonuçlar incelendiğinde, global yerpotansiyel modeller yerine yeryüzünde doğrudan ölçülen düşey gravite gradyenti değerlerinin kullanılmasının gerekliliği bir daha ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Düşey gravite gradyenti, Gravite, Global yerpotansiyel model

Abstract

The vertical gravity gradient (VGG) is crucial for reducing gravity values measured on the topography to the geoid. Due to the difficulty and time-consuming nature of VGG measurements, values derived from global geopotential models are commonly used in practical studies. In this study, terrestrial VGG values were determined based on gravity observations conducted simultaneously at 115 stations, along with precise leveling measurements, along a steep and mountainous route in the vicinity of the Sümela Monastery in Trabzon, Türkiye. In addition, GNSS observations were carried out in the study area, and global VGG values were computed using various global geopotential models (EGM2008, ITU_GGC16, XGM2019). The terrestrial VGG values were then compared with the model-derived values, and the variation of the terrestrial VGG with height was modeled using both linear and quadratic (non-linear) equations. The minimum, maximum, mean, and root mean square error (RMSE) values of the differences between terrestrial and model-based VGG values were calculated. Based on the lowest RMSE among the compared models, the ITU_GGC16 model was found to provide the best agreement with the terrestrial measurements When the statistical information was analyzed, it was observed that using directly measured vertical gravity gradient values on the ground instead of global geopotential models gave better results.

Keywords*:* Vertical gravity gradient, Gravity, Global geopotential model

*Mehmet TÜTÜNCÜ; mehmettutuncu@gumushane.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Günümüzde jeodezik, jeofizik ve jeolojik amaçlarla gravite alanına bağlı gravite ölçüleri yapılmaktadır. Fiziksel yeryüzünün gravite alanını tespit etmek için üç farklı ölçme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemler yersel yöntem, hava gravimetrisi ve uzaysal yöntemlerdir. Fiziksel yeryüzündeki bir noktanın gravite değerinin µGal biriminde belirlenebilmesi için yapılan ölçmeler yersel yöntem olarak isimlendirilir. Yersel yöntemler mutlak gravimetrik yöntem ve bağıl gravimetrik yöntem olmak üzere iki kısımda incelenir. Mutlak gravimetrik yöntemde nokta gravite değeri doğrudan bulunur. Bağıl gravimetrik yöntemde ise bir bölgedeki birden fazla noktaya ait gravite değerlerindeki değişimler belirlenir. Bağıl gravimetrik yöntemde sadece zaman veya sadece uzunluk ölçülerek iki nokta arasındaki gravite değerlerinin farkı belirlenir. Düşey gravite gradyanı, mutlak/bağıl gravite ölçüm sürecinde ve gravite ölçüm sonuçlarını aletin referans yüksekliğinden kıyas noktasına indirgemek için gravimetrik ve nivelman ağlarının kurulmasında önemlidir. Temel jeodezi görevlerinden biri, ortalama deniz seviyesi yüzeyi ile çakışan eşpotansiyel yüzeyi temsil eden jeoidin belirlenmesidir. Bu anlamda gravitenin belirlenmesi ve gravite ölçülerinin jeodezik ölçütler seviyesine indirgenmesi jeodezinin önemli faaliyetler arasındadır. Gravite değerinin jeoide indirgenmesi için gravite gradyent değerinin bilinmesi gerekir. Düşey gravite gradyenti (DGG), yükseklikle gravitenin korelasyonunu temsil etmektedir (Simav vd., 2021). Farklı yüksekliklerdeki gravite farklarının yüksekliğe oranı ile DGG hesaplanır (Odalovic vd., 2022). Yerkabuğunun altındaki katmanlarda yoğunluk anomalileri, lokal ve bölgesel topografyanın etkisi nedeniyle, düşey gradyentin gerçek değeri normal gravite değerinden önemli ölçüde farklı olabilir. DGG, bir noktanın yalnızca yüksekliğiyle değil aynı zamanda noktanın etrafındaki topografya ve jeolojisiyle değişmektedir (Hunt vd., 2002).

DGG'nin modellenmesine ilişkin çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Rocky Dağları'nda yapılan bir araştırmada, jeoid modellemesi için ortalama gravite gradyentini belirlemek amacıyla aşağı uzanım tekniği kullanılmıştır (Vanícek vd., 2002). Macaristan'ın Cegled bölgesinde ise gravite gradyent verilerine dayanarak bir jeoid modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmada, normal gradyent değerleri yerine modellenmiş gradyentlerin kullanılmasının gravite alanı modellemesini daha da iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. (Völgyesi, 2001). Macaristan'da 3 farklı gravite ölçer kullanarak farklı yükseklikte 3-4 seri gravite ölçüsü yapılarak düşey gradyentin doğrusal olmayışı araştırılmıştır. Düşey gradyent değerini, lineer ve kuadratik yaklaşımlarla dengeleyerek belirlemişler, ardından farklı yaklaşım sonuçlarını karşılaştırmışlardır (Csapo & Völgyesi, 2004). Macaristan'ın Sóskút kentinde, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ve prizma entegrasyonu yöntemi kullanılarak DGG değerleri hesaplanmıştır. (Rózsa & Tóth, 2005).

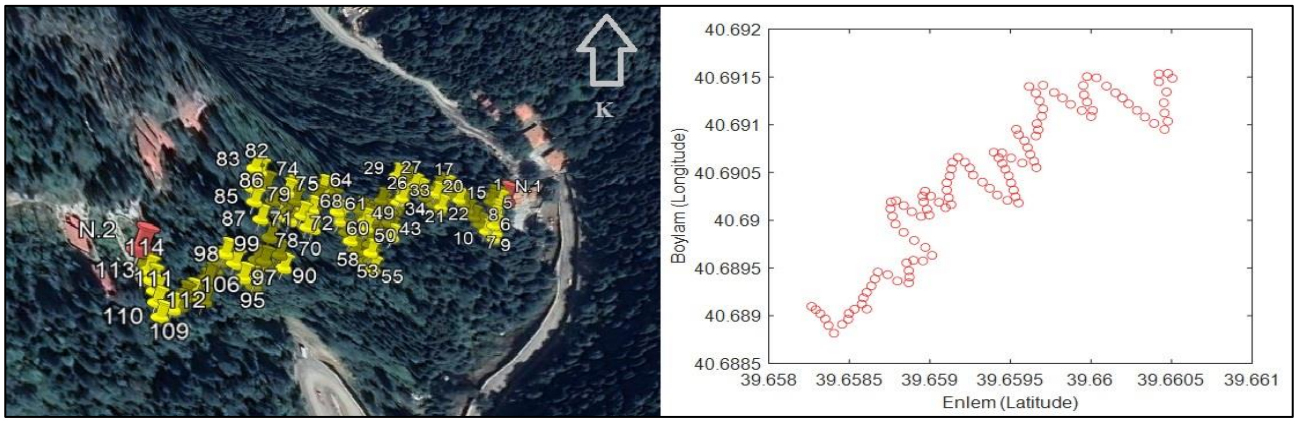
Kanada'daki Rocky Dağları'nda yapılan bir çalışmada, gravite indirgemesi için ortalama gravite gradyenti kullanılmıştır. Araştırmada, topoğrafyadaki kütle yoğunluğu dağılımının, yeryuvarının şeklinin ve gravite gradyentinin derinlikle değişiminin ortalama gravite gradyentine etkisi incelenmiştir. Çekül eğrisi boyunca topoğrafyadaki ortalama gravite gradyent değeri bir eşitlik yardımıyla ifade edilmiştir (Tenzer & Ellmann, 2009). Polonya'da yapılan bir çalışmada, özellikle dağlık bölgelerde, mutlak gravite indirgemesinde normal DGG'nin kullanılmasının, 1 metre için 100 µGal'i aşan hatalara yol açtığı tespit edilmiştir. (Dykowski, 2012). İspanya'da bulunan Tenerife adasında çözünürlüğü yüksek SYM kullanılarak düşey gravite gradyent değerleri elde edilmiştir (Marušiak vd., 2013). Çalışmada, modellenen değerlerin normal değerlere göre %60'a kadar farklılık gösterebildiği belirlenmiştir. Özellikle volkanik alanlardaki mikrogravimetrik ölçümlerde, modellenen değerlerin kullanılmasının önemli olduğu vurgulanmıştır. Düşey gravite gradyenti modellemesi için Toposk adlı bir yazılım kullanılmıştır. Bu yazılım, topoğrafyanın etkisini normal düşey gravite gradyentine ekleyerek ilgili noktadaki DGG değerini hesaplamıştır. İtalya'da Teide volkanı çevresinde yapılan bir çalışmada modellenen ve ölçülen DGG değerleri arasında düz alanlarda uyumlu sonuçlar elde edilirken dik topoğrafyalarda daha uyumsuz sonuçlar elde edilmiştir (Zahorec vd., 2016). Slovenya ve Sırbistan'da yapılan çalışmada yerçekimi ölçümleri ya da global yerpotansiyel modeller gibi ek veriler kullanılmadan, yalnızca normal yerçekimi alanı ve dijital arazi modelleri kullanılarak düşey yerçekimi gradyanının modellenebileceği gösterilmiştir. Düşey gradyan değerleri ile ölçüm sonuçları arasındaki farkların, kullanılan arazi modelinin çözünürlüğüne bağlı olarak değiştiği, yüksek çözünürlüklü modellerle çok daha hassas sonuçlar elde edildiği görülmüştür (Odalovic vd., 2022) İtalya'da Teide volkanı çevresinde yapılan başka bir çalışmada DGG ölçümleri gerçekleştirilmiş ölçülemeyen noktalarda sabit bir normal gradyan değeri (−308.6 µGal/m) kullanılmakta ancak bu durum özellikle dağlık ve volkanik alanlarda %90'a kadar hatalara yol açtığı görülmüştür. Bunun için topografik etkilerin modellenmesine dayalı yerel VGG tahmini yöntemi önerilmiştir (Zahorec vd., 2024).

Bu çalışmada Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan Sümela Manastırı çevresinde dağlık ve sarp bir topoğrafyada eş zamanlı olarak bağıl gravimetrik ölçümler, hassas nivelman ölçümleri ve GNSS ölçümleri yapılarak DGG tespit edilmiştir. DGG değerlerinin yükseklikle değişimi irdelenmiştir. Ayrıca global yerpotansiyel modeller (EGM2008, ITU_GGC16, XGM2019) kullanılarak elde edilen sonuçlarla yeryüzündeki gravimetrik ölçümlerden elde edilen DGG değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiş ve istatistiksel değerleri sunulmuştur. Test bölgesi yaklaşık 1 km uzunluğunda olup 210 metre bir yükseklik değişimine sahip çok dik bir topografyadır. Bu özelliği sebebiyle seçilen bu test bölgesi böylesi bir çalışma için ender rastlanacak bir alandır.

2. Materyal
2. Material

2.1. Çalışma alanı
2.1. Study area

Bu çalışmada kullanılan gravite ve Küresel Konum Belirleme Sistemleri (GNSS)/Nivelman ölçümlerinin tamamı, Trabzon ili Maçka ilçesi Sümela Manastırı çevresinde belirlenen bir güzergâhta gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı sarp ve dağlık bir topoğrafyaya sahip olup güzergâh uzunluğu yaklaşık 1 km ve ortalama yüksekliği 1200 m'dir. Ölçü güzergâhına ait Google Earth görüntüsü ve ölçü güzergâhı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Ölçü Güzergahı
Figure 1. *Measurement Route*

2.2. Arazi ölçümleri
2.2. Land measurements

Tüm ölçümler $40°41'7412 < \varphi < 40°41'5368''$ enlem ve $39°39'6172 < \lambda < 39°39'9044''$ boylam değerlerini kuşatan bir bölgede 2023 yılının Ekim ayında toplanmıştır. Kullanılan ölçüm cihazları Şekil 2'de gösterilmiştir.

Şekil 2. Arazide kullanılan cihazlar (a) Bağıl gravimetre (b) Nivo (c) GNSS RTK alıcı
Figure 2. *Equipment used in the field (a) levelling instrument (b) relative gravimetre (c) GNSS RTK receiver*

2.2.1. Hassas nivelman ölçüleri
2.2.1. Precision levelling measurements

Şekil-1'de gösterilen güzergâh boyunca hassas nivelman ölçümleri gerçekleştirilmiş ve noktaların ortometrik yükseklikleri belirlenmiştir. Nivelman ölçüleri Topcon DL-501 dijital nivo ile yapılmıştır (Şekil-2b). Miranın düşey konumda ve zemine sağlam şekilde yerleştirilmesini sağlayan, ölçüm doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini artıran mira altlığı kullanılmıştır. Hassas nivelman çalışmalarında ölçü doğruluğunu artırmak ve sistematik hataları minimize etmek amacıyla geri, ileri, ileri, geri (GIIG) ölçü yöntemi uygulanmıştır. Önce 1. miraya geri, sonra 2. miraya ileri, ileri daha sonra 1. miraya tekrar geri okuma yapılmıştır. Böylece, miradaki bölme hatası, mira eğikliği ve gözlemci kaynaklı okuma sapmaları gibi sistematik hatalar karşılıklı olarak dengelenmiştir. Ölçümler sırasında cihaz, geri ve ileri mira arasına eşit mesafelerde olmasına dikkat edilmiştir. Bu yöntem, özellikle milimetre mertebesinde doğruluk gerektiren jeodezik uygulamalarda tercih edilmekte olup, ölçümlerin tekrarlanabilirliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır. Her noktaya üç okuma yapılıp ölçümlerin ortalaması alınmış ve ölçüm noktası arasındaki yükseklik farkı hesaplanmıştır. Kullanılan cihazın hassasiyeti yatayda ±10 mm düşeyde ±1 mm'dir.

2.2.2. Gravite ölçüleri
2.2.2. Gravity measurements

Şekil-1'de verilen güzergâh boyunca noktalar arasındaki bağıl gravite değerleri belirlenerek noktalara ait mutlak gravite değerleri hesaplanmıştır. Gravite ölçümleri kalibre edilmiş Scintrex CG-5 gravimetreyle ölçülmüştür (Şekil-2b). Gravite verilerinin kalitesinin sağlanması amacıyla ölçüm sürecinde kapsamlı bir kontrol mekanizması uygulanmıştır. Bu kapsamda, her ölçüm noktasında tekrarlı ölçümler alınarak cihazın ölçüm tekrarlanabilirliği test edilmiş, gün başı ve gün sonu yapılan referans ölçümleri ile cihazın günlük sürüklenme (drift) değeri belirlenmiş ve tüm ölçümlere drift düzeltmesi uygulanmıştır. Ölçüm zamanlarının UTC sistemine uygun biçimde kaydedilmesiyle birlikte, cihaz tarafından otomatik olarak gelgit düzeltmeleri (tidal corrections) gerçekleştirilmiştir. Her noktada gravimetre 3 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Her dakika için kaydedilen son değer, 60 saniyelik ölçümlerin ortalaması olarak alınmıştır. Geleneksel yerçekimi gradyan birimi, Eötvös birimi olarak adlandırılır (1(E)Eötvös=10^{-9}sn^{-2} = 0.1 μgal/m) (Hunt vd., 2002).

2.2.3. GNSS ölçüleri
2.2.3. GNSS measurements

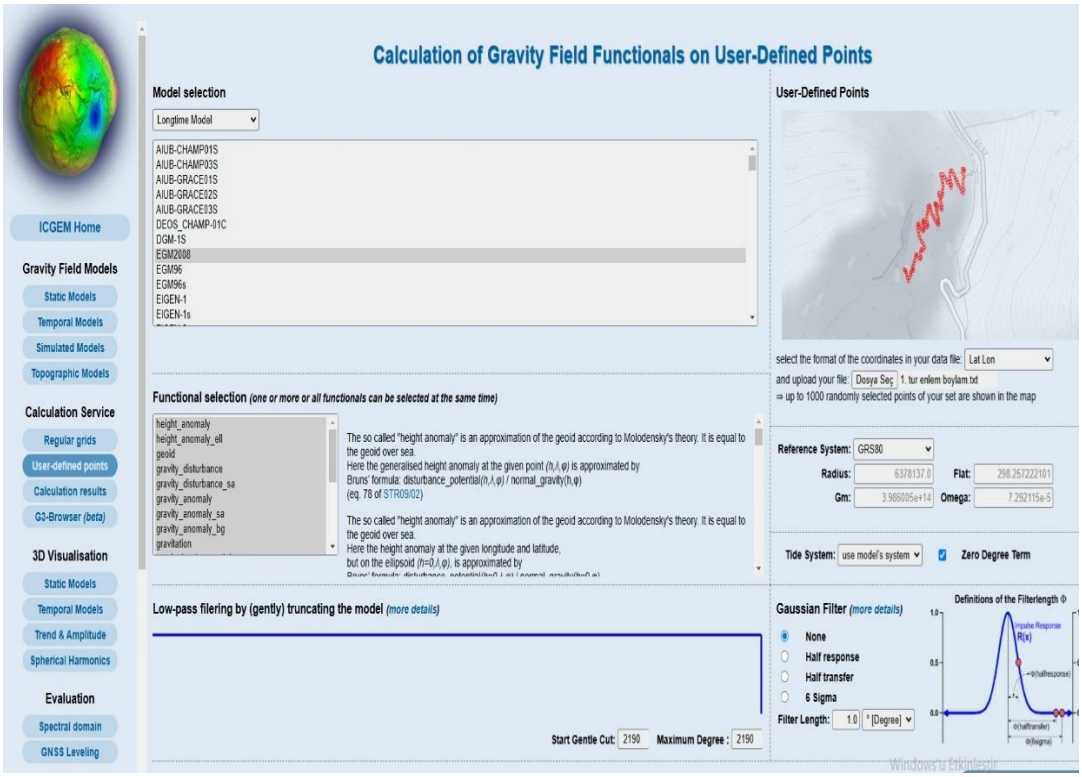
Güzergahtaki noktaların koordinatları CHCNAV i93 Visual IMU-RTK GNSS yardımıyla Ağ-RTK yöntemiyle arazide belirlenmiştir (Şekil-2c). WGS-84 elipsoidi ITRF96 datumunda UTM 3^0'lik koordinat sisteminde ölçüler gerçekleştirilmiştir.

2.2.3.1. Ağ-RTK tekniği
2.2.3.1. Network-RTK technique

GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, OZSS uydularından veri alan CHCNAV i93 Visual IMU-RTK GNSS alıcı cihazı bir nokta üzerine kurulmuştur. İnternet bağlantısı yardımıyla alıcı cihaza bağlanıp TUSAGA-Aktif istasyonları yardımıyla cihazın kurulduğu noktanın koordinatı daha sonra gezici GNSS ve el ünitesi yardımıyla güzergahtaki 115 noktanın koordinatları belirlenmiştir. Konum doğruluğu yatayda 10 mm düşeyde 15 mm hassasiyetinde gerçekleştirilmiştir.

2.2.4. Global yerpotansiyel modeller
2.2.4. Global geopotential models

Jeodezik çalışmalarda CHAMP, GRACE ve GOCE gibi alçak yörüngeli uydulardan yeryuvarı gravite alanı bilgileri doğrultusunda elde edilen global yerpotansiyel modelleri ve bu modellere ait veriler ICGEM (International Centre for Global Earth Models) web sayfasında yayınlanmaktadır (Şekil 3) (ICGEM, 2024). ICGEM web sayfasında bugüne kadar oluşturulmuş 180 adet global yer potansiyel modeli mevcuttur (ICGEM, 2024). Modellerin seçiminde üretim yılı, veri kaynağı, bölgesel uyumluluk ve küresel harmonik açınımının derecesi dikkate alınmıştır. EGM2008 ve XGM2019 küresel modeller olduklarından, ITU_GGC16 bölgesel model olduğundan seçilmiştir. XGM2019 modeli yüksek çözünürlüğe sahip ve EGM2008 modeline göre daha güncel bir modeldir. ITU_GGC16 modeli ülkemizde üretilen ülkemiz için optimize edilen bir modeldir.



Şekil 3. ICGEM (Uluslararası Küresel Yer Modelleri Merkezi)
Figure 3. *ICGEM (International Centre for Global Earth Models)*

Bu çalışma için belirlenen ve ICGEM sayfasından elde edilen global yerpotansiyel modelleri hakkında bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Bu çalışma için ICGEM sayfasından modellerin gravite verilerine ulaşılmış ardından hassas nivelman ölçülerinden elde edilen yükseklikler ve GNSS ölçülerinden elde edilen coğrafi koordinatlar yardımıyla istenilen modele ait düşey gravite gradyent değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 1. ICGEM sayfasından elde edilen global yerpotansiyel modellere ait bilgiler
Table 1. *Information on global geopotential models obtained from the ICGEM website*

Model Adı	Yıl	Derece	Veri Kaynağı	Referans
EGM2008	2008	2190	A, G, S (Grace)	Pavlis, N.K. et al, 2012
ITU_GGC16	2016	280	S (Goce, Grace)	Akyılmaz et al, 2016
XGM2019	2019	2190	A, G, S (GOCO06s), T	Zingerle, P. et al, 2019

3. Metot
3. Method

Yeryüzünde duran bir cisme yerçekimi ve merkezkaç kuvvetlerinin bileşke kuvveti etki eder. Yerçekimi, dünyanın kütlesi nedeniyle cisimlere uyguladığı çekim kuvvetidir. Merkezkaç kuvveti ise dünyanın kendi ekseni etrafında dönmesi sonucu ortaya çıkar. Bu iki kuvvetin bileşkesi, gravite olarak adlandırılır. Gravitenin potansiyeli,

$$W = V + \Phi = G \iiint_{yeryuvarı} \frac{\rho}{l} dv + \frac{1}{2}\omega^2(x^2 + y^2) \quad (1)$$

denklemindeki yerçekimi ve merkezkaç potansiyellerinin toplamına eşittir. Eşitlik-1'de V; çekim potansiyelini Φ; merkezkaç potansiyelini ifade etmektedir. Gravite potansiyelinin gradyent vektörleri,

$$g = grad\, W = \left(\frac{\partial W}{\partial x}, \frac{\partial W}{\partial y}, \frac{\partial W}{\partial y}\right) \qquad g_x = \frac{\partial W}{\partial x}, g_y = \frac{\partial W}{\partial y}, g_z = \frac{\partial W}{\partial z} \quad (2)$$

denklemiyle ifade edilir. Eşitlik-2'de g; gravite vektörünü, $\frac{\partial W}{\partial x}(g_x), \frac{\partial W}{\partial y}(g_y), \frac{\partial W}{\partial y}(g_z)$ gravite vektörünün bileşenlerini oluşturur (Heiskanen & Moritz, 1967).

Gravitenin düşey gradyenti ($\Delta g/\partial H$) (Akdoğan vd., 2024), arazide yapılan eş zamanlı gravite ve hassas nivelman ölçülerine bağlı olarak eşitlik-3 kullanılarak hesaplanmıştır. Topografyanın karmaşıklığı, gravite farklarının ölçümünde kısa mesafede büyük değişimlere neden olmuş, bu da gravite gradyanının duyarlılığını test etme açısından önemli bir fırsat sunmuştur.

$$W_{zz}(h_i) = \frac{g(h_1)-g(h_2)}{\Delta h} \quad (3)$$

$g(h_i)$ ölçüm seviyesindeki gravite değeri, $g(h_0)$ referans yüksekliğindeki gravite değeri, Δh noktalar arasındaki yükseklik farkı ve $W_{zz}(h_i)$ ise DGG'dir (Akdoğan, 2020).

Güzergahta ölçülen gravite değerlerinden hesaplanan gerçek DGG değerleri ile global yer potansiyel modellerden elde edilen gravite değerlerinden hesaplanan DGG değerleri arasındaki farklar eşitlik-4 kullanılarak bulunmuştur.

$$\Delta W_{ZZ} = W_{zz_{gerçek}} - W_{zz_{model}} \quad (4)$$

Eşitlik-4'te ΔW_{zz} DGG farkını, $W_{zz_{gerçek.}}$ arazide ölçülen gravite değerinden hesaplanan DGG değerini, $W_{zz_{model}}$ global yer potansiyel modelin gravite değerinden hesaplanan DGG değerini ifade etmektedir.

Ölçülen değerler ile modellenen değerler arasındaki farkların büyüklüğü hakkında bilgi veren karesel ortalama hata (RMSE) değerleri eşitlik-5'e göre hesaplanmıştır.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(W_{zz_{gerçek}} - W_{zz_{model}})^2} \quad (5)$$

Eşitlik-5'te $W_{zz_{gerçek}}$ ölçülerden elde edilen DGG değerini $W_{zz_{model}}$ modellerden elde edilen DGG değerini, n ölçü sayısını ifade etmektedir.

3.1. Lineer regresyon yöntemi
3.1. Linear regression equation

Bir bağımlı değişken (y) ile bir veya daha fazla bağımsız değişken (x) arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılan temel bir istatistiksel yöntemdir. Bu denklem, bağımsız değişkenin değişimlerine bağlı olarak bağımlı değişkenin nasıl değiştiğini anlamamıza yardımcı olur. Veriler arasındaki doğrusal ilişkiyi anlamak ve tahminler yapmak için kullanılan bir yöntemdir. Verilerin eğilimlerini çözümleyerek gelecekteki değerleri tahmin etmede, ilişkileri analiz etmede ve kararlar almada kullanılabilir. Lineer regresyon için ;

$$\mathrm{y} = \mathrm{ax} + \mathrm{b} \quad (6)$$

denklemi kullanılmıştır (Bruce vd., 2020). Eşitlik-6'da a ve b katsayıları gösterirken, x bağımsız değişkendir.

3.2. Kuadratik (non-lineer) regresyon yöntemi
3.2. Quadratic (non-linear) regression equation

Bir bağımlı değişkenin (y) bağımsız değişkenlere (x) doğrusal olmayan bir ilişkiyle bağlı olduğu durumlarda kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu tür regresyon, doğrusal olmayan matematiksel denklemlerle veri arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılır. Lineer regresyonun aksine, non-lineer regresyon denklemi, daha karmaşık bir ilişkiyi ifade eder. Non-lineer regresyon, özellikle doğrusal ilişkilerin yeterli olmadığı ve daha karmaşık modellere ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılır. Bu çalışmada DGG değerinin yükseklikle değişimi kuadratik (non-lineer) denklemlerle ifade edilmiştir (Bruce vd., 2020). Kuadratik regresyon için ;

$$\mathrm{y} = ax^2 + bx + c \quad (7)$$

denklemi kullanılmıştır. Eşitlik-7'de a, b ve c katsayıları gösterirken, x bağımsız değişkendir.

4. Bulgular ve tartışma
4. Results and discussion

Çalışma bölgesinde, toplamda 115 noktada bağıl gravimetre yardımıyla yapılan gravite ölçümleri belirlenmiştir. Gravite ölçümleriyle eş zamanlı yapılan nivelman ölçümlerinden elde edilen yükseklik farkları hesaplanmıştır. Gravite ve nivelman ölçülerinin analiz edilmesi sonucu, gerçek DGG değeri hesaplanmış ve hesaplanan değerlere ait istatistiksel bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

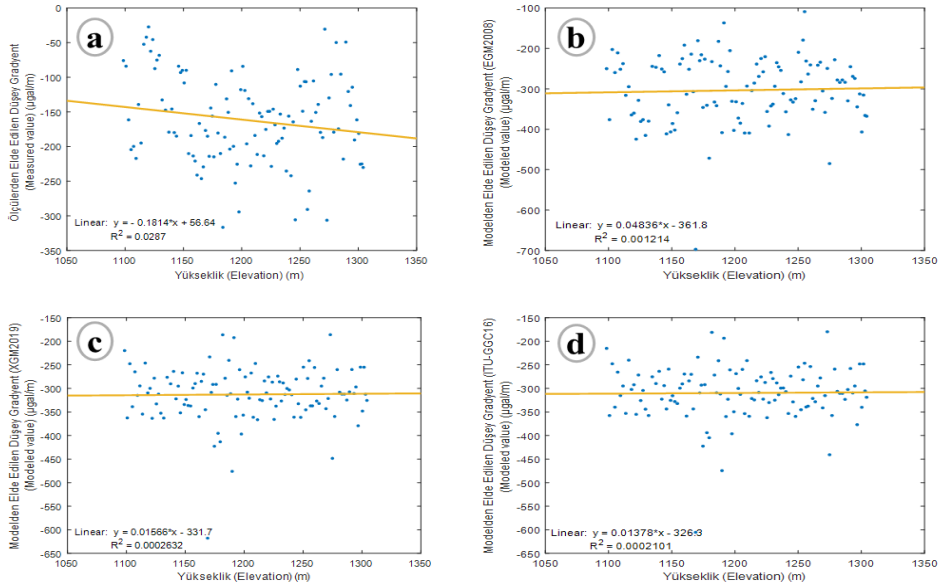
Tablo 2. Gerçek DGG değerine ait istatistiksel bilgiler
Table 2. *Statistical information on the actual DGG value*

	Min. (Eötvös)	Max. (Eötvös)	Ort. (Eötvös)	Std. Dev. (Eötvös)	RMSE (Eötvös)
$DGG_{gerçek}$	272	3166	1618	627	1734

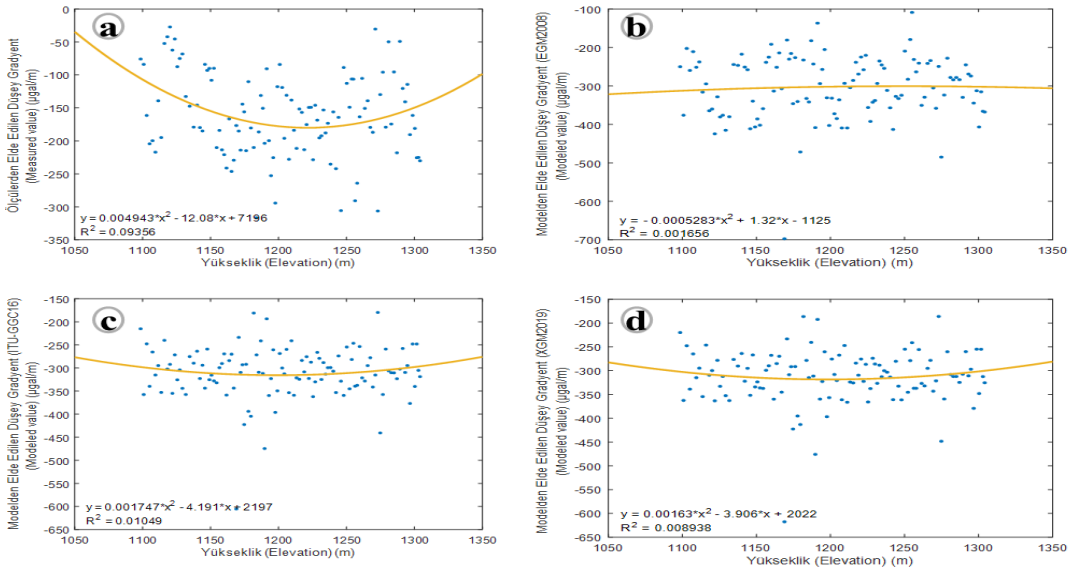
Araziden alınan gravite değerlerinden elde edilen gerçek DGG değerleri ile ICGEM sayfasından alınan modellerin gravite değerlerinden hesaplanan DGG değerlerinin yükseklikle değişimine bakılmıştır. Gerçek DGG değerleri ile modellerden elde edilen DGG değerlerinin yükseklikle değişiminin lineer ilişkisi şekil 4'te, kuadratik ilişkisi şekil 5'te gösterilmiştir. DGG değerlerinin yüksekliğe bağlı değişimini temsil eden lineer ve kuadratik denklemlerin katsayıları ve determinasyon katsayıları hesaplanmıştır. Lineer ve kuadratik denklemlerin parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Lineer ve kuadratik denklemlerin parametreleri
Table 3. *Parameters of linear and quadratic equations*

	Lineer			**Kuadratik (Non-lineer)**			
	a	**b**	**R^2**	**a**	**b**	**c**	**R^2**
DGG	-0.1814	56.64	0.029	0.0049	-12.07	7194	0.094
EGM2008	0.0484	-361.80	0.001	0.0005	1.32	-1125	0.002
ITU_GGC16	0.0138	-326.30	0.000	0.0018	-4.19	2197	0.011
XGM2019	0.0157	-331.70	0.000	0.0016	-3.90	2020	0.009

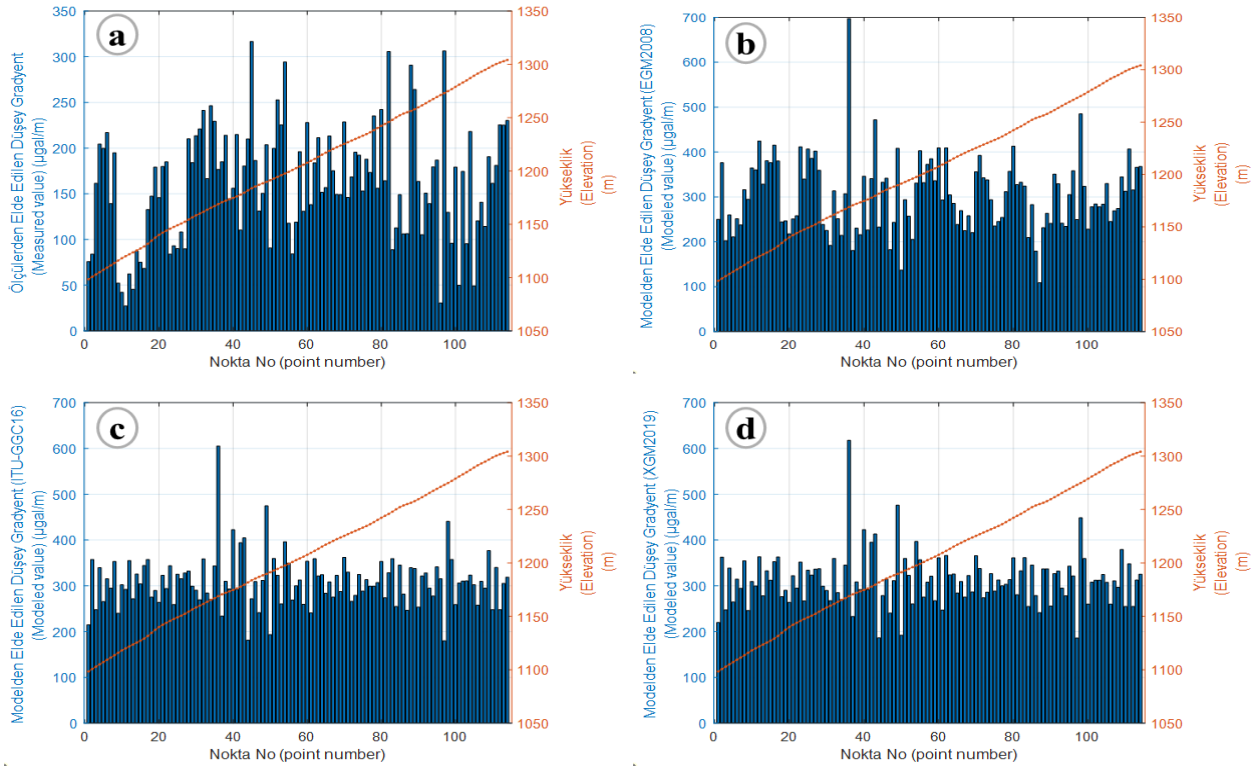


Şekil 4. Gravite gradyent değerlerinin yükseklikle değişimi (lineer) (a) Yükseklik-$DGG_{gerçek}$. (b) Yükseklik-$DGG_{EGM2008}$. (c) Yükseklik-DGG_{ITU_GGC16}. (d) Yükseklik-$DGG_{XGM2019}$.
Figure 4. *Variation of gravity gradient values with elevation (linear) (a) Elevation-DGG_{real}. (b) Elevation-$DGG_{EGM2008}$. (c) Elevation-DGG_{ITU_GGC16}. (d) Elevation-$DGG_{XGM2019}$.*



Şekil 5. Gravite gradyent değerlerinin yükseklikle değişimi (kuadratik) (a) Yükseklik-$DGG_{gerçek}$. (b) Yükseklik-$DGG_{EGM2008}$. (c) Yükseklik-DGG_{ITU_GGC16}. (d) Yükseklik-$DGG_{XGM2019}$.
Figure 4. *Variation of gravity gradient values with elevation (quadratic) (a) Elevation-*DGG_{real}*. (b) Elevation-*$DGG_{EGM2008}$*. (c) Elevation-*DGG_{ITU_GGC16}*. (d) Elevation-*$DGG_{XGM2019}$*.*

Lineer ve kuadratik (non-lineer) denklemlerin R^2 değerlerine göre DGG değerlerinin yükseklikle arasındaki ilişkinin düşük olduğu görülmektedir. Denklemlerin düşük eğilim göstermesi DGG değerlerinin yükseklik dışında literatürü destekleyen başka parametrelere bağlı olduğunu göstermektedir. Gerçek DGG değerleri ile modellerden elde edilen DGG değerlerinin nokta yüksekliğine göre değişimi gösteren histogram Şekil 6'da sunulmuştur.



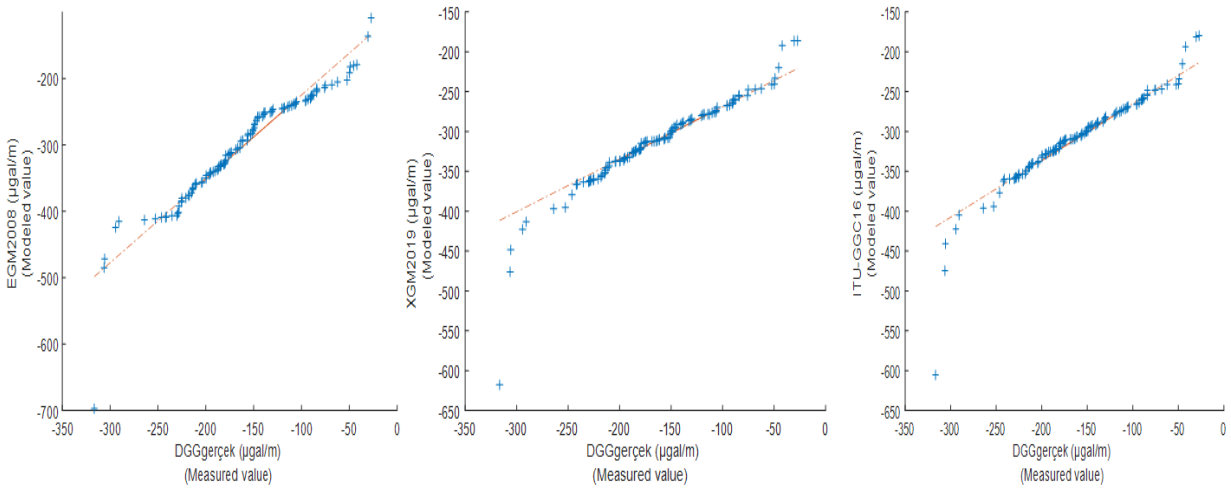
Şekil 6. DGG değerlerinin nokta yüksekliklerine göre değişimi (a) $DGG_{gerçek}$-nokta yüksekliği (b) $DGG_{EGM2008}$-nokta yüksekliği (c) DGG_{ITU_GGC16}-nokta yüksekliği (d) $DGG_{XGM2019}$-nokta yüksekliği
Figure 6. *Variation of DGG values with point elevations (a)* $DGG_{gerçek}$-point elevation (b) $DGG_{EGM2008}$- point elevation (b) DGG_{ITU_GGC16}- point elevation (b) $DGG_{XGM2019}$- point elevation

ICGEM sayfasında hesaplatılan 3 adet global model için DGG değerleri ile gerçek DGG değerleri arasındaki farklar alınmış ve bu farklara ilişkin istatistiki bilgiler Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Gerçek DGG değerleri ile global modellerden elde edilen DGG değerleri arasındaki farklara ilişkin istatistiki bilgiler
Table 4. *Statistical information on the differences between the actual DGG values and the DGG values obtained from the global models*

	Min. (Eötvös)	Max. (Eötvös)	Ort. (Eötvös)	RMSE (Eötvös)
EGM2008	7	5204	1453	1788
ITU_GGC16	226	4286	1514	1684
XGM 2019	234	4410	1542	1718

RMSE hata değerlerine bakıldığında; gerçek DGG değeriyle en iyi uyum sağlayan global modelin ITU_GGC16 modeli olduğu ve buna karşın en az uyumun ise EGM2008 modeli ile olduğu görülmektedir. Şekil 7, gerçek DGG değerleri ile modellerden elde edilen DGG değerleri arasındaki korelasyonu göstermektedir. Grafikler DGG değerlerinin teorik bir dağılımla uyumunu görselleştirmiştir. Grafikteki turuncu çizgiler y=ax+b şeklinde doğrusal regresyon eğilimini göstermektedir. Şekil 7'ye göre; EGM2008 modelinden elde edilen DGG değerlerinin gerçek DGG değerlerine göre daha hızlı bir şekilde arttığını gösterir. 1.262'lik eğim, EGM2008 modelinin gerçek DGG'ye kıyasla sistematik olarak daha yüksek bir eğilim gösterdiği anlamına gelir. Bu sonuçlara göre, modelin genel olarak başarılı bir uyum sağladığı, ancak sistematik bir sapma içerdiği söylenebilir. 0.711'lik eğim ITU_GGC16 modelinden elde edilen DGG değerlerinin, gerçek DGG değerlerine kıyasla daha yavaş bir artış gösterdiğini ifade eder. ITU_GGC16 modelinin gerçek DGG değerleriyle doğrusal bir ilişki sergilediğini ancak ölçümlerle birebir uyumlu olmadığını göstermektedir. 0.658 eğimi, XGM2019 modelinden elde edilen değerlerin gerçek DGG değerleriyle birebir oranda artmadığını, ancak belirli bir pozitif ilişki olduğunu göstermektedir. Gerçek DGG değerleriyle XGM2019 modelinin DGG değerleri arasında genel bir doğrusal ilişki olduğu ancak bazı uç durumlarda sapmaların bulunduğu görülmektedir. XGM2019 modeli makul bir doğrulukla gerçek DGG değerleriyle ilişkili olsa da ancak bire bir uyumlu olmadığı görülmektedir. DGG değerleri ile en uyumlu modelin ITU_GGC16 olduğu ancak eğim değerlerinin 1'den uzaklaştığı için modellerin çok fazla uyum göstermediği görülmüştür. Sonuç olarak gerçek test bölgesindeki eğim farklılıklarının, global yer potansiyel modelleriyle kıyaslandığında sapmalara neden olduğu belirlenmiştir. Bu durum, bölgeye özgü topoğrafyanın, modelleme sonuçları üzerinde belirgin etki yarattığını göstermektedir.



Şekil 7. DGG değerlerinin nokta yüksekliklerine göre değişimi
Figure 7. *Tendency of Linear Regression between DGG obtained with Measurements and DGG obtained with Models*

5. Sonuç
5. Conclusion

Bu çalışmada Trabzon ili Sümela Manastırı çevresinde dağlık ve sarp bir bölgede düşey gravite gradyent tespiti için eş zamanlı gravite ve GNSS/Nivelman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın dağlık ve sarp topoğrafyada gerçekleştirilmiş olması, yöntemsel yaklaşımın sınanmasına ve gravite gradyan değerlerinin doğrusal olmayan dağılımının belirlenmesine olanak tanımıştır. Bu yönüyle, yalnızca Türkiye için değil, benzer morfolojik özellikler taşıyan küresel bölgeler için de örnek teşkil etmektedir. Topografik açıdan benzersiz bir alanda gerçekleştirilmesi sayesinde, mevcut yöntemlerin esneklik ve uygulanabilirlik sınırlarını ortaya koymuştur. Arazi koşullarının alışılmışın dışında olması, çalışmanın yalnızca yerel bağlamda değil, benzer topografik özellikler taşıyan diğer bölgelerde de referans alınabilecek bir yöntem ortaya koymasını sağlamıştır. Gravite ve GNSS/Nivelman ölçülerinden elde edilen DGG değerlerinin yükseklikle değişimi ve global yerpotansiyel modellerle arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bunun için EGM2008, ITU_GGC16, XGM2019 global yerpotansiyel modelleri kullanılmıştır. Lineer ve kuadratik denklemlerin R^2 değerleri incelendiğinde DGG değerleri ile yükseklik arasında zayıf bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Bu ilişki literatürüde destekleyen (Hunt vd., 2002) DGG'nin yükseklikten ziyade başka faktörlere (topoğrafya, jeoloji) bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca ölçülerden elde edilen DGG'ler global yerpotansiyel modellerden elde edilen DGG'ler ile karşılaştırılmıştır. Çalışma alanında ölçülen gravite ve yükseklik değerlerinden elde edilen gerçek DGG değerleri ile modellerden elde edilen DGG değerleri ile arasındaki ilişki incelendiğinde RMSE değerleri küçükten büyüğe doğru sırasıyla ITU_GGC16, XGM2019 ve EGM2008 şeklindedir. Bu karşılaştırmalara göre gerçek DGG değerleriyle en uygun modelin ITU_GGC16 olduğu görülmektedir. Sonuç olarak global yerpotansiyel modeller kullanılarak belirlenen düşey gravite gradyenti değerleri yerine yeryüzünde ölçülen düşey gravite gradyent değerlerinin dikkate alınmasının sonucu ortaya çıkmıştır.

Teşekkür
Acknowledgement
Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından BAP06 kodlu 10862 proje numarası ile maddi olarak desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne ve makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakem/hakemlere teşekkür ederiz.

Yazar katkısı
Author contribution

Bu çalışmaya tüm yazarlar tarafından eşit şekilde katkı verilmiştir.

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

Akdoğan, Y. A., Ahi, G. O., & Yildiz, H. (2024). Computation of gravimetric geoid model using free air vertical gravity gradient anomaly in geoid-quasigeoid formula. *Journal of Applied Geophysics*, 220, 105277. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105277

Akdoğan, Y. A. (2020). *Yersel düşey gravite gradyent verilerinin bölgesel gravimetrik jeoit modellemeye katkısının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Bruce, P., Bruce, A., & Gedeck, P. (2020). *Practical statistics for data scientists: 50+ essential concepts using R and Python.* O'Reilly Media. Second Edition.2020

Csapó, G., & Völgyesi, L. (2004). New measurements for the determination of local vertical gradients. *Reports on Geodesy*, 69(2), 303-308.

Dykowski, P. (2012). Vertical gravity gradient determination for the needs of contemporary absolute gravity measurements-first results. *Reports on Geodesy*, (1/92), 23-36.

Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1967). *Physical geodesy*. *(O. Gürkan, Çeviri). Karadeniz Üniversitesi Basımevi. (1984)*

Hunt, T., Sugihara, M., Sato, T., & Takemura, T. (2002). Measurement and use of the vertical gravity gradient in correcting repeat microgravity measurements for the effects of ground subsidence in geothermal systems. *Geothermics*, 31(5), 525-543.

ICGEM (2024, Aralık 4), *Calculation of Gravity Field Functionals on User-Defined Points*. https://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints

Odalovic, O., Medved, K., & Naod, S. (2022). Modeling of vertical gravity gradient by normal gravity field and digital terrain models. *Journal of Geodesy*, 96(10), 74.

Rózsa, S., & Tóth, G. (2005). Prediction of vertical gravity gradients using gravity and elevation data. *In A Window on the Future of Geodesy*. 344-349.

Simav, M., Akpınar, İ., Akdoğan, Y. A., & Yıldız, H. (2021). Türkiye'de Güncel Yersel Gravimetri Çalışmaları. *Harita Dergisi Ankara*, 166, 10-24.

Tenzer, R., & Ellmann, A. (2009). On evaluation of the mean gravity gradient within the topography. *In Observing our Changing Earth*, 253-261

Vanicek, P., Janák, J., & Huang, J. (2002). Mean vertical gradient of gravity. *In Gravity, Geoid and Geodynamics*. 59-262.

Völgyesi, L. (2001). Local geoid determination based on gravity gradients. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 36(2), 153-162.

Zahorec, P., Vajda, P., Papčo, J., Aparicio, S. S. M., & De Pablo, J. P. (2016). Prediction of vertical gradient of gravity and its significance for volcano monitoring–Example from Teide volcano. Contributions to Geophysics and Geodesy, 46(3), 203-220.

Zahorec, P., Papčo, J., Greco, F., Vajda, P., Pašteka, R., Cantarero, M., & Carbone, D. (2024). Observation and Local Prediction of the Vertical Gravity Gradient. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 27(6), 11-16.

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 474-485 doi: 10.17714/gumusfenbil.1595279 Research Article

Investigation of protein level, amino acid profile and cytotoxic effects of plant-based proteins and meat analogues

Bitkisel-bazlı proteinler ve et analog ürünlerin protein seviyesi, amino asit profili ve sitotoksik etkilerinin incelenmesi

Yasemin YILMAZER*[1], İsmail Hakkı TEKİNER[2], Aleyna ÇAVDAR[3], Sermin DURAK[4], Rula ABDÜLHAMİTOĞLU[5]

[1]*Istanbul Sabahattin Zaim University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Molecular Biology and Genetics, 34303, Istanbul*

[2]*Independent Researcher, 34303, Istanbul*

[3]*Istanbul Gelişim University, Vocational School of Health Services, Department of Biomedical Device Technology, 34310, Istanbul*

[4]*Istanbul University Cerrahpaşa, Faculty of Medicine, Department of Medical Microbiology, 34098, Istanbul*

[5]*Istanbul Sabahattin Zaim University, Faculty of Health Sciences, Department of Nutrition and Dietetics, 34303, Istanbul*

• Received: 03.12.2024 • Accepted: 12.04.2025

Abstract

According to the Nova food classification system, plant proteins containing vegan analogues are classified into processed and ultra-processed. The recent sectoral developments highlight the importance of nutritional assessments of plant proteins and vegan analogues. This study investigated the protein level, essential (EAA)- and non-essential (non-EAA) amino acid profiles, and cytotoxic effects of plant-based proteins and meat analogues. Therefore, four meat products (burger meatball, pastırma, stuffed meatball, and sausage), soy and pea proteins, and four meat analogues were purchased from retail markets. All samples were subjected to the Kjeldahl test for protein content (%), LC-MS/MS test for EAA- and non-EAA profiles, and MTS assay for their cytotoxic effects. The results showed that the protein contents of soy protein, pea protein, meat analogues, and animal-origin meat products were determined to be 60.9%, 81.8%, 18.5 ± 9.3%, and 18.1 ± 9.7%, respectively. The EAA to non-EAA ratio in the meat analogues and meat products was 29.2/70.8 and 27.9/72.1, respectively. Besides, the MTS test indicated that the cell viability of HCT-116 cells at 24th and 48th h in the sausage analogues was significantly reduced by 59.84 ± 1.84%. In contrast, in pastırma and beef stuffed meatball analogues at 48th h, it was significantly decreased by 57.34 ± 0.52% and 62.70 ± 0.79%, respectively ($p<0.05$). Overall, we concluded that the health effects of processed and ultra-processed plant-based proteins and meat analogues on human health need further investigation through bioavailability and molecular-based techniques.

Keywords: Amino acid, Cytotoxicity, Nutrition, Plant-based Meat Analogue, Plant-based Protein, Protein

Öz

Bitkisel protein içeren vegan ürünler, Nova gıda sınıflama sistemi'nce işlenmiş ve ultra-işlenmiş sınıflarında değerlendirilmektedir. Sektörel gelişmeler, bitkisel kaynaklı vegan ürünlerin nütrisyonel değerlendirmelerini öne çıkarmaktadır. Bu çalışmada, bitkisel bazlı proteinler ve et analogların, protein, esansiyel (EAA)- ve non-esansiyel (non-EAA) amino asit kompozisyonları ve ürünlerin sitotoksik etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, zincir marketlerden dört adet hayvansal et ürünü (burger köftesi, pastırma, içli köfte ve sucuk), soya ve bezelye proteinleri ve dört adet bitkisel bazlı et analog ürünleri alınmıştır. Örneklerin protein içeriği Kjeldahl, amino asit profili LC-MS/MS ve sitotoksik etkileri MTS yöntemleri ile analiz edilmiştir. Bulgulara göre, protein içerikleri sırasıyla, soya proteini tozu %60,9, bezelye proteini tozu %81,8, et analog ürünleri %18,5 ± 9,3 ve hayvansal et ürünleri ise %18,1 ± 9,7 olarak bulunmuştur. EAA/non-EAA oranı et analog ürünlerinde 29,2/70,8 ve hayvansal et ürünlerinde 27,9/72,1 olarak tespit edilmiştir. MTS testi, HCT-116 hücre canlılığında, sucuk analog ürünü için 24. saatte %59,84 ± 1,84; pastırma ve dana içli köfte analog ürünleri içinse 48. saatte %57,34 ± 0,52 ve %62,70 ± 0,79 oranlarında anlamlı azaldığını göstermiştir ($p<0.05$). Özetle, işlenmiş ve ultra işlenmiş bitkisel proteinler ve et analog ürünlerinin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin biyoyararlanım ve moleküler tabanlı yöntemler ile de araştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: *Amino asit, Sitotoksisite, Nütrisyon, Bitkisel-bazlı Et Analog, Bitkisel-bazlı Protein, Protein*

*Yasemin YILMAZER; yasemin.yilmazer@izu.edu.tr

1. Introduction

The protein demand for 7.5 billion people worldwide is more than 200 million tonnes annually. However, a surplus of 2.3 billion more people by 2050 will seriously affect the demand for protein. Almost 60% of the protein supplied globally is met by plant sources, with animal products making up 40% (Wu et al., 2014; Toujgani et al., 2023). Globally, the livestock sector responsible for human nutrition contributes 15% of greenhouse gas emissions and about 30% of biodiversity loss. Therefore, the livestock sector is becoming increasingly critical to finding modern dietary needs with sustainable protein sources (Cheng et al., 2022; GWR, 2023).

Recently, plant-based vegan products as alternatives to meat and dairy were valued at about $5 billion, with projections indicating an increase to 85 billion dollars by 2030, representing 6% of global traditional meat production (25 billion tons/year) (Siegrist & Hartmann, 2023). Pea and soy are the most widely preferred sources of plant-based proteins, which are not only utilized in meat and dairy analogues but also in beverages, protein and vitamin supplements, and snacks (Munialo & Vriesekoop, 2023). Vegan products, increasingly like animal-based counterparts in sensory attributes (taste and texture), have launched over 4400 new products since 2015 (Curtain & Grafenauer, 2019; Andreani et al., 2023).

The food industry is transforming as consumer demand grows for ethical, nutritionally, and sustainable balanced vegan products. The focus is shifting toward plant-based proteins that replicate the texture and composition of animal-derived meat and dairy (McClements & Grossmann, 2021a). Textured plant-based proteins, which are processed to achieve a fibrous texture like meat, are predominantly produced using extrusion technology, a high-temperature (150-170 °C) and high-pressure (7.5-10 MPa) method (Boukid, 2021; Kazir & Livney, 2021). The process induces physicochemical changes in the ingredients (Zhang et al., 2019; Pismag et al., 2024).

Plant-based meat analogues, first developed in the 1960s, usually contain water (50-80%), textured plant-based protein (15-20%), non-textured plant protein (10-25%), flavor enhancers (3-10%), fat (0-15%), binders (1-5%), colorants (0-0.5%), and other specific ingredients to enhance texture (Gómez-Luciano et al., 2019; Lima et al., 2022). Compared to animal-based meats, plant-based meat analogues usually have higher carbohydrate content, lower fat (i.e., saturated fat), and similar protein levels. Moreover, these products are rich in dietary fibre and can provide essential vitamins and minerals (Romão et al., 2022).

While research on alternative proteins and plant-based meat analogues has mainly focused on production and functionality methods, studies on their nutritional properties and health effects are still very early. Given the growing market share and increasing consumer requests, further research in these areas is crucial (Banach et al., 2022; Lin et al., 2023; Flint et al., 2023).

Specifically, the primary objectives of this study are to (1) highlight the nutritional aspects (i.e. protein and amino acids' profile) associated with plant-based proteins (soy and pea) and meat analogues (kibbeh, sausage, pastırma, and burger of beef meat) compared to those of animal origin; (2) investigate their cytotoxic effects compared to their identicals of animal origin, and (3) provide pre-clinical data for further research. By addressing these objectives, this study aims to contribute to the nutritional and cytotoxic gaps of some sustainable plant-based protein sources and meat analogues for the future needs of a growing population. This work, therefore, contributes to further insight into alternative proteins' nutritional benefits and health impacts, which are increasingly gaining importance in sustainable food sources.

2. Material and methods

2.1. Material

The soy and pea proteins, animal-based meat products (kibbeh, sausage, pastırma, and burger of beef meat) and meat analogues (kibbeh, sausage, pastırma, and burger), a total number of 10 samples, were collected from chain supermarket outlets in Istanbul, Türkiye, and were stored at +4 °C in the laboratory for further analyses (Table 1).

Table 1. Nutritional contents of plant-based proteins, animal-based products and meat analogues (per 100 g serving)

Material/value		Energy (Kcal)	Fat (g)	Saturated fat (g)	Carbohydrate (g)	Glucose (g)	Protein (g)	Salt (g)	Fibre (g)
Plant-based protein	Soy	331	1.2	0.3	30.9	0.5	70	-	23.6
	Pea	435	8.5	2	4.5	1.2	85	-	4
Meat analogue	Kibbeh	296	17	8	30	6	8.5	1.1	-
	Sausage	400	35	20	4	-	14	1.7	-
	Pastırma	270	16	3.9	0.5	-	31	4.5	-
	Burger	270	22	13	4	-	14	1.3	-
Animal-based meat products (beef)	Kibbeh	302	16	2.4	29	6.4	6.9	4.8	-
	Sausage	196	6	-	7	-	27	-	-
	Pastırma	227	10	-	5	-	27	-	-
	Burger	185	8	3	6	0.5	18	1.2	-

**All nutritional values are based on the information provided on the packaging of the products and are standardized per 100 g serving. Energy values are expressed in kilocalories (Kcal), and macronutrients are given in grams (g).*

2.2. Method(s)

2.2.1. Total protein analysis

Protein analysis followed TS 1620 and AOAC 981.10 protocols (Tabak et al., 2021). Approximately 1-2 g of the sample was weighed on nitrogen-free filter paper and transferred to a Kjeldahl flask. A Kjeldahl catalyst tablet (Merck 1.15348, Germany) and 25 mL concentrated sulfuric acid (H_2SO_4) (Merck 112080) were added. The flask was placed in a digestion apparatus (InKJel M, Germany) and heated until the mixture turned green. After cooling, the flask was transferred to a Kjeldahl distillation unit (Velp Scientifica UDK139, Italy). During the distillation process, 3-4 drops of indicator and 100 mL of 3.5% boric acid solution (H_3BO_3) (Tekkim TK 40000073, Türkiye) were added to the receiving Erlenmeyer flask. After distillation, the collected solution was titrated with 0.1 N hydrochloric acid (HCl) (Sigma Aldrich 07102, Germany) until it turned pink. The protein content (%) was calculated using the equations 1 & 2:

$$\text{Azot (N) (\%)} = V_{asit} \times N_{asit} \times 1.4 / M \quad (1)$$

$$\text{Protein (\%)} = \text{N (\%)} \times 6.25 \quad (2)$$

2.2.2. Determination of amino acid profile

The samples (0.5 g) were placed into a screw-capped glass tube, followed by the addition of 4 mL hydrolysis reagent (JASEM JSM-CL-508, Türkiye). The sample was hydrolyzed at 110 °C for 24 h. After hydrolysis, the hydrolysate was allowed to cool to room temperature and centrifuged at 4000 rpm for 5 min. A 40 µL aliquot of the supernatant was pipetted and diluted to 1 mL with distilled water. From the diluted solution, 50 µL was transferred into a vial, mixed with 50 µL of an internal standard solution, and vortexed for 5 s. Subsequently, 700 µL of additional reagent was added, and the mixture was vortexed for another 5 s. Finally, the supernatant was transferred to an HPLC vial, and 3 µL was injected into a Jasem amino acid column (JASEM JSM-CL-575). The amino acid profile of the sample was analyzed using an Agilent 1290 Infinity coupled with an Agilent 6470 Triple Quadrupole System. Amino acid concentrations were quantified with a limit of detection (LOD) of 0.001 mg/100 g and a limit of quantification (LOQ) ranging from 0.007 to 0.161 mg/100 g (Tabak et al., 2021). The statistical analysis results are shown in tables as mean values and standard deviations.

2.2.3. *In-vitro* cytotoxicity (MTS) assay

The samples were prepared according to ISO 10993-12 Sample Preparation and Reference Materials standard (AOAC International., 1990). According to the table of standard surface areas and extract liquid volumes, the

sample was prepared by incubating it in Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM1x) (Gibco ™ 11965092, USA) without serum and antibiotics at 37 °C for 24 h. ISO 10993-5 standards performed MTS test. The medium was removed from the cultured cells (HCT-116), and the flask was washed with 1 mL phosphate buffer saline (PBS) (HyClone, USA). Then, 1 mL of Trypsin-EDTA (Multicell 325-043-EL, Canada) was added to the flask and incubated for 3-4 min (Nüve EC160, Türkiye). Following incubation, the detachment of cells from the surface was observed under a microscope. The tubes were centrifuged at 2000 rpm for 2 min (Nüve NF 800, Türkiye). The supernatant was discarded, and the cell pellet was resuspended in 1 mL of fresh growth medium. The plates were incubated at 37 °C with 5% CO_2 for 24 h (Nüve EC160). After incubation, extracts were applied to the cells for 24 h. At the end of the treatment, the medium in the wells was removed, and MTS solution was added to each well. The plates were incubated for 2 h, and absorbance was measured at 570 nm using a BioTek 800 TS ELISA microplate reader (Agilent, USA) (Abdik, 2022).

2.2.4. Statistical evaluation

The mean and standard deviation (±) values of EAA and non-EAA levels for different sample groups (animal-origin meat products and plant-based meat analogues) were calculated using Microsoft Excel. The differences in EAA and non-EAA levels between sample groups were analyzed with a t-test method using the SPSS 20 software package (IBM Corporation, NY, USA). $p<0.05$ was accepted as statistically significant.

3. Results

This study investigated protein levels, EAA and non-EAA profiles and cytotoxic effects of some plant-based proteins (i.e., soy and pea) and meat analogues. To do this, four meat products of animal origin (burger meatball, pastırma, stuffed meatball, and sausage), soy and pea proteins, and four meat analogues were purchased from the retail markets. The results showed that the effects of processed and ultra-processed plant-based proteins and meat analogues on human health need further investigation through bioavailability and molecular-based techniques.

3.1. Total protein contents

The samples' protein contents (%) were determined using the Kjeldahl method. The protein contents of soy and pea proteins were 60.9% and 81.8%, respectively. Among the meat analogues, the highest protein content was measured in sausage with 25.9%, followed by pastırma (25.5%), burger (16.5%), and stuffed kibbeh (6.3%). The average protein content of the meat analogues was 18.5 ± 9.3%. The protein content of animal meat products was determined to be close to those of meat analogues. Specifically, beef pastırma contained 30.9%, beef sausage 18.0%, beef burger 16.3%, and beef stuffed kibbeh 7.3% protein. The average protein content of animal-based meat products was calculated to be 18.1 ± 9.7%. These results showed that the average protein content of meat analogues was 2.2% higher than that of animal-origin meat products (Table 2).

Table 2. The protein contents of the samples analyzed (per 100 g serving)

Plant proteins and meat analogue	Protein content (%)	Protein content (%)	Animal-origin meat product
Soy Protein	60.9	-	n/a
Pea Protein	81.8	-	n/a
Burger analogue	16.5	16.3	Beef Burger
Pastırma analogue	25.5	30.9	Beef Pastırma
Stuffed analogue	6.3	7.3	Beef Stuffed
Sausage analogue	25.9	18.0	Beef Sausage
Mean ± Ss.	**18.5 ± 9.3**	**18.1 ± 9.7**	**Mean ± Ss.**

Mean ± Ss (±) values represent the average protein content in the samples.

3.2. Amino acid profiles

The levels of EAA and non-EAA in soy and pea proteins were measured using the LC-MS/MS method, with a limit of detection (LOD) of 0.001 mg/100 g and a limit of quantification (LOQ) range between 0.007 and

0.161 mg/100 g. The amino acid content of regular beef was retrieved from https://fitaudit.com/food/137541/amino (FitAudit, 2025). According to the results, the EAA content in soy protein was measured at 17640 ± 1179 mg/100 g, while pea protein contained 26780 ± 1622 mg/100 g, while the EAA content of the regular beef was declared as 13104 ± 826 mg/100 g. The data revealed that the total EAA levels in plant-based protein sources were 34.2% in soy and 104.3% in pea, which were higher than the EAA content in animal-based beef. On the other hand, regular beef was found to contain higher levels of methionine (857 mg/100 g) and tryptophan (325 mg/100 g) compared to the plant-based meat analogues (Table 3).

Table 3. EAA contents in plant-based proteins (soy & pea) and animal-origin regular beef (mg/100 g) (per 100 g serving)

EAA (mg/100 g)	Plant-based protein				Animal-origin regular beef	
	Soy	%	Pea	%	Beef	%
Histidine	1740	9.9	3580	13.4	1105	8.4
Isoleucine	2750	15.6	4750	17.7	1448	11.1
Leucine	3460	19.6	4980	18.6	2652	20.2
Lysine	3080	17.5	3030	11.3	2911	22.2
Methionine	510	2.9	580	2.2	857	6.5
Phenylalanine	1140	6.5	3750	14.0	1253	9.6
Threonine	1670	9.5	2800	10.5	1425	10.9
Tryptophan	250	1.4	300	1.1	325	2.5
Valine	3040	17.2	3010	11.2	1128	8.6
Total	**17640 ± 1179**	**100.0**	**26780 ± 1622**	**100.0**	**13104 ± 826**	**100.0**

The table shows EAA content (mg/100g) and their relative percentages (%) for plant-based proteins (soy & pea) and animal products.

The non-EAA content in soy protein was 28980 ± 1857 mg/100 g, while it was 39300 ± 2047 mg/100 g in pea protein. In raw beef, the non-EAA content was reported as 17630 ± 1468 mg/100 g. These values show that the non-EAA levels in plant-based protein sources are 134.6% in soy and 204.4% in pea, higher than in animal-origin beef. On the other hand, regular beef contained higher cystine (342 mg/100 g), while cysteine, hydroxyproline, and taurine could not be detected (Table 4).

Table 4. Non-EAA contents in plant-based proteins (soy and pea) and animal-origin regular beef (mg/100 g) (per 100 g serving)

Non-EAA (mg/100 g)	Plant-based protein				Animal-origin regular beef	
	Soy	%	Pea	%	Beef	%
Alanine	2880	9.9	3750	9.5	1882	10.7
Arginine	3050	10.5	4540	11.6	2105	11.9
Aspartic Acid	4540	15.7	5070	12.9	2984	16.9
Cystine	250	0.9	300	0.8	342	1.9
Cysteine	250	0.9	300	0.8	n.a.	0.0
Glutamic Acid	5870	20.3	6550	16.7	5063	28.7
Glycine	1220	4.2	3740	9.5	1500	8.5
Hydroxyproline	3950	13.6	4200	10.7	n.a.	0.0
Proline	3080	10.6	4030	10.3	1361	7.7
Serine	1240	4.3	3750	9.5	1265	7.2
Taurine	n.d.	0.0	n.d.	0.0	n.a.	0.0
Tyrosine	2650	9.1	3070	7.8	1128	6.4
Toplam	**28980 ± 1857**	**100.0**	**39300 ± 2047**	**100.0**	**17630 ± 1468**	**100.0**

The table shows non-EAA content (mg/100g) and their relative percentages (%) for plant-based proteins (soy & pea) and animal products.

The EAA level in the burger analogue was 4650 ± 224 mg/100 g, while in the beef burger, it was 4140 ± 196 mg/100 g, indicating that the vegan burger contains 12.3% more EAA. Conversely, the non-EAA level in the burger analogue was 11050 ± 616 mg/100 g, which is 16.5% lower than the 9480 ± 458 mg/100 g found in the beef burger. The EAA level in pastırma analogue was 6130 ± 278 mg/100 g, while beef pastırma was 9540 ± 381 mg/100 g, which is 55.6% higher. On the other hand, the non-EAA level in the pastırma analogue was 13960 ± 1235 mg/100 g, while in the beef pastırma, it was 16970 ± 807 mg/100 g, a 21.5% increase. The EAA level in the stuffed meatball analogue was 2310 ± 153 mg/100 g, while the beef stuffed meatball was 2750 ± 196 mg/100 g, 19% higher. In contrast, the non-EAA level in the stuffed meatball analogue was 3720 ± 137 mg/100 g, 16% lower than the 4340 ± 194 mg/100 g found in the beef stuffed meatballs. The EAA level in the sausage analogue was 7930 ± 645 mg/100 g, 62.1% higher than the 4890 ± 209 mg/100 g in the beef sausage. Conversely, the non-EAA level in the sausage analogue was 15090 ± 905 mg/100 g, 19.6% lower than the 12610 ± 803 mg/100 g found in the beef sausage (Table 5).

Table 5. Comparison of EAA and non-EAA in meat analogues and animal-origin meat products

EAA	**Meat analogue (mg/100 g)**				**Animal-origin meat product (mg/100 g)**			
	Pastırma	**Stuffed Meatballs**	**Burger**	**Sausage**	**Pastırma**	**Stuffed Meatballs**	**Burger**	**Sausage**
Histidine	840	200	450	590	1280	350	420	500
Isoleucine	930	600	540	1730	1260	770	500	590
Leucine	980	340	860	1940	1500	320	770	780
Lysine	940	330	810	510	1330	240	710	860
Methionine	450	110	380	220	690	110	330	440
Phenylalanine	350	140	350	500	1230	310	300	440
Threonine	610	270	430	700	750	330	400	400
Tryptophan	240	140	150	300	330	120	160	190
Valine	790	180	590	1440	1170	200	550	690
Total EAA	**6130 ± 278**	**2310 ± 153**	**4560 ± 224**	**7930 ± 645**	**9540 ± 381**	**2750 ± 196**	**4140 ± 196**	**4890 ± 209**
non-EAA	**Meat analogue (mg/100 g)**				**Animal origin meat product (mg/100 g)**			
	Pastırma	**Stuffed Meatballs**	**Burger**	**Sausage**	**Pastırma**	**Stuffed Meatballs**	**Burger**	**Sausage**
Alanine	890	300	780	870	1750	500	710	820
Arginine	980	230	640	910	1500	170	680	660
Aspartic Acid	950	310	1350	1100	1920	320	1290	1550
Asparagine	950	310	1350	1100	1920	320	1290	1550
Cystine	220	140	220	220	250	220	220	230
Cysteine	220	140	220	220	250	220	220	230
Glutamic Acid	5000	480	1990	3190	2960	500	1400	2100
Glycine	800	270	650	1060	1170	410	560	640
Hydroxyproline	1240	500	1840	800	1500	770	1220	2760
Proline	940	350	510	1200	1020	240	450	550
Serine	850	330	890	1990	1350	450	860	920
Taurine	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Tyrosine	920	360	610	2430	1380	220	580	600
Total non-EAA	**13960 ± 1235**	**3720 ± 137**	**11050 ± 616**	**15090 ± 905**	**16970 ± 807**	**4340 ± 194**	**9480 ± 458**	**12610 ± 803**
Total amino acid content	**20090 ± 5537**	**6030 ± 997**	**15610 ± 4589**	**23020 ± 5063**	**26510 ± 5254**	**7090 ± 1124**	**13620 ± 3776**	**17500 ± 5459**

EAA are those that the body cannot synthesize and must be obtained through the diet, while the body can produce non-essential amino acids (non-EAAs). The values represent the content of each amino acid in milligrams per 100 grams of the respective meat product. Percentages indicate the relative proportion of each amino acid to the total amino acid content in the product.

3.3. *In-vitro* cytotoxicity (MTS) results

The time-dependent cytotoxic effects of soy and pea proteins, meat analogues, and animal-origin meat products on HCT-116 colorectal cancer cells were assessed using MTS assay. As described in the Methods section, cells were seeded into 96-well plates and treated with media containing the respective products at specific concentrations. After 24 and 48 h incubations, the effects on cell viability (%) were evaluated using MTS assay. A significant decrease in cell viability was observed in the sausage analogues, with a value of 59.84 ± 1.84%, after 24 h of incubation with HCT-116 cells. No significant difference was found between the other groups. After 48 h of incubation, cell viability significantly decreased in the pastırma analogue, beef and analogue stuffed meatballs, and sausage analogues, with values of 57.34 ± 0.52%, 54.95 ± 2.20%, 63.03 ± 1.16%, and 62.70 ± 0.79%, respectively. Cell viability decreases were also observed in the other groups (Table 6).

Table 6. Effects of soy and pea proteins, meat analogues and animal origin meat products on the cell viability of HCT-116 cell line after 24 h and 48 h of incubation.

24 h	Control		Sample		48 h	Control		Sample	
	HCT-116 (%)	Ss. (±)	HCT-116 (%)	Ss. (±)		HCT-116 (%)	Ss. (±)	HCT-116 (%)	Ss. (±)
Soy Protein	100	-	70.01	0.87	Soy Protein	100	-	74.34	0.99
Pea Protein	100	-	77.45	0.59	Pea Protein	100	-	73.95	0.75
Vegan Burger	100	-	74.55	1.17	Vegan Burger	100	-	72.11	0.37
Beef Burger	100	-	88.88	5.64	Beef Burger	100	-	66.83	0.49
Pastırma analogue	100	-	80.68	1.6	Pastırma analogue	100	-	57.34	0.52
Beef Pastırma	100	-	72.33	0.57	Beef Pastırma	100	-	75.74	1.13
Meatballs analogue	100	-	73.56	0.68	Meatballs analogue	100	-	63.03	1.16
Beef Meatballs	100	-	74.09	0.57	Vegan Meatballs	100	-	54.95	2.20
Sausage analogue	100	-	59.84	1.84	Sausage analogue	100	-	62.70	0.79
Beef Sausage	100	-	81.99	0.80	Beef Sausage	100	-	68.06	1.96

The values are presented as %, with Ss. (±) for each sample.

3.4. Statistical results

The differences in EAA and non-EAA profiles between soy and pea proteins, meat analogues and animal-origin meat products were analyzed using a t-test ($p<0.05$). The statistical results indicated no significant differences between EAA and non-EAA levels of meat analogues and animal-origin meat products, suggesting they possess analogous amino acid levels and characteristics ($p=0.81> 0.05$).

4. Discussion and conclusions

The protein demanded by the 7.3 billion people in the world is currently met by plant sources (57%) and animal sources (43%). The increasing demand for protein has gained significant interest from researchers because of the growing global population, climate and environmental changes, policies aimed at reducing the demand for animal-based protein products, healthy eating trends, and modern dietary preferences (Toujgani et al., 2023; Monica et al., 2025). Additionally, the livestock sector serves meat production purposes and is responsible for 18% of anthropogenic greenhouse gas emissions. In other words, 100 g of animal-based protein produces 50 kg of greenhouse gas emissions (Hertzler et al., 2020; Munialo & Vriesekoop, 2023). Consequently, the current study has focused on a pressing issue by examining plant-based proteins and meat analogues regarding their nutritional content and cytotoxic effects on human colon health.

Plant species are limited in the global food system for humans (Knez et al., 2023). Plant-based proteins are rich sources of amino acids, and mainly depend on soy, pea, wheat, oats, chickpeas, almonds, hazelnuts, and seeds (Lin et al., 2023). Therefore, exploiting a broad range of plant protein sources is paramount to integrating food safety and sustainability, in line with the United Nations (UN) Decade of Action framework and the Second International Conference on Nutrition in 2014 (FAO, 2024; IPSUS, 2025). Soy and pea proteins are particularly famous for their availability, superior emulsification activity, and stability compared to other plant-based protein sources. These features justify the use of soy and pea proteins in meat analogues. Our study determined the total protein contents as 60.9% for soy protein powder and 81.8% for pea protein powder. Soy protein isolate contains 90%, soy protein concentrate contains 65–90%, and soy flour contains 50–65% of total protein (Messina et al., 2022). Similarly, the protein content of pea protein isolate is reported as 80% (Trindade et al., 2023). In the current work, the total protein results obtained for soy and pea protein powders collected in Istanbul align with the findings of the international literature.

This current study indicates that meat analogues' average total protein content is comparable to that of animal-based meat products. In the literature, the protein content of burger analogues is reported to range from 15.4–17.3% (Bakhsh et al., 2021), while sausage analogues range from 2.33–8.79% (Corrêa et al., 2023). For their animal-based counterparts, a study conducted in Australia found the protein content of beef sausages to range between 13.8–15.1% (Cunningham et al., 2015). Thus, this study has revealed that the protein contents of meat analogues are consistent with those previously reported in the literature. The differences in protein content between meat analogues and animal-origin meat products were analyzed using a t-test ($p<0.05$). Statistical results showed no significant differences between the two groups ($p=0.81>0.05$). However, the statistical findings suggest that plant-based meat analogues are analogues at the protein level to animal-origin meat products.

Nutritionally, meat-eaters are reported to consume 47.1 g of meat and 11.5 g of plant-based food daily, whereas vegans consume 73 g of plant-based food and 63 g of soy protein (Mariotti & Gardner, 2019). Though an analogue product, meat replacements are expected to recreate processed meat's visual aspect and mouthfeel. Besides, they face the complex task of reproducing the nutritional profile (amino acids). Additionally, various meat analogues require different plant-based components. Since processed meat production has not been optimized for plant-based ingredients, the current solution is the mixture of two or more plant-based protein sources (Da Silva et al., 2024). Because plant-based proteins determine meat analogues' nutritional and structural characteristics (Ishaq et al., 2022). In this study, the ratio of EAA to non-EAA for soy and pea proteins, which are primary ingredients in meat analogues, was found to be 37.8/62.2 and 40.5/59.5, respectively. These ratios indicate a higher proportion of non-EAA than that of beef, which has a ratio of 42.6/57.4 (Fit Audit, 2025). Beef presents a more balanced EAA/non-EAA ratio than the plant-based protein powders and products analyzed. Rizzolo-Brime et al. (2023) demonstrated that the total EAA content and lysine amino acid in plant-based meat analogues are higher than in their animal counterparts. Amongst the non-EAA in the regular beef, the level of alanine was reported as 1882 mg/100 g in the literature, as presented in Table 4. The current work detected it as 890 mg/100 g in the vegan pastırma sample and 1750 mg/100 g in the regular pastırma sample. On the other hand, Erdemir and Aksu (2017) reported that the level of alanine was determined as 866.6 ± 264.4 mg/100 in raw beef meat and 42.3 ± 73.7 mg/100 g in pastırma. Similarly, Deniz et al. (2016) reported that the level of alanine in pastırma on the 21st day was 133.1 ± 18.9 mg/100 g. Interestingly, this study detected alanine in soy (2880 mg/100 g) and pea (3750 mg/100 g) protein samples, respectively. Alanine was also found in plant-based meat analogues (300 to 890 mg/100 g), which are lower than soy and pea proteins. Interestingly, our results also revealed that cystine and cysteine levels of the plant-based meat analogues were similar to each other (140 to 220 mg/100 g), and in animal-origin meat products (220 to 250 mg/100 g). Some studies demonstrate that meat analogues can have relatively better nutritional composition, but there is insufficient proof to consider them healthier than their meat counterparts (Rizzolo-Brime et al., 2023). However, in this current study, the EAA level was lower than the non-EAA content. Lysine was identified as the highest among the amino acids, consistent with Rizzolo-Brime's (2023) findings. Aaslyng et al. (2023) reported that meat analogues meet only 50% of the recommended daily lysine intake, while leucine and valine meet 70%. Another study by Van Vliet et al. (2020) identified the highest methionine levels in beef, followed by pea and soy proteins, which align with our results. Therefore, fortification of protein could be an option to mimic the amino acid profile of the meat alternatives.

Research on the cytotoxic effects of meat analogues is still in its early stages (Crimarco et al., 2022). There are many unknown variables and open questions regarding potential risks possibly present in meat analogues,

including processing-related compounds such as n-nitrosamines, acrylamide, and heterocyclic aromatic amino acids (Gräfenhahn & Beyrer, 2024). Many plant-based alternatives are considered ultra-processed food, and a study by the World Cancer Research Fund showed that people who consumed more ultra-processed food had an increased risk of developing and dying from cancer (World Cancer Research Fund, 2023). In this work, an MTS assay was conducted to evaluate the cell viability of animal-based meat analogues. Overall, meat analogues significantly reduced the viability of HCT-116 colorectal cancer cells at 48 h ($p<0.05$). This finding suggests that meat analogues may reduce cell viability due to senescence-related cell proliferation or the cytotoxic effects of their metabolites. Previous studies on meat analogues and their health effects report no significant differences in some inflammatory markers (interleukin-12, interleukin-12B, interleukin-10, and transforming growth factor-beta) between vegan and animal-product consumers.

This recent research identified the nutritional (protein, amino acid) and cytotoxic knowledge gaps associated with plant-based proteins (soy, pea) and meat analogues compared to animal-origin meat products to guide future research directions. The primary outcome, exhibiting the novelty of the research, is to offer a new experimental data-based perspective on the protein content and cytotoxic effects of plant-based proteins and their meat analogues. The key findings in this recent study highlight that (1) there is a need for regulatory oversight, improved nutritional and cytotoxic monitoring, and further research on plant-based proteins and meat replacements, (2) ensuring the nutritional and health aspects of plant-based proteins and meat analogues need collaboration and cooperation among food scientists, industry leaders, and policymakers, and (3) research on plant-based proteins and meat analogues should focus on nutritional and health aspects because health is a non-negotiable requirement. Overall, we concluded that the health effects of processed and ultra-processed plant-based proteins and meat analogues on human health need further investigation through bioavailability and molecular-based techniques.

Acknowledgement

This work is supported by TÜBİTAK 1071-Support Programme for Increasıng Capacity to Benefit from International Research Funds and Participation in International R&D Cooperation [Grant number: 122N018].

Author contribution

Yasemin Yılmazer: Method, Writing- First draft and Editing, and Visualization. İsmail Hakkı Tekiner: Method, Supervision, Writing - Reviewing and Editing. Aleyna Çavdar: Investigation and Writing – First draft. Sermin Durak: Writing – Reviewing and Editing. Rula Abdülhamitoğlu: Investigation.

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 special legal permission.

Conflicts of interest

There is nothing to declare.

References

Aaslyng, M. D., Dám, A., Petersen, I. L., & Christoffersen, T. (2023). Protein content and amino acid composition in the diet of Danish vegans: a cross-sectional study. *BMC Nutrition*, *9*(1), 131.https://doi.org/10.1186/s40795-023-00793-y

Abdik, H. (2022). Antineoplastic effects of erufosine on small cell and non-small cell lung cancer cells through induction of apoptosis and cell cycle arrest. *Molecular Biology Reports,49*(4), 2963-2971. https://doi.org/10.1007/s11033-022-07117-6

Andreani, F., Lin, Z., & Haider, A. (2023). The plant-based food market: Recent innovations and consumer trends. *Food Business Review*, *28*(1), 37-50.https://doi.org/10.3390/nu15020452

Helrich, K. (1990). *Official methods of analysis of AOAC* (15th Ed.). Association of Official Analytical Chemists. Rockville, USA.

Bakhsh, A., Lee, S. J., Lee, E. Y., Sabikun, N., Hwang, Y. H., & Joo, S. T. (2021). A novel approach for tuning the physicochemical, textural, and sensory characteristics of plant-based meat analogs with different levels of methylcellulose concentration. *Foods*, *10*(3), 560.https://doi.org/10.3390/foods10030560

Banach, M., Witkowska, N., & Nowak, M. (2022). Alternative proteins and their impact on human health and sustainability. *Journal of Clinical Medicine*, *11*(4), 872-889.https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2089625

Boukid, F. (2021). Plant-based meat analogues: From niche to mainstream. *European food research and technology*, *247*(2), 297-308.https://doi.org/10.1007/s00217-020-03630-9

Cheng, M. vd. (2022). Climate change and livestock production: A literature review. *Atmosphere13*(1), 140. https://doi.org/10.3390/atmos13010140

Corrêa, P. F., Da Silva, C. F., Ferreira, J. P., & Guerra, J. M. C. (2023). Vegetable-based frankfurter sausage production by different emulsion gels and assessment of physical-chemical, microbiological and nutritional properties. *Food Chemistry Advances*, *3*, 100354. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100354

Crimarco, A., Landry, M. J., Carter, M. M., & Gardner, C. D. (2022). Assessing the effects of alternative plant-based meats v. animal meats on biomarkers of inflammation: a secondary analysis of the SWAP-MEAT randomized crossover trial. *Journal of nutritional science, 11*, e82. https://doi.org/10.1017/jns.2022.84

Cunningham, J., Nguyễn, V. M., Adorno, P., &Droulez, V. (2015). Nutrient composition of retail samples of Australian beef sausages. *Nutrients*, *7*(11)*,* 9602–9617. https://doi.org/10.3390/nu7115491

Curtain, F., & Grafenauer, S. (2019). Plant-based meat substitutes in the flexitarian age: an audit of products on supermarket shelves. *Nutrients*, *11*(11), 2603.https://doi.org/10.3390/nu11112603

Da Silva, V. T., Mateus, N., De Freitas, V., & Fernandes, A. (2024). Plant-Based Meat Analogues: exploring proteins, fibers and polyphenolic compounds as functional ingredients for future food solutions. *Foods, 13*(14), 2303. https://doi.org/10.3390/foods13142303

Deniz, E., Mora, L., Aristoy, M. C., Candogan, K., & Toldra, F. (2016). Free amino acids and bioactive peptides profile of Pastirma during its processing. *Food Research International, 89*, 194-201. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.07.025

Erdemir, E., & Aksu, M. I. (2017). Changes in the Composition of Free Amino Acid during Production of Pastirma Cured with Different Levels of Sodium Nitrite. *Journal of Food Processing and Preservation, 41*(2), e12801. https://doi.org/ARTN e12801 10.1111/jfpp.12801

Food and Agriculture Organization (FAO). (2024). *Second International Conference on Nutrition (ICN2)*. Rome. https://www.who.int/news-room/events/detail/2014/11/19/default-calendar/fao-who-second-international-conference-on-nutrition-(icn2)

FitAudit. (2025, March 18). *Amino Acids in Beef*. https://fitaudit.com/food/137541/amino

Flint, M., Bowles, S., Lynn, A., & Paxman, J. (2023). Novel plant-based meat alternatives: future opportunities and health considerations. *Proceedings of the Nutrition Society*, *82*(3), 370–385. https://doi.org/10.1017/s0029665123000034

Global Wellness Report (GWR). (2023). *Trends in plant-based foods and sustainability: A comprehensive analysis*. https://globalwellnessinstitute.org/wp-content/uploads/2023/11/GWI-WE-Monitor-2023_FINAL.pdf

Gómez-Luciano, C. A., de Aguiar, L. K., Vriesekoop, F., ve Urbano, B. (2019). Consumers' willingness to purchase three alternatives to meat proteins in the United Kingdom, Spain, Brazil and the Dominican Republic. *Food quality and preference*, *78*, 103732. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2019.103732

Hertzler, S. R., Lieblein-Boff, J. C., Weiler, M., & Allgeier, C. (2020). Plant proteins: Assessing their nutritional quality and effects on health and physical function. *Nutrients*, *12*(12), 3704. https://doi.org/10.3390/nu12123704

International Organization for Standardization. (1979). *Meat and meat products – Determination of nitrogen content* (ISO 937:1978). Geneva. Standards ISO.

IPSUS. (2025, March 18). *Climate-smart food innovation using plant and seaweed proteins from upcycled sources.* https://ipsus.org/en/

Ishaq, A., Irfan, S., Sameen, A., & Khalid, N. (2022). Plant-based meat analogs: A review with reference to formulation and gastrointestinal fate. *Current Research in Food Science, 5*, 973–983. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.06.001

Knez, M., Ranić, M., & Gurinović, M. (2023). Underutilized plants increase biodiversity, improve food and nutrition security, reduce malnutrition, and enhance human health and well-being. Let's put them back on the plate! *Nutrition Reviews*, *82*(8), 1111–1124. https://doi.org/10.1093/nutrit/nuad103

Kazir, M.ve Livney, Y. D. (2021). Plant-based seafood analogs. *Molecules*, *26*(6), 1559. https://doi.org/10.3390/molecules26061559

Lima, M., Costa, R., Rodrigues, I., Lameiras, J., & Botelho, G. (2022). A narrative review of alternative protein sources: highlights on meat, fish, egg and dairy analogues. *Foods, 11*(14), 2053. https://doi.org/10.3390/foods11142053

Lin, X., Duan, N., Wu, J., Lv, Z., Wang, Z., & Wu, S. (2023). Potential food safety risk factors in plant-based foods: Source, occurrence, and detection methods. *Trends in Food Science and Technology, 138*, 511–522. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.06.032

Mariotti, F., & Gardner, C. D. (2019). Dietary protein and amino acids in vegetarian diets—A Review. *Nutrients*, *11*(11), 2661. https://doi.org/10.3390/nu11112661

McClements, D. J., & Großmann, L. (2021). A brief review of the science behind the design of healthy and sustainable plant-based foods. *Npj Science of Food, 5*, 17. https://doi.org/10.1038/s41538-021-00099-y

Messina, M., Sievenpiper, J. L., Williamson, P., Kiel, J., & Erdman, J. W. (2022). Perspective: Soy-based meat and dairy alternatives, despite classification as ultra-processed foods, deliver high-quality nutrition on par with unprocessed or minimally processed animal-based counterparts. *Advances in Nutrition*, *13*(3), 726–738. https://doi.org/10.1093/advances/nmac026

Monica, S., Bancalari, E., Siroli, L., Tekiner, I. H., Tainsa, M., Ennahli, S., Bertani, G., & Gatti, M. (2025). Lactic acid fermentation of non-conventional plant-based protein extract. *Food Research International*, *208*, 116174. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116174

Munialo, C. D., ve Vriesekoop, F. (2023). Plant-based foods as meat and fat substitutes. *Food Science & Nutrition*, *11*(9), 4898-4911. https://doi.org/10.1002/fsn3.3421

Pismag, R. Y., Polo, M. P., Hoyos, J. L., Bravo, J. E., &Roa, D. F. (2024). Effect of extrusion cooking on the chemical and nutritional properties of instant flours: a review. *F1000 Research*, *12*, 1356. https://doi.org/10.12688/f1000research.140748.1

Rizzolo-Brime, L., Orta-Ramirez, A., Martin, Y. P., & Jakszyn, P. (2023). Nutritional assessment of plant-based meat alternatives: A comparison of nutritional information of plant-based meat alternatives in Spanish supermarkets. *Nutrients*, *15*(6), 1325. https://doi.org/10.3390/nu15061325

Romão, B., Botelho, R. B. A., Nakano, E. Y., Raposo, A., Han, H., Vega-Muñoz, A., ve Zandonadi, R. P. (2022). Are vegan alternatives to meat products healthy? A study on nutrients and main ingredients of products commercialized in Brazil. *Frontiers in Public Health*, *10*, 900598. https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.900598

Siegrist, M., & Hartmann, C. (2023). Why alternative proteins will not disrupt the meat industry. *Meat Science*, *203*, 109223. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109223

Tabak, T., Yılmaz, İ., &Tekiner, İ. H. (2021). Investigation of the changes in volatile composition and amino acid profile of a gala-dinner dish by GC-Ms and LC-MS/MS analyses. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, *25*, 100398. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100398

Toujgani, H., Brunin, J., Perraud, E., Allès, B., Touvier, M., Lairon, D., Mariotti, F., Pointereau, P., Baudry, J., & Kesse-Guyot, E. (2023). The nature of protein intake as a discriminating factor of diet sustainability: a multi-criteria approach. *Scientific Reports*, *13*, 17850. https://doi.org/10.1038/s41598-023-44872-3

Trindade, P. C. O., Santos, B. A. D., Hollweg, G., Correa, L. P., Pinton, M. B., Padilha, M., Payeras, R. H. Z., Rosa, S. C., Cichoski, A. J., & Campagnol, P. C. B. (2023). Pea protein isolate as a meat substitute in canned pork pâté: nutritional, technological, oxidative, and sensory properties. *Foods*, *12*(18), 3486. https://doi.org/10.3390/foods12183486

Van Vliet, S., Bain, J. R., Muehlbauer, M. J., Provenza, F. D., Kronberg, S. L., Pieper, C. F., & Huffman, K. M. (2021). A metabolomics comparison of plant-based meat and grass-fed meat indicates large nutritional differences despite comparable nutrition facts panels. *Scientific reports*, *11*(1), 13828. https://doi.org/10.1038/s41598-021-93100-3

World Cancer Research Fund. (2023, May 22). *Are plant-based meat alternatives better for us?* https://www.wcrf.org/about-us/news-and-blogs/are-plant-based-meat-alternatives-better-for-us/

Wu, G., Fanzo, J., Miller, D. D., Pingali, P., Post, M., Steiner, J. L., & Thalacker-Mercer, A. E. (2014). Production and supply of high-quality food protein for human consumption: sustainability, challenges, and innovations. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1321*(1), 1–19. https://doi.org/10.1111/nyas.12500

Zhang, J., Liu, L., Jiang, Y., Faisal, S., Wei, L., Cao, C., Yan, W., & Wang, Q. (2019). Converting peanut protein biomass waste into “double green” meat substitutes using a high-moisture extrusion process: A multiscale method to explore a process for forming a meat-like fibrous structure. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *67*(38), 10713-10725. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b02711

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 486-496 doi: 10.17714/gumusfenbil.1628312 Research Article

Physicochemical, rheological properties, antioxidant activity and mineral amount of the ice cream containing barberry (*Berberis vulgaris* L.)

Karamuk (Berberis vulgaris L.) ilaveli dondurmanın fizikokimyasal, reolojik özellikleri, antioksidan aktivitesi ve mineral içeriği

Bayram ÜRKEK*

Siran Mustafa Beyaz Vocational School, Gumushane University, Siran, Gumushane 25700, Turkey

• Received: 28.01.2025 • Accepted: 02.05.2025

Abstract

Ice cream is classified as a dairy product or frozen dessert. Various fruits have been incorporated into ice cream formulations to enhance their quality and nutritional properties. In this study, ice creams were prepared with barberry at four different concentrations (0%, 5%, 10% and 15%). The physicochemical, rheological characteristics, antioxidant activity, mineral content and sensory properties of the samples were examined. With the addition of barberry, the dry matter (DM), acidity and overrun values increased, while pH and fat content decreased. The viscosity and consistency coefficients were highest in the samples containing 10% and 15% barberry. All samples exhibited pseudoplastic flow behavior. The colorimetric parameters showed significant differences among the samples, except for the *C** value. The sample with 5% barberry had higher levels of Ca, Na, Mg, S, Fe and Zn compared to the other barberry-added samples. The sample containing 15% barberry demonstrated the highest DPPH scavenging activity (22.15 µg/mL) and total phenolic content (TPC) (1474.04 mg GAE/g), while the sample without barberry had the lowest values (143.19 µg/mL and 149.48 mg GAE/g, respectively). Additionally, the control sample received the lowest scores for gumming structure, texture, melting in the mouth, resistance to melting and overall acceptability. These findings suggest that incorporating 10% barberry could enhance the quality and nutritional value of ice creams.

Keywords: Barberry, DPPH, Ice cream, Mineral content, Sensory properties, Viscosity

Öz

Dondurma, bir süt ürünü veya dondurulmuş tatlı olarak tanımlanabilmketedir. Dondurma formülasyonlarına çeşitli meyveler eklenerek besin değeri ve kalite özellikleri artırılabilmektedir. Bu araştırmada, dondurmaya dört farklı oranlarda (0, 5, 10 ve %15) karamuk meyvesi ilave edilmiştir. Dondurma örneklerinin fizikokimyasal, reolojik özellikleri, mineral içeriği, antioksidan aktivitesi ve duyusal özellikleri incelenmiştir. pH ve yağ içeriği karamuk ilavesiyle azalırken, kurumadde (KM), asitlik ve hacim artışı değerleri artmıştır. Viskozite (20 ve 50 rpm'de) ve kıvam katsayısı değerleri en yüksek %10 ve %15 karamuk içeren örneklerde bulunmuştur. Tüm örnekler psödo-plastik akış davranışı göstermiştir. Renk parametreleri bakımında örnekler arasında, C değeri hariç olmak üzere, önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Karamuk oranı %5 olan örnek, diğer karamuklu örneklerden daha yüksek Ca, Na, Mg, S, Fe ve Zn seviyelerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Karamuk içeriği %15 dondurma örneği, en yüksek DPPH aktivitesi (22,15 µg/mL) ve toplam fenolik madde içeriğine (TFM) (1474,04 mg GAE/g) sahipken, kontrol örneği en düşüktü (143,19 µg/mL ve 149,48 mg GAE/g). Ayrıca, kontrol örneği en düşük yapışkan yapı, doku, ağızda erime, erimeye direnç ve genel kabul edilebilirlik puanlarını almıştır. Elde edilen sonuçlara göre, dondurma üretiminde %10 karamuk eklemenin dondurmanın kalitesini ve besin değerini artırabileceği sonucuna varılmıştır.*

Anahtar kelimeler: *Karamuk, DPPH, Dondurma, Mineral içeriği, Duyusal özellikler, Viskozite*

*Bayram ÜRKEK bayramurkek@gumushane.edu.tr

1. Introduction

The structure of ice cream is complex, comprising fat, protein, emulsifiers, stabilizers and air (Güven & Karaca, 2002). Some literature defines ice cream as both a dairy product and a frozen dessert (Ürkek et al., 2024). Its nutritional value, derived from its fat, protein and other essential components, makes ice cream a popular choice among people of all ages (dos Santos Cruxen et al., 2017).

Recently, consumer demand for natural and healthy products has increased. However, traditional ice cream tends to be low in dietary fiber, vitamin C and antioxidants. Consequently, there has been a rise in studies exploring the use of natural ingredients in ice cream (Soukoulis et al., 2014; Balthazar et al., 2017). Various forms of fruits and vegetables are incorporated into ice cream as natural ingredients to enhance its nutritional value and quality. Different wild fruits are employed as food additives in ice cream research (Karaman & Kayacier, 2012; Ürkek, 2021), with barberry being one of these potential additions (Arslaner et al., 2016).

Barberry (*Berberis vulgaris* L.) belongs to the Berberidaceae family. The fruits are edible, purple in color and have a sharp flavor. Barberries grow naturally in various regions, including Turkey (Özgen et al., 2012). Due to their tart taste and hard seeds, they are typically consumed as juice, marmalade, or jam (Gundogdu, 2013; Rahimi-Madiseh et al., 2017). Barberry is particularly valued among wild fruits for its high antioxidant capacity, along with elevated levels of alkaloids and organic acids (Özgen et al., 2012; Yildiz et al., 2014). Its significant antioxidant activity is attributed to its content of total phenolics and flavonoids, including anthocyanins and other polyphenolic compounds. Due to these beneficial properties, the use of barberry has increased in both traditional and modern medicinal practices (Akbulut et al., 2009; Özgen et al., 2012). Barberry positively impacts human health, being rich in antioxidants and alkaloids. It has therapeutic effects on the cardiovascular and nervous systems, as well as on conditions such as hypertension, tachycardia, epilepsy, convulsions, fever, cholecystitis, cough, depression, liver disease, hyperlipidemia, hyperglycemia and bleeding (Özgen et al., 2012). Additionally, barberry has a high mineral concentration, particularly with a very high potassium (K) concentration (Akbulut et al., 2009)

The study regarding the use of barberry in dairy products is quately limited (Arslaner et al. 2016). In this research, barberry was used in different ratios (0%, 5%, 10% and 15%) in the ice cream. The goal of this research is to investigate the physicochemical properties (DM, pH, acidity, fat content, overrun, first dripping time (FDT), melting rates, viscosity and colorimetric parameters), rheological properties (consistency coefficient and flow behavior), antioxidant activity (DPPH and total phenolic content (TPC)) and mineral content of ice cream containing barberry.

2. Material and method

2.1. Material

The barberry fruits were collected in October from the Şiran district of Gümüşhane city, Turkey. Raw cow milk was purchased from the local dairy plant (Siran Dairy Products Co). The characteristics of the milk were as follows: DM 12.1%, fat 3.4%, ash 0.71%, acidity 0.17%, pH 6.65 and a somatic cell count of 351,000 cells/mL. Stabilizer (salep), emulsifier, butter and sugar were obtained from supermarkets and patisseries. Milk powder was provided by Aynes Dairy Products Co. (Denizli, Turkey).

2.2. Ice cream manufacture

The barberry fruits were promptly transferred to the laboratory after harvest and stored in a refrigerator for two days before production. They were then washed and blended into small pieces. The crushed fruits were used for ice cream production, which took place at Siran Mustafa Beyaz Vocational School using a Breville BCI600 (Sage BSS, Australia) ice cream machine. Butter was added to adjust the fat content of the mixture to 7%. The mixture contained 16% sugar, 0.6% salep, 0.2% emulsifier and 3.2% skim milk powder. Pasteurization of the mixture was carried out at 85 °C for 25 seconds. After pasteurization, the mix was chilled to +4 °C and held overnight in the refrigerator. The mixture was then divided into four equal parts. The control sample was prepared without barberry, while barberry fruits were added at ratios of 5% (BB5), 10% (BB10) and 15% (BB15). The ice cream machine was used to freeze the mixtures. The ice creams were stored in a deep freezer at -22 °C overnight and then kept at -18 °C until analysis.

2.3. Methods

2.3.1. Physicochemical analysis

Gravimetric methods were used to determine the DM, ash, fat, pH and acidity of the ice creams (Metin, 2012). The overrun value was determined and calculated using the following equation (Akbari et al. 2016):

$$\text{Overrun } (\%) = \frac{(\text{weight of mix}) - (\text{weight of ice cream})}{\text{weight of ice cream}} \times 100 \quad (1)$$

The FDT was determined according to the method reported by Güven and Karaca (2002). Twenty-five grams of weighted ice creams were placed on a wire mesh at room temperature. The FDT was determined in seconds when the first drop fell. The melting amount of samples was measured at the 45th and 60th minutes and the melting rate was calculated as a percentage (%).

Viscosity values were performed using a viscosimeter (Brookfield Model DV-II, Stoughton, MA, USA) with spindle no. 6. Rheological parameters were calculated with the power law model with measurements taken at different rpm. The model is expressed as follows:

$$\eta = K\gamma^{(n-1)} \quad (2)$$

η (Pa.s), K (Pa.s^n), γ (rpm), n symbols indicate apparent viscosity, coefficient consistency, shear rate and flow behavior index, respectively.

Colorimetric properties (L^*, a^*, b^*, saturation (C^*) and hue angle (H°)) were determined with a Minolta Colorimeter (CR-400, Osaka, Japan). ΔE^* values were calculated using the method reported by Cecchini et al. (2011). White index (WI) values were calculated using the method described by Kurt and Atalar (2018). The calibration used a white plate.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^* + \Delta a^* + \Delta b^*} \quad (3)$$

2.3.2. Mineral content

The mineral analyses of the ice creams were performed at Gümüşhane University (the Central Research and Application Centre for the Central Research Laboratory). The method reported by Güler (2007) was used for the mineral analyses. Ice creams were digested using the wet-burning method. ICP-MS (Agilent 7700, Japan) was used to determine the mineral content

2.3.3. Antioxidant analysis

2.3.3.1. Extraction method

For antioxidant analysis, 25 g of ice cream samples were weighed. Ethanol (90%) was added to the samples and the diluted mixtures were placed in the orbital shaker at 200 rpm for 6 hours. Following this, the mixtures were filtered using the Whatman No. 1 paper (Şengül et al., 2012). Absorbance values were measured using a spectrophotometer (DU 730, Beckman Coulter Inc., Fullerton, CA, USA).

2.3.3.2. DPPH analysis

The antioxidant activity was assessed using the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging method. The absorbance values of ice cream samples, barberry and reference antioxidants (BHA, BHT, trolox, α-tocopherol) were measured using a spectrophotometer (Gülçin, 2010). Briefly, 0.5 mL of DPPH solution (0.01 mM in ethanol) was mixed with various concentrations (20-100 µg/mL) of the ethanol extracts in a flask. The prepared mixtures were kept in the dark and absorbance was determined against blank samples at 517 nm using the spectrophotometer. IC50 values were calculated from the obtained results.

2.3.3.3. TPC content

The colorimetric method (Folin–Ciocalteu) was used for the determination of the TPC contents. (Gülçin et al., 2002). Briefly, a mixture containing the sample extract (1 mL) and distilled water (46 mL) was prepared. The mixture was allowed to stand for 3 minutes and then sodium carbonate (3 mL) was added. The solutions were shaken on a shaker at 25 °C for 2 hours. After being kept in the dark ambiance for 2 hours, the absorbances were determined at 760 nm with a spectrophotometer (DU 730, Beckman Coulter Inc., Fullerton, CA, USA) in the solutions. Calculations were performed using a linear curve obtained from different concentrations of gallic acid. The results were indicated as µg of gallic acid equivalents (GAE) per mg of sample.

2.3.4. Sensory test

Ten semi-trained panelists evaluated the ice creams based on several criteria: color and appearance, gumming structure, texture, flavor, mouthfeel, resistance to melting and overall acceptability. A hedonic scale was used for the evaluation, with point values ranging from 1 (extremely bad) to 9 (the best) (Drake, 2009). The panelists included six women and four men, aged between 20 and 40 years.

2.4. Statistical analysis

SPSS 17 software (IBM Corp., 2013) was used to analyze the obtained data statistically. Statistical variations were assessed using one-way ANOVA and Duncan's multiple range test was employed to obtain distinctness between the means.

3. Results and discussion

3.1. Physicochemical composition

The DM ($P<0.05$), ash, fat, pH, acidity and melting rates (at 45 and 60 minutes) of the samples were significantly affected by the addition of barberry ($P< 0.01$). However, the FDT was not affected ($P>0.05$).

The dry matter (DM) contents of ice creams BB10 and BB15 were higher than those of samples C and BB5 ($P < 0.05$). The DM of the samples ranged from 30.05% to 31.82% (Table 1). Topdaş et al. (2017) studied the physicochemical and sensory characteristics, as well as the antioxidant activity, of ice creams containing cornelian cherry and found decreasing DM contents in those samples. Similarly, Sayar et al. (2022) reported lower DM values in blueberry-containing samples compared to the sample that did not contain barberry. The results observed in this study were inconsistent with those reported by Sayar et al. (2022) and Topdaş et al. (2017). Arslaner et al. (2016), determined the DM of barberry to be 64.24%, suggesting that the DM values may increase in samples containing barberry in the present study.

The pH and acidity values are presented in Table 1. The pH values of the samples varied from 4.65 to 6.98, while the acidity rates ranged from 0.15% to 0.68%. The pH values significantly decreased with increasing barberry concentration ($P < 0.05$), whereas the acidity values significantly increased ($P < 0.05$). Barberry contains organic acids, including tartaric, ascorbic, malic and citric acids (Özgen et al., 2012; Gundogdu, 2013). The pH values and acidity rates of barberry were reported to be 3.35 and 3.10%, respectively (Yildiz et al., 2014). The discrepancies in pH and acidity values may be attributed to the acidic component content of barberry.

The fat ratio was highest in sample C, while the lowest fat ratio was in sample BB15 (Table 1). The fat content decreased with increasing barberry concentration. Arslaner et al. (2017) found the fat rate of the sample containing 10% barberry to be 3.0%. Ürkek (2021) reported that the fat rates of samples varied from 3.90% to 6.70%, with these results decreasing based on the increase in rosehip concentration. These results were higher than those reported by Arslaner et al. (2017) and similar to those reported by Ürkek (2021). The reduction in fat content may result from the high concentration of fruit in the ice cream formulation.

The overrun rates exhibited a range from 21.79% to 34.73%, as presented in Table 1. The samples containing 10% and 15% barberry exhibited higher overrun rates compared to the other samples ($P< 0.05$). In a related

study, Topdaş et al. (2017) observed an increase in overrun rates with an increase in fruit rate, reporting values between 28.4% and 42.3%. Conversely, El-Samahy et al. (2009) observed a decline in overrun ratios, from 43.11% to 55.71%, with the incorporation of cactus pear pulp. These outcomes were consistent with those reported by Topdaş et al. (2017) but not with those reported by El-Samahy et al. (2009). The overrun values are hypothesized to be affected by various factors, including fat globule size, ice crystal size, the production system and the proportions of protein and emulsifiers (Ürkek, 2021; Sayar et al., 2022).

Table 1. The physicochemical characteristics of ice cream samples

Samples	C	BB5	BB10	BB15
DM (%)	30.05±0.33^{b}	30.85±0.05^{b}	31.67±0.44^{a}	31.82±0.18^{a}
pH	6.98±0.05^{a}	6.10±0.01^{b}	5.00±0.03^{c}	4.65±0.03^{d}
Acidity (% lactic acid)	0.15±0.07^{d}	0.37±0.42^{c}	0.54±0.30^{b}	0.68±2.72^{a}
Fat (%)	6.60±0.28^{a}	5.65±0.21^{b}	5.00±0.14^{c}	4.05±0.07^{d}
Overrun (%)	21.79±1.1b^{a}	24.75±0.45^{b}	34.73±0.49^{a}	34.38±2.21^{a}
K (Pa.s^{n})	41.00±3.09^{b}	42.05±3.36^{b}	100.73±5.25^{a}	105.91±8.34^{a}
n	0.38±0.04^{a}	0.38±0.01^{a}	0.29±0.02^{b}	0.30±0.04^{ab}
R^2	0.993	0.997	0.991	0.998

a-d letters indicate statistical significance in the same row (P<0.05). The data were shown as the mean ± standard deviation. C: control without barberry, BB5: sample containing 5% (w/w) barberry, BB10: sample containing 10% (w/w) barberry, BB15: sample containing 15% (w/w) barberry

The melting parameters, including the freeze-drying time (FDT) and melting rates at 45 and 60 minutes are shown in Figure 1. The FDT of the samples exhibited both decreases and increases; however, these differences were statistically non-significant (P > 0.05). The FDT ranged from 1520 seconds to 1840 seconds. The melting rates at 45 and 60 minutes were higher in samples C and BB5 compared to samples BB10 and BB15 (P < 0.05). The melting rates at 45 and 60 minutes ranged from 6.66% to 36.83% and from 22.05% to 87.24%, respectively (Figure 1). Ürkek (2021) reported the FDT to be between 1530 seconds and 1830 seconds, while Topdaş et al. (2017) found the highest FDT in ice cream containing 15% cornelian cherry. Şanlıdere Aloğlu et al. (2018) investigated the physicochemical and sensory characteristics of ice creams containing strawberries, determining melting rates (at 45 and 60 minutes) to be between 82.45% and 91.38% and 95.82% and 96.38%, respectively. Karaman et al. (2014), who studied various properties of ice cream containing persimmon puree at five different ratios (8%, 16%, 24%, 32% and 40%), reported that the melting rate (at 30 minutes) of the samples decreased with increasing amounts of persimmon puree.

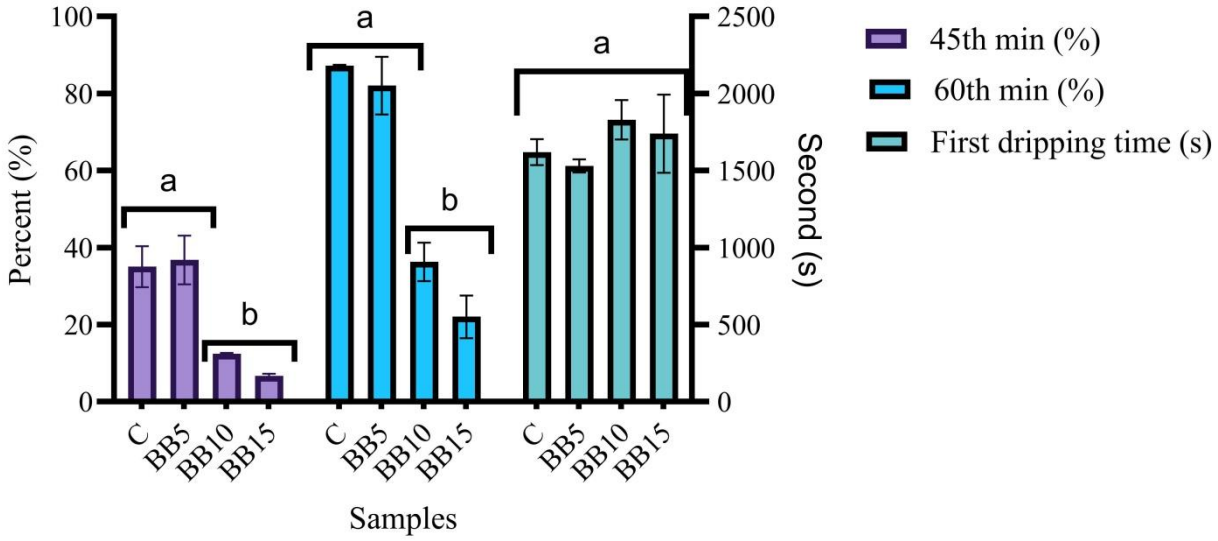


Figure 1. The melting parameters of ice creams (a-d letters indicate statistical significance at P<0.05 level.) C: control without barberry, BB5: sample containing 5% (w/w) barberry, BB10: sample containing 10% (w/w) barberry, BB15: sample containing 15% (w/w) barberry.

The pH, fat amount and destabilization, size of ice crystal, viscosity and overrun could play important roles in the melting parameters (Muse & Hartel, 2004; Sofjan & Hartel, 2004; Favaro-Trindade et al., 2007). A positive correlation has been identified between viscosity and melting parameters (Muse & Hartel, 2004). Similar results were observed in this research (Figures 1 and 2).

3.2. Viscosity and rheological properties

The effect of the addition of barberry was statistically significant on the viscosity and K values of the ice creams (P<0.01). As shown in Figure 2, the viscosity values at 20 and 50 rpm ranged from 6365 to 12781 cP and from 3546 to 6945 cP, respectively. Samples C and BB5 exhibited lower viscosity values than samples BB10 and BB15 (P< 0.05). The differences between samples BB10 and BB15 were statistically insignificant (P>0.05). Topdaş et al. (2017) determined that ice cream samples containing cornelian cherry had decreasing viscosity values. In contrast, Ürkek et al. (2019) found that the viscosity values of ice creams increased with the concentration of sloe berries. The results obtained in this study were consistent with those of Ürkek et al. (2019) but not with those reported by Topdaş et al. (2017). The viscosity values of the samples may be attributed to changes in protein structure due to pH variations and the increase in fiber content related to the fruit composition.

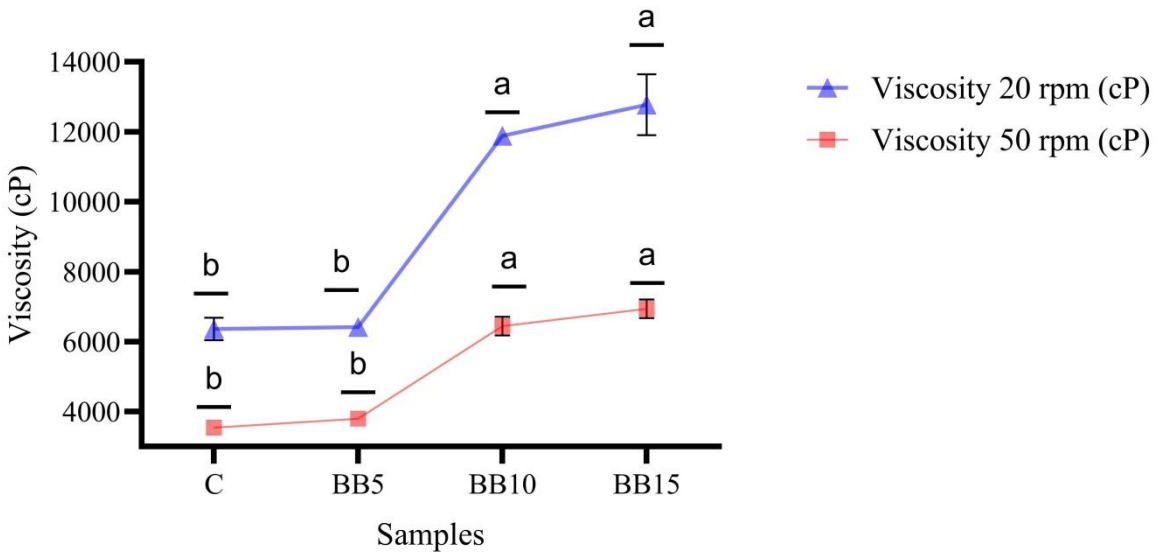


Figure 2. The viscosity values of ice cream samples (a-d letters indicate statistical significance at P<0.05 level). C: control without barberry, BB5: sample containing 5% (w/w) barberry, BB10: sample containing 10% (w/w) barberry, BB15: sample containing 15% (w/w) barberry

The K values are presented in Table 1, ranging from 41.00 Pa·s^n to 105.91 Pa·s^n. Samples C and BB5 showed no significant changes in K values (P > 0.05), although both were lower than those of samples BB10 and BB15. Sayar et al. (2022) reported a decrease in K values for ice creams containing blueberries, while Ürkek (2021) observed an increase in K values with the addition of rosehip. The DM rate plays a crucial role in influencing viscosity and K values (Sayar et al., 2022). The increase in viscosity and K values could be attributed to the higher DM ratio of the fruit-based samples (Table 1).

The n value of the sample containing 10% barberry was the lowest n value (Table 1). The n values varied between 0.29 and 0.38, indicating that the n values of all samples were pseudoplastic. Previous studies have identified the flow behavior of ice cream samples containing various plant materials as pseudoplastic (Soukoulis & Tzia, 2008; Akalın et al., 2018; Sayar et al., 2022; Ürkek et al., 2022).

3.3. Colorimetric parameters

The effect of the addition of barberry was statistically significant on the *L**, *H°* (P<0.01), *b**, *a* and* WI (P<0.05), while only the *C** values were not affected (P>0.05). Table 2 presents the colorimetric parameter values of the samples. The sample not contain barberry exhibited the highest *L**, *b**, *H°* and WI values, whereas these values were the lowest in the sample containing 15% barberry. The lowest and highest a*

values were identified in samples C and BB15, respectively. *C** values did not show a significant change among samples (Table 2). The Δ*E** values indicated clear color differences among the samples.

Table 2. The color parameters of ice creams

Samples	C	BB5	BB10	BB15
*L**	86.22±0.18^{c}	79.82±1.18^{b}	77.58±2.89^{ab}	73.54±1.12^{a}
*a**	-3.66±0.05^{a}	2.70±1.94^{ab}	7.40±4.77^{bc}	11.54±0.42^{c}
*b**	10.66±0.71^{c}	9.58±0.67^{bc}	8.10±0.25^{ab}	6.69±0.71^{a}
H°	108.96±0.94^{c}	74.85±9.75^{b}	50.19±19.60^{ab}	30.04±1.74^{a}
*C**	11.27±0.69^{a}	10.02±1.17^{a}	11.29±2.94^{a}	13.34±0.72^{a}
WI	82.20±0.58^{c}	77.47±1.58^{bc}	74.89±3.90^{ab}	70.36±1.33^{a}
Δ*E**	0.00	9.16±2.10	14.27±5.54	20.23±0.82

a-d letters indicate statistical significance in the same row (P<0.05). The data were shown as the mean ± standard deviation. C: control without barberry, BB5: sample containing 5% (w/w) barberry, BB10: sample containing 10% (w/w) barberry, BB15: sample containing 15% (w/w) barberry

The anthocyanins and flavonoids in the fruits are responsible for the different colors observed (Moyer et al., 2002). Özgen et al. (2012) reported that the *L**, *a**, *b**, *C** and *H*° values of barberry were between 10.91-12.27, 3.28-4.94, 2.37-2.63, 4.11-5.51 and 26.50-40.15, respectively. Thus, the barberry content may affect the colorimetric parameter values of the samples. Similar results have been observed in several previous studies (Şanlıdere Aloğlu et al., 2018; Ürkek, 2021; Ürkek et al., 2019; Sayar et al., 2022).

3.4. Mineral content

The control sample's Ca, Na and S contents (Table 3) were higher than those in BB10 and BB15 (P< 0.05), while the sample C had lower K content (P< 0.05). The Mn, Fe and Zn levels in samples BB10 and BB15 were significantly lower than in sample C (P< 0.05). The P and Ni amounts did not indicate significant change (P>0.05). The Ca and Mg ratio was highest in the sample containing 5% barberry, while the Mn and Fe contents were greatest in sample C.

Table 3. The mineral (mg/kg) contents of ice creams

Mineraller	C	BB5	BB10	BB15
Major elements				
Ca	1629.50±16.98^{b}	1915.73±25.06^{a}	1371.98±29.08^{c}	1273.54±25.94^{d}
Na	487.99±6.89^{a}	517.81±11.03^{a}	378.16±20.73^{b}	362.70±0.74^{b}
Mg	186.79±0.36^{b}	258.25±3.25^{a}	202.78±13.59^{b}	191.24±0.25^{b}
P	849.10±2.89^{a}	831.18±11.99^{a}	868.57±54.73^{a}	870.27±4.80^{a}
S	221.17±3.13^{a}	174.43±2.79^{b}	136.19±12.91^{c}	132.12±0.49^{c}
K	1934.43±28.09^{b}	2048.46±46.32^{b}	2292.05±119.23^{a}	2464.52±12.85^{a}
Minor elements				
Mn	10.47±0.72^{a}	1.10±0.14^{c}	3.45±0.57^{b}	5.10±0.81^{b}
Fe	29.79±1.29^{a}	25.83±0.03^{b}	21.47±0.17^{c}	17.75±0.98^{d}
Ni	0.54±0.07^{b}	0.42±0.01^{b}	0.84±0.01^{a}	0.50±0.08^{b}
Zn	24.19±0.10^{a}	23.37±0.62^{a}	11.60±0.21^{b}	8.55±0.22^{c}

a-d letters indicate statistical significance in the same row (P<0.05). The data were shown as the mean ± standard deviation. C: control without barberry, BB5: sample containing 5% (w/w) barberry, BB10: sample containing 10% (w/w) barberry, BB15: sample containing 15% (w/w) barberry

Previous studies reported that adding fruits resulted in significant differences in the mineral contents of samples (Ürkek et al., 2019; Ürkek, 2021). Barberry contains a high amount of minerals, including Ca (2744.06 ppm), K (12111.19 ppm), Na (2569.33 ppm), Mg (1193.30 ppm) and P (2715.51 ppm). In contrast, its Mn (6.54 ppm), Fe (323.86 ppm), Ni (19.98 ppm) and Zn (7.95 ppm) contents are low (Akbulut et al., 2009). Thus, the mineral content of barberry may contribute to changes in the mineral content of the samples.

3.5. Antioxidant activity

The lowest IC50 value was obtained in the samples that did not contain barberry (143.19 µg/mL), while the IC50 values decreased with increasing barberry content. A high IC50 value indicates low antioxidant activity. The sample containing 15% barberry exhibited higher antioxidant activity (22.15 µg/mL) than BHA, BHT and α-tocopherol; however, this result was lower than that of trolox. The antioxidant activity of all samples was ranked from high to low as follows: trolox > BB15 > BHA > BHT > α-tocopherol > BB10 > BB5 > barberry (fruit) > C (Table 4).

The barberry fruit had the highest TPC value at 4440.08 mg GAE/g, whereas sample C had the lowest TPC at 149.48 mg GAE/g (Table 4). The TPC of the ice creams increased with the addition of barberry. The TPC and IC50 values showed parallel results. Previous studies have determined that ice creams containing different fruits exhibited increased antioxidant activity based on fruit concentration (Karaman & Kayacier, 2012; Ürkek et al., 2019; Sayar et al., 2022).

The antioxidant activity of barberry is high due to anthocyanins and phenolics (Özgen et al., 2012; Yildiz et al., 2014). Therefore, ice cream samples containing barberry might demonstrate high antioxidant activity.

Table 4. TPC and IC_{50} values of barberry, ice creams

Samples	DPPH (IC_{50}; µg/mL)	TPC (mg GAE/g)
BHA	26.51±0.26	-
BHT	25.36±1.26	-
Trolox	18.34±0.22	-
α-tocopherol	20.96±0.38	-
Barberry (fruit)	44.04±1.49	4440.08±62.88
C	143.19±32.49	149.48±73.03
BB5	33.97±0.95	802.82±27.72
BB10	28.41±0.44	1253.01±86.26
BB15	22.15±0.14	1474.04±17.12

C: control without barberry, BB5: sample containing 5% (w/w) barberry, BB10: sample containing 10% (w/w) barberry, BB15: sample containing 15% (w/w) barberry

3.6. Sensory test

The samples containing 10% and 15% barberry received higher scores than the other samples in terms of color and appearance, gumming structure, texture and flavor (Figure 3). The meltdown in mouth score was highest in sample BB5, while sample C had the lowest melting resistance score. Sample BB5 was deemed the least desirable in terms of color, appearance and flavor by the panelists. The highest overall acceptability score was in sample BB10 (7.83), whereas sample C had the lowest score (6.85). Ürkek et al. (2019) reported similar results.

4. Conclusions

The current study found that the addition of BB resulted in increased acidity, dry matter (DM), overrun and viscosity (at 20 and 50 rpm), melting resistance (malting rates at 45 and 60 minutes), along with higher levels of potassium (K), calcium (Ca), sodium (Na), sulfur (S), iron (Fe) and zinc (Zn). Conversely, the pH and fat values decreased. The L^*, a^*, b^*, H°, ΔE^* and white index (WI) indicated significant changes among samples. The antioxidant activity of the samples containing barberry was found to be higher than that of the control sample. Samples BB10 and BB15 received higher scores for all sensory properties, except for mouthfeel and melting resistance. Consequently, barberry could be used to enhance the nutritional and quality characteristics of ice creams.

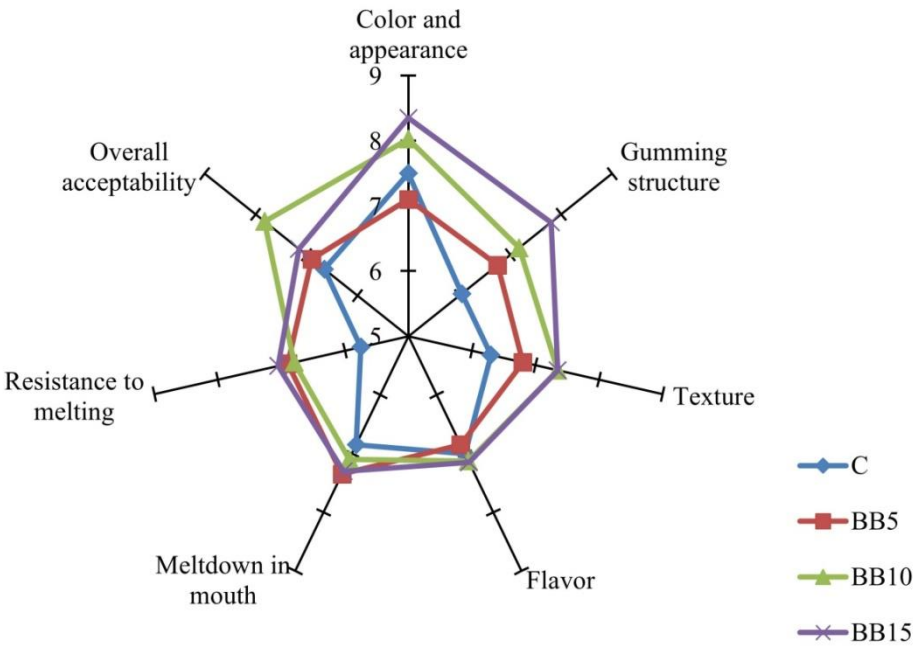


Figure 3. Sensory test of ice creams (C: control without barberry, BB5: sample containing 5% (w/w) barberry, BB10: sample containing 10% (w/w) barberry, BB15: sample containing 15% (w/w) barberry)

Acknowledgment

A part of the article was an oral presentation at the International Agricultural Science Congress and I. International Iğdır Congress on Multidisciplinary Studies and published as an abstract.

Author contribution

The author is responsible for the entire article.

Declaration of ethical code

The author of this article declares that the materials and methods used in this study do not require ethics committee approval and/or legal-special permission.

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

References

Akalın, A. S., Kesenkas, H., Dinkci, N., Unal, G., Ozer, E., & Kınık, O. (2018). Enrichment of probiotic ice cream with different dietary fibers: Structural characteristics and culture viability. *Journal of Dairy Science*, *101*(1), 37–46. https://doi.org/10.3168/jds.2017-13468

Akbari, M., Eskandari, M. H., Niakosari, M., & Bedeltavana, A. (2016). The effect of inulin on the physicochemical properties and sensory attributes of low-fat ice cream. *International Dairy Journal*, *57*, 52–55. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.02.040

Akbulut, M., Çalişir, S., Marakoglu, T., & Çoklar, H. (2009). Some physicomechanical and nutritional properties of barberry (*Berberis vulgaris* l.) fruits. *Journal of Food Process Engineering*, *32*(4), 497–511. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00229.x

Arslaner, A., Ali, M., Bayburt, S., Mühendislik, Ü., Gıda, F., & Bölümü, M. (2017). Ceviz Ezmesi ve Dut Kurusu Tozu İlavesiyle Üretilen Düşük Kalorili Dondurmanın Bazı Kalite Niteliklerinin Belirlenmesi. *Atatürk Univ., J. of the*

Agricultural Faculty, *48*(1), 57–64.

Arslaner, A., Çakıroğlu, K., & Çakır, Ö. (2016). Ice-cream with karamuk. *Uluslar Arası Erzincan Sempozyumu*, *2*(September), 825–834.

Balthazar, C. F., Silva, H. L. A., Cavalcanti, R. N., Esmerino, E. A., Cappato, L. P., Abud, Y. K. D., Moraes, J. andrade, M. M., Freitas, M. Q., Sant'Anna, C., Raices, R. S. L., Silva, M. C., & Cruz, A. G. (2017). Prebiotics addition in sheep milk ice cream: A rheological, microstructural and sensory study. *Journal of Functional Foods*, *35*, 564–573. https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.06.004

Cecchini, M., Contini, M., Massantini, R., Monarca, D., & Moscetti, R. (2011). Effects of controlled atmospheres and low temperature on storability of chestnuts manually and mechanically harvested. *Postharvest Biology and Technology*, *61*(2–3), 131–136. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.03.001

Drake M.A., (2009). *Modern sensory practices*. In: Clark, S., Costello, M., Drake M.A. and Bodyfelt, F., (eds) The Sensory Evaluation of Dairy Products. New York: Springer, pp. 505–530.

dos Santos Cruxen, C. E., Hoffmann, J. F., Zandoná, G. P., Fiorentini, Â. M., Rombaldi, C. V., & Chaves, F. C. (2017). Probiotic butiá (Butia odorata) ice cream: Development, characterization, stability of bioactive compounds and viability of Bifidobacterium lactis during storage. *LWT*, *75*, 379–385. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.09.011

El-Samahy, S. K., Youssef, K. M., & Moussa-Ayoub, T. E. (2009). Producing ice cream with concentrated cactus pear pulp: a preliminary study. *J. Pacd*, *11*, 1–12.

Favaro-Trindade, C. S., De Carvalho Balieiro, J. C., Dias, P. F., Sanino, F. A., & Boschini, C. (2007). Effects of culture, pH and fat concentration on melting rate and sensory characteristics of probiotic fermented yellow mombin (Spondias mombin L) ice creams. *Food Science and Technology International*, *13*(4), 285–291. https://doi.org/10.1177/1082013207082387

Gülçin, I. (2010). Antioxidant properties of resveratrol: A structure-activity insight. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *11*(1), 210–218. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.07.002

Gülçin, I., Oktay, M., Küfrevioğlu, Ö. I., & Aslan, A. (2002). Determination of antioxidant activity of lichen Cetraria islandica (L) Ach. *Journal of Ethnopharmacology*, *79*(3), 325–329. https://doi.org/10.1016/S0378-8741(01)00396-8

Güler, Z. (2007). Levels of 24 minerals in local goat milk, its strained yoghurt and salted yoghurt (tuzlu yoğurt). *Small Ruminant Research*, *71*(1–3), 130–137. https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2006.05.011

Gundogdu, M. (2013). Determination of antioxidant capacities and biochemical compounds of *Berberis vulgaris* L. Fruits. *Advances in Environmental Biology*, *7*(2), 344–348.

Güven, M., & Karaca, O. B. (2002). The effects of varying sugar content and fruit concentration on the physical properties of vanilla and fruit ice-cream-type frozen yogurts. *International Journal of Dairy Technology*, *55*(1), 27–31. https://doi.org/10.1046/j.1471-0307.2002.00034.x

Karaman, S., & Kayacier, A. (2012). Rheology of ice cream mix flavored with black tea or herbal teas and effect of flavoring on the sensory properties of ice cream. *Food and Bioprocess Technology*, *5*(8), 3159–3169. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0713-5

Karaman, S., Toker, Ö. S., Yüksel, F., Çam, M., Kayacier, A., & Dogan, M. (2014). Physicochemical, bioactive and sensory properties of persimmon-based ice cream: Technique for order preference by similarity to ideal solution to determine optimum concentration. *Journal of Dairy Science*, *97*(1), 97–110. https://doi.org/10.3168/jds.2013-7111

Kurt, A., & Atalar, I. (2018). Effects of quince seed on the rheological, structural and sensory characteristics of ice cream. *Food Hydrocolloids*, *82*, 186–195. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.04.011

Meilgaard, M. C., Carr, B. T., & Civille, G. V. (1999). Sensory Evaluation Techniques. In *Boca Raton, FL:CRC Pres, Inc*. (3rd ed.). https://doi.org/10.1017/S1431927611002686

Metin, M. (2012): *Süt ve mamülleri analiz yöntemleri*. Ege Üniversitesi Basımevi, Bornova, İzmir, Turkey

Moyer, R. A., Hummer, K. E., Finn, C. ., Frei, B., & Wrolstad, R. E. (2002). Anthocyanins, phenolics and antioxidants capacity in diverse small fruits. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, *50*(5), 519-525.

Muse, M. R., & Hartel, R. W. (2004). Ice cream structural elements that affect melting rate and hardness. *Journal of Dairy Science*, *87*(1), 1–10. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73135-5

Özgen, M., Saraçoğlu, O., & Geçer, E. N. (2012). Antioxidant capacity and chemical properties of selected barberry (*Berberis vulgaris* L.) fruits. *Horticulture Environment and Biotechnology*, *53*(6), 447–451. https://doi.org/10.1007/s13580-012-0711-1

Rahimi-Madiseh, M., Lorigoini, Z., Zamani-Gharaghoshi, H., & Rafieian-Kopaei, M. (2017). *Berberis vulgaris* : Specifications and traditional uses. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, *20*(5), 569–587. https://doi.org/10.22038/IJBMS.2017.8690

Şanlıdere Aloğlu, H., Gökgöz, Y., & Bayraktar, M. (2018). Strawberry tree fruits (Arbutus unedo L) ice cream production, investigation of physical, chemical and sensorial parameters. *Gida / the Journal of Food*, *43*(6), 1030–1039. https://doi.org/10.15237/gida.gd18098

Sayar, E., Şengül, M., & Ürkek, B. (2022). Antioxidant capacity and rheological, textural properties of ice cream produced from camel's milk with blueberry. *Journal of Food Processing and Preservation, October 2021*, 1–8. https://doi.org/10.1111/jfpp.16346

Şengül, M., Erkaya, T., Şengül, M., & Yıldız, H. (2012). The effect of adding sour cherry pulp into yoghurt on the physicochemical properties, phenolic content and antioxidant activity during storage. *International Journal of Dairy Technology*, *65*(3), 429–436. https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2012.00838.x

Sofjan, R. P., & Hartel, R. W. (2004). Effects of overrun on structural and physical characteristics of ice cream. *International Dairy Journal*, *14*(3), 255–262. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2003.08.005

Soukoulis, C., Fisk, I. D., & Bohn, T. (2014). Ice cream as a vehicle for incorporating health-promoting ingredients: Conceptualization and overview of quality and storage stability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *13*(4), 627–655. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12083

Soukoulis, C., & Tzia, C. (2008). Impact of the acidification process, hydrocolloids and protein fortifiers on the physical and sensory properties of frozen yogurt. *International Journal of Dairy Technology*, *61*(2), 170–177. https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2008.00385.x

Topdaş, E. F., Çakmakçı, S., & Çakıroğlu, K. (2017). The antioxidant activity, vitamin C contents, physical, chemical and sensory properties of ice cream supplemented with cornelian cherry (Cornus mas L.) paste. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, *23*(5), 691–697. https://doi.org/10.9775/kvfd.2016.17298

Ürkek, B. (2021). Effects of the addition of rose hip on various nutritional and quality properties of ice cream. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, *20*(October), 1022–1030. http://op.niscair.res.in/index.php/IJTK/article/view/32564/465479838

Ürkek, B., Aktaş, H., Öztuğ, M. Ö., Yeniçeri, E., & Öztuğ, P. (2024). Physicochemical , sensory and antimicrobial properties of the ice cream containing lavender (Lavandula angustifolia) essential oil. *Ovidius University Annals of Chemistry*, *35*(2), 91–97. https://doi.org/10.2478/auoc-2024-0012

Ürkek, B., Öztürk, F., & Şengül, M. (2022). Farklı bitki tozlarının (üzüm çekirdeği, keçiboynuzu ve çörekotu tozu) dondurma üretiminde kullanım imkanları/Possibilities of using in ice cream production (grape seed, carob and black cumin powder) of differernt plant powders. *ATA-Gıda Dergisi*, *1*(1), 1–5.

Ürkek, B., Şengül, M., Akgül, H. I., & Kotan Erkaya, T. (2019). Antioxidant activity, physiochemical and sensory characteristics of ice cream incorporated with sloe berry (Prunus spinosa L.). *International Journal of Food Engineering*, *15*(11–12), 1–9. https://doi.org/10.1515/ijfe-2018-0029

Yildiz, H., Ercisli, S., Sengul, M., Topdas, E. F., Beyhan, O., Cakir, O., Narmanlioglu, H. K., & Orhan, E. (2014). Some physicochemical characteristics, bioactive content and antioxidant characteristics of non-sprayed barberry (*Berberis vulgaris* L.) fruits from Turkey. *Erwerbs-Obstbau*, *56*(4), 123–129. https://doi.org/10.1007/s10341-014-0216-4

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 497-515 doi: 10.17714/gumusfenbil.1627648 Araştırma Makalesi / *Research Article*

PLA esaslı grafen, kara havuç atığı ve huntit-hidromanyezit takviyeli biyokompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu

Production and characterization of PLA based graphene, black carrot waste and huntite-hydromagnetite reinforced biocomposites

Ayşenur SÖNMEZ[1], Şeyma DUMAN[2], Muhammed Said FİDAN*[3,4]

[1]*Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Biyokompozit Mühendisliği Anabilim Dalı, 16310, Bursa*

[2]*Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 16310, Bursa*

[3]*Bursa Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, 16310, Bursa*

[4]*Bursa Teknik Üniversitesi, Mobilya ve Ahşap Uygulama ve Araştırma Merkezi, 16310, Bursa*

• Geliş tarihi / Received: 27.01.2025 • Kabul tarihi / Accepted: 05.05.2025

Öz

Bu çalışmada; polilaktik asit (PLA) matrisi içerisinde takviye malzemesi olarak kara havuç (KH), katkı maddesi olarak grafen nanoplateletler (GNP) ve mineral katkı olarak huntit-hidromanyezit (HH) eklenerek biyokompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen biyokompozitlerin morfolojik, fiziksel, mekanik, termal ve alev geciktirici özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Biyokompozit üretimi için çift vidalı ekstrüzyon yöntemi kullanılmış, ardından sıcak pres kalıplama ile numuneler şekillendirilmiştir. Numunelerin karakterizasyonunda fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapısal ve morfolojik analizler gerçekleştirilmiştir. Mekanik özellikler çekme, eğilme ve darbe dayanımı testleriyle, termal davranış ise diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), termogravimetrik analiz (TGA), yük altında eğilme sıcaklığı (HDT) testleriyle değerlendirilmiştir. Alev geciktirici performans UL-94 V yanma testi ile ölçülmüştür. Sonuçlara göre, KH ve HH katkıları PLA biyokompozitlerin kristalizasyon derecesini tüm varyasyonlarda arttırmıştır. HH ilavesi, matrisin bozunma sıcaklığını iyileştirirken termal kararlılık ve kalıntı miktarını da yükseltmiştir. PLA/GNP/KH biyokompozitinde KH katkısı, ısıl dayanımı hafifçe düşürmesine rağmen kütle kaybı hızını yavaşlatmış ve kalıntı oranını artırmıştır. PLA/GNP/KH/HH biyokompozitinde ise HH ilavesiyle termal deformasyon sıcaklığı 55,5 °C'ye yükselerek saf PLA'ya kıyasla %2,97'lik iyileşme sağlanmıştır. Elde edilen veriler, KH ve HH katkılarının PLA tabanlı biyokompozitin termal performansını önemli ölçüde optimize ettiğini ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Biyokompozit, Grafen, Hidromanyezit, Huntit, Kara havuç, PLA

Abstract

In this study, biocomposite materials were produced by incorporating black carrot (KH), as a reinforcement material, graphene nanoplatelets (GNP) as additives, and huntite-hydromagnesite (HH) as mineral additives into a polylactic acid (PLA) matrix. A comprehensive investigation was conducted on the morphological, physical, mechanical, thermal, and flame retardant properties of the resulting biocomposites. The fabrication of the biocomposites was carried out through the implementation of a twin-screw extrusion method, subsequently followed by a process of hot press molding. Structural and morphological analysis were performed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM) for characterization of the samples. Mechanical properties were evaluated by tensile, flexural, and impact strength tests. Thermal behavior was evaluated by differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), and bending temperature under load (HDT) tests. The flame retardant performance of the samples was measured using the UL-94 V combustion test. The experimental findings revealed that the incorporation of KH and HH enhanced the degree of crystallization in all variations of PLA biocomposites. The incorporation of HH enhanced the degradation temperature of the matrix, concurrently augmenting its thermal atability and residual amount. In the PLA/GNP/KH biocomposite, the addition of KH led to a slight decrease in thermal strength, but it also slowed down the rate of mass loss and increased the residue rate. In the PLA/GNP/KH biocomposite, the addition of HH increased the thermal deformation temperature to 55.5 ºC, representing an improvement of 2.97% compared to pure PLA. The finding of this study indicate that the incorporation of KH and HH additives led to a substantial enhancement in the thermal performance of PLA-based biocomposites.

Keywords: *Biocomposite, Graphene, Hydromagnesite, Huntite, Black carrot, PLA*

*Muhammed Said FİDAN; said.fidan@btu.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Günümüzde artan çevresel kaygılar ve sürdürülebilirlik gereksinimleri, kabul edilebilir mekanik özelliklere sahip, biyolojik olarak parçalanabilir, düşük yoğunluklu ve ekonomik malzemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Yang vd., 2021). Bu bağlamda, doğal liflerin biyobazlı ve/veya biyoparçalanabilir polimerler (biyopolimerler) ile birleştirilmesiyle üretilen yeşil kompozitler, alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Righetti vd., 2019a). Sürdürülebilirlik, çevre dostu yapı, hafiflik ve düşük maliyet avantajları sayesinde bu kompozitler; otomotiv, ambalaj, biyomedikal, spor endüstrileri başta olmak üzere çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır (Mann vd., 2018; Torres vd., 2019; Crupi vd., 2023; Zorah vd., 2023).

Polilaktik asit (PLA), teknik uygulamalar için gelecek vaat eden biyopolimerlerden biridir. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen PLA, düşük maliyet, yüksek üretim kapasitesi, üstün sertlik ve şeffaflık gibi avantajlara sahiptir. Ancak darbe direnci, süneklik, gerilme mukavemeti, işlenebilirlik, uzun vadeli termal stabilite ve alev geciktirici özellikler gibi alanlarda performansının iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu eksikliklerin giderilebilmesi için PLA'nın nano takviye malzemeleri ve/veya dolgu maddeleri ile güçlendirilmesi kritik önem taşır (Mincheva vd., 2019; Ramesh vd., 2020; Panchal vd., 2021; Mohd vd., 2022).

PLA'nın mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla nano dolgu maddeleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Gao vd., 2016; Gonçalves vd., 2016). Bunlardan biri olan GNP, grafen ailesine ait olup tabakalı grafen yapılarından oluşur. GNP'ler, grafenin temel avantajlarını (yüksek çekme mukavemeti, esneklik, geniş özgül yüzey alanı, yüksek yüzey/hacim oranı ve iki boyutlu yapı) korurken, diğer grafen bazlı bazı nanomalzemelere kıyasla düşük üretim maliyeti sunmasıyla dikkat çeker (Kim & Lee, 2019; Gavallas vd., 2023; Göçügenci & Keskin, 2023; Rahmat vd., 2024). Bu özellikleri nedeniyle GNP'ler, polimer matrislerde çok işlevli bir yeni nesil dolgu maddesi olarak kabul edilir (Gao vd., 2016). Literatürde; polikarbonat (PC), poli(etilen-2,6-naftalat) (PEN), poli(kaprolakton) (PCL), naylon-6, poli(metil metakrilat) (PMMA), poli(viniliden florür) (PVDF), epoksi, poliüretanlar, poli(vinil alkol), poliamid 6 (PA6), polistiren (PS) ve PLA gibi polimerlerle grafen kompozitleri üzerine kapsamlı çalışmalar mevcuttur (Chieng vd., 2012). Örneğin, Yenier vd. (2015), grafen nanoparçacık takviyeli kitosan biyokompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, %2 ağırlık oranında grafen nanoparçacık takviyeli kitosan biyokompozitlerde çekme dayanımında %72, Young Modülünde %170 ve termal iletkenlikte %258 artış gözlemlemişlerdir (Yenier vd., 2015).

Pinto vd. (2015), PLA matrisine iki farklı tipte GNP ekleyerek ürettikleri PLA/GNP kompozitlerinin biyolojik bozunma sürecinin mekanik özellikler ve biyouyumluluk üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonuçları %5 ağırlık oranında dolgu içeren kompozitlerde Young modülünde %14, çekme mukavemetinde ise xGnP-C750 tipi GNP'lerde %20 ve xGnP-M5 tipinde %6 oranında artış olduğunu göstermiştir. Ancak bu çalışmanın odak noktası parçacık boyutunun mekanik özelliklere etkisinden ziyade biyolojik bozunma davranışa odaklandığı için sözkonusu mekanik iyileşmeler detaylı analiz edilmemiştir (Pinto vd., 2015). Kim ve Jeong (2010) ise, eriyik karıştırma yöntemiyle PLA'ya pullu grafit (EG) entegre ederek PLA/EG nanokompozitleri geliştirmiştir. Elde edilen bulgular, %3 ağırlık oranının altında EG içeren kompozitlerin hem termal kararlılık hem de mekanik performansta belirgin iyileşme sergilediğini ortaya koymuştur (Kim & Jeong, 2010).

Doğal liflerin biyopolimerlere dahil edilmesi, düşük maliyet, geri dönüştürülebilirlik, biyolojik olarak parçalanabilirlik, toksik olmama ve üstün mekanik performans gibi avantajları nedeniyle yaygın bir strateji haline gelmiştir. Son yıllarda, sürdürülebilir malzemelere olan talebin artmasıyla birlikte, tarımsal-endüstriyel atıkların polimer kompozitlerde takviye malzemesi veya fonksiyonel katkı olarak kullanımı önemli ölçüde yaygınlaşmıştır. Bu atıkların döngüsel ekonomiye kazandırılması, artan küresel gıda ihtiyacına paralel olarak kaynak verimliliğini artırmaya yönelik kritik bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, tarımsal atık bazlı kompozitlerin geliştirilmesine yönelik akademik ve endüstriyel araştırmalar hızla yoğunlaşmaktadır (Sogut & Cakmak, 2020).

Türkiye'de yetiştirilen siyah havuçlar, şalgam, meyve suyu ve meyve suyu konsantre üretimi gibi endüstriyel işlemlerde kullanılmakta ve bu süreçte önemli miktarda havuç posası yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Söz konusu posanın bir bölümü hayvan yemi olarak değerlendirilse de büyük kısmı endüstriyel atık olarak kalmaktadır. Oysa bu posa, yüksek bitkisel lif içeriğiyle yenilenebilir bir biyokütle kaynağı olarak dikkat

çekmektedir. Liflerin temel bileşeni olan selüloz, doğada en yaygın bulunan hammaddedir ve bitki hücre duvarında hemiselüloz, lignin, kül ve ekstraktiflerle birleşerek lignoselülozik yapıyı oluşturur (Hayatioğlu vd., 2024). Bu atıklar, biyopolimerlerin mekanik ve fonksiyonel özelliklerini geliştirmek için potansiyel bir katkı maddesi kaynağıdır. Nitekim havuç liflerinin biyokompozit ambalaj malzemelerinde takviye elemanı olarak kullanımını araştıran çalışmalar mevcuttur. Ayrıca, antioksidan ve immünomodülatör aktiviteleri nedeniyle havuç posasının tıbbi uygulamalarda kullanımı da literatürde desteklenmektedir (Sucheta vd., 2020).

Havuç lifleri (CF) ve mikrokristalin selüloz (MCC) ile takviye edilmiş kitosan (CH) esaslı filmler üzerine yapılan bir çalışmada, dolgu maddesi konsantrasyonu arttıkça mekanik performans, bariyer özellikleri ve termal stabilitede iyileşme gözlemlenmiştir. Özellikle havuç posasından elde edilen selülozik malzemelerin, ambalaj filmlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirme potansiyeline olduğu vurgulanmıştır (Sogut & Cakmak, 2020).

Hussain ve Rafiq (2012), havuç lifi takviyeli epoksi kompozitlerinde lif boyutunun darbe dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma sonuçları, iri boyutlu lifler içeren kompozitlerin daha yüksek darbe dayanımı sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, artan lif içeriğiyle sertlik değerlerinin yükseldiği, ancak Young modülünün azaldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, havuç lifi-epoksi kompozitlerinin daha yüksek enerji emilimi ve deformasyon kapasitesi gerektiren uygulamalarda avantaj sağlayabileceğini göstermektedir (Hussain & Rafiq, 2012).

Ersus vd. (2020), meyve suyu işleme atıklarının biyokompozit ambalaj malzemeleri geliştirilmesinde önemli bir kaynak potansiyeli taşıdığını belirtmiştir. Benzer şekilde, Chhoden vd. (2024), siyah havuç posası ekstraktıyla zenginleştirilmiş hidroksimetil selüloz (HMC) ve gliserol katkılı mısır nişastası filmlerini araştırmıştır. Bu biyo-fonksiyonel yenilebilir filmlerin, kontrol grubuna kıyasla daha iyi fiziksel, mekanik ve termal özellikler sergilediği raporlanmıştır. Ayrıca yüksek fitokimyasal içerik sayesinde antioksidan kapasitesini koruduğu ve etkili bariyer özellikler gösterdiği sonucuna varılmıştır (Chhodden vd., 2024).

PLA'nın saf hali, hızlı yanma davranışı ve yoğun damla oluşumu gibi dezavantajlara sahiptir. Yanma sırasında oluşan bu damlalar, ikincil yaralanma riskini artırabilir (Han vd., 2022). Bu nedenle PLA'nın yangın güvenliği gerektiren uygulamalarda kullanımını yaygınlaştırmak için alev geciktirici özelliklerinin iyileştirilmesi kritik önem taşımaktadır. Bu amaçla, PLA matrisine çeşitli alev geciktirici katkılar eklenmekte olup, bunlardan biri de Türkiye'de bol rezervlere sahip huntit-hidromanyezit (HH) mineral karışımıdır (Alaybeyoğlu vd., 2022). Huntit, karbonatlar sınıfında yer alan ve kimyasal formülü $CaMg_3(CO_3)_4$ olan bir kalsiyum magnezyum karbonat bileşiğidir. Hidromanyezit ise sulu bir magnezyum karbonat minerali olup kimyasal formülü $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2.4H_2O$ şeklindedir. Her iki mineral de dolomit grubunda sınıflandırılır (Zakut, 2012; Türk vd., 2023). HH karışımı, çevre dostu ve ekolojik özellikleriyle öne çıkar. Nano-kil ve fosfor esaslı alev geciktiricilere kıyasla kimyasal işlem gerektirmemesi, düşük maliyetli olması ve kolay temin edilebilirliği, bu minerali avantajlı kılan faktörlerdir. Ayrıca düşük duman emisyonu, azaltılmış yanma eğilimi, geri dönüştürülebilirlik, halojen ve asit gazı içermemesi, korozif etki göstermemesi ve doğal beyaz renk özelliği gibi teknik üstünlükler sunmaktadır (Camlibel vd., 2019).

HH karışımının termal bozunması, iki farklı sıcaklık aralığında endotermik olarak gerçekleşir: Huntit 400–850 °C, Hidromanyezit ise 220–550 °C aralığında ayrışır. Bu süreçte su ve CO_2 açığa çıkması, ortam sıcaklığın düşmesine ve yanıcı gazların seyreltilmesine neden olarak alevin yayılmasını engeller. Ardından gerçekleşen karbonizasyon (kömürleşme), polimer yüzeyinde koruyucu bir katman oluşturarak ısı ve alev transferini minimize eder. Aynı zamanda bu katman, duman yoğunluğunun absorpsiyon yoluyla azalmasına katkı sağlar (Camlibel vd., 2019; Çamlıbel & Koç, 2021). Ancak; HH'nin etkin bir alev geciktirici performans sergilemesi için yüksek konsantrasyonlarda kullanılması gerekmekte, bu durum ise kompozitlerin mekanik dayanımında bozulmaya yol açabilmektedir (Han vd., 2022).

Akan (2013), PET polimerinin mekanik özelliklerini korurken alev geciktirici performansını artırmak amacıyla nano-çinko borat ve huntit-hidromagnezit (HH) katkılarını incelemiştir. Çalışma sonuçları, %2 HH ve %10 çinko fosfinat içeren PET kompozitinin hem etkili alev geciktirici özellik sergilediğini hem de kopma uzama değerinin saf PET'ten %X daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur (Akan, 2013).

Camlibel vd. (2019), HH katkılı poliakrilat esaslı bir polimer macunla kaplanan pamuklu kumaşların fonksiyonel performansını analiz etmiştir. %5 ağırlıkça HH içeren numunelerde; alev geciktirici,

antibakteriyel, UV koruma ve mekanik dayanım özelliklerinde belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir. Bu çalışma, HH'nin tekstil endüstrisinde çok yönlü bir katkı maddesi olarak potansiyelini vurgulamaktadır (Camlibel vd., 2019).

Bu çalışmanın amacı, otomotiv, ambalaj, inşaat, biyomedikal ve spor sektörlerinde kullanıma uygun hafif, çevre dostu ve yüksek performanslı PLA-esaslı biyokompozitlerin ekstrüzyon ve sıcak izostatik presleme yöntemleriyle üretilmesidir. Bu kapsamda, PLA/GNP/KH ve PLA/GNP/KH/HH biyokompozitleri geliştirilerek; morfolojik, fiziksel, mekanik, termal ve alev geciktirici özellikleri kapsamlı bir şekilde karakterize edilecektir. Ayrıca, literatürde kara havuç (KH) kullanımına yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunması nedeniyle bu araştırma, hem araştırma boşluğunu doldurmayı hem de sürdürülebilir malzeme teknolojilerine yenilikçi bir katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2. Materyal ve metot
2. Material and method

2.1. Materyal
2.1. Material

Bu çalışmada, granül formunda PLA (Luminy™ LX 175 Total Corbion, Hollanda) kullanılmıştır. PLA'nın yoğunluğu 1,24 g/cm^3, erime akış indeksi ise 6 g/10 dk (210 °C'de 2,16 kg yük altında, ISO 1133 standardına uygun) olarak belirlenmiştir. Kara havuç numuneleri Konya'nın Ereğli ilçesindeki yerel bir pazardan temin edilmiş ve öğütme işlemi sonrası 250-300 µm partikül boyutuna sahip toz haline getirilmiştir. Grafen nanoparçacıklar (GNP), Nanografi™ Nano Teknoloji A.Ş. (Türkiye) tarafından sağlanmış olup; %99,9 saflık, 1,5 µm çap, 3 nm kalınlık ve 800 m^2/g özgül yüzey alanı özelliklerine sahiptir. HH mineralleri ise Mikrolite™ Mineral San. ve Tic. A.Ş. (Aydın, Türkiye) tarafından temin edilmiştir. HH, toksik olmayan, çevreye uyumlu ve yüksek alev geciktirici performans sergileyen bir mineraldir. Ayrıca Türkiye'de geniş rezervleri bulunması, endüstriyel kullanımını ekonomik açıdan avantajlı kılmaktadır.

2.2. Metot
2.2. Method

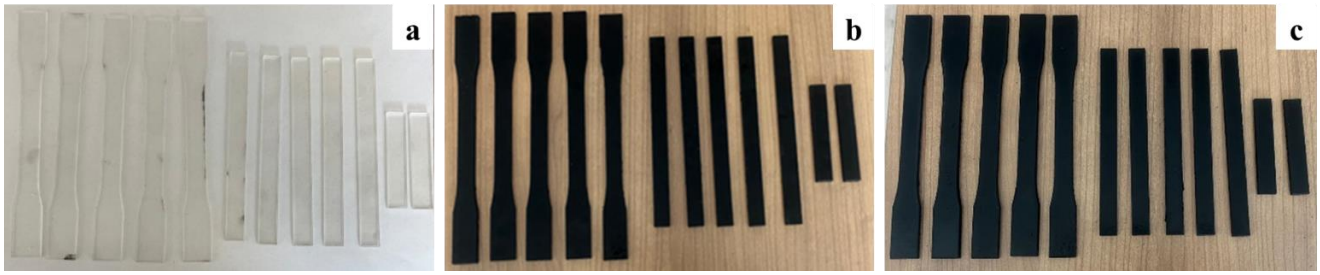
2.2.1. Deneysel Yöntem
2.2.1. Experimental procedure

PLA granülleri ve kara havuç tozu 60 °C'de sabit tartım ağırlığa gelinceye kadar etüvde bekletilerek içerisindeki nem uzaklaştırılıp biyokompozit malzeme üretimi için hazır hale getirilmiştir. Sonrasında hazırlanan PLA granülleri, kara havuç, grafen, huntit-hidromanyezit terazide tartılarak reçete içerik oranlarına göre konularak karıştırılmıştır.

Hazırlanan biyokompozitler, PLA'nın erime noktası referans alınarak laboratuvar ölçekli 16 mm çift vidalı bir ekstrüderde (Gülnar™ Makine A.Ş., Türkiye) ortalama 35 rpm hızında ve 140-180 ºC işleme sıcaklığında ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Ekstrüzyona başlamadan önce, bileşenler kuru halde belirlenen oranlarda karıştırılarak biyokompozit karışımları hazırlanmış ve ardından besleme hunisi yardımıyla ekstrüder kovanına beslenmiştir. Ekstrüderden çıkan biyokompozitler sırasıyla peletlenmiş, soğutulmuş ve granül haline getirilmiştir. Granüller, 60 ºC sıcaklıktaki etüv fırında değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletildikten sonra, sıcak pres (Carver™ A.Ş., ABD) kullanılarak 180 °C'de 0,24 MPa basınç altında 5 dakika süreyle kalıplanmıştır.

Şekil 1. Biyokompozit levhaların hazırlık, basım ve test süreçlerine ait görseller **a.** Öğütme **b.** Eleme **c.** Eleme sonucu hammadde **d.** Kurutma **e.** Ekstrüder **f.** Sıcak pres **g.** Kalıplama **h.** Levha **ı.** Test
Figure 1. *Images of the preparation, printing and testing processes of biocomposite boards* ***a.*** *Grinding* ***b.*** *Screening* ***c.*** *Raw material resulting from screening* ***d.*** *Drying* ***e.*** *Extruder* ***f.*** *Hot press* ***g.*** *Molding* ***h.*** *Sheet* ***ı.*** *Testing*

Şekil 1'de biyokompozit levhaların hazırlık aşaması, basım aşaması ve test süreçlerine ait görseller Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Üretilen biyokompozitlerin görüntüsü **a.** PLA **b.** PLA/GNP/10KH **c.** PLA/GNP/10KH/5HH
Figure 2. *Image of produced biocomposites* ***a.*** *PLA* ***b.*** *PLA/GNP/10KH* ***c.*** *PLA/GNP/10KH/5HH*

Elde edilen biyokompozit levhalar, yapılacak testler için lazer kesim cihazı (Taşlazer^{TM} Makine, Türkiye) kullanılarak boyutlandırılmıştır (Şekil 2).

Hazırlanan biyokompozit karışımlar ve deneysel kodlar Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Üretilen PLA esaslı biyokompozitlerin bileşim oranları ve deneysel kodlar
Table 1. *Composition ratios and experimental codes of the produced PLA-based biocomposites*

Numune	PLA (% ağ.)	Grafen Nanoplatelet (% ağ.)	Kara Havuç (% ağ.)	Huntit-Hidromanyezit (%50-%50 ağ.)
PLA	100	-	-	-
PLA/GNP/10KH	88	2	10	-
PLA/GNP/10KH/5HH	83	2	10	5

2.2.2. Karakterizasyon
2.2.2. Characterization

Biyokompozit numunelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için 65×13×3 mm boyutlarındaki numuneler kullanılmıştır. Su alma testi ASTM D570 (2022) standardına göre yapılmıştır. Numunelerin su emme oranları (SEO), distile suya daldırılmadan önce ve sonra tartılarak, Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$SAO = \frac{W_r - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

Denklemde; w_0 biyokompozit numunenin kuru ağırlığını ve w_r ise biyokompozit numunenin rutubetli ağırlığını ifade etmektedir.

Yoğunluk testi ASTM D792 (2020) standardına göre yapılmıştır. Biyokompozit numunelerin kuru ağırlıkları hassas terazide tartıldıktan sonra, numune boyutları kumpasla ölçülerek hacimleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler kullanılarak, Denklem 2 ile yoğunluk (d) değerleri de hesaplanmıştır.

$$d = \frac{m}{v} \quad (2)$$

Denklemde; m (g) kütleyi ve v (cm^3) hacmi ifade etmektedir. Her numune için üç adet ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak yoğunluk sonuçları elde edilmiştir.

Biyokompozit numunelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla, evrensel bir test cihazı (Shimadzu™, Japonya) kullanılarak çekme testi ve üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme testi, ASTM D638 (2014) standardına göre 5 mm/dk test hızında yapılmıştır. Üç nokta eğilme testi, ASTM D790 (2017) standardına uygun olarak 2 mm/dk test hızında gerçekleştirilmiştir. Charpy darbe testi ise ISO 179-1 (2010) standardına göre 5J çekiç (Instron™ Ceast 9050, ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Biyokompozitlerin yüzey morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu (Carl Zeiss™ Gemini 300, Almanya) kullanılarak 5.00 kV hızlanma voltajında incelenmiştir. Numuneler morfolojik inceleme öncesinde elektrik iletkenliğini artırmak için altın-paladyum (Au-Pd) karışımı ile kaplanmıştır (Ermeydan vd., 2024).

PLA ile bileşenler arasında oluşturulan kimyasal bağların ve etkileşimlerin türlerini tanımlamak için Fourier dönüşüm kızılötesi (FTIR) spektrometresi kullanılmıştır. Numuneler, FTIR spektrometresi (Bruker™ Tensor 37, ABD) ile 4000-400 cm^{-1} dalga sayısında ve 4 cm^{-1} spektral çözünürlükle analiz edilmiştir.

Termogravimetrik analiz (TGA), biyokompozit numunelerin bozunma davranışını ve kalıntı miktarını sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, 3-9 mg aralığındaki numuneler kullanılarak 30 ºC'den 800 ºC'ye kadar 200 ml/dk azot atmosferinde ve 10 °C/dk ısıtma hızıyla termogravimetrik analiz cihazı (Hitachi™ Hi-Tech STA7200, Japonya) ile yapılmıştır (Angin vd., 2023).

Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ölçümleri, ASTM D3418 standardına göre 20-200 °C sıcaklık aralığında 10 °C/dk ısıtma hızında, nitrojen atmosferinde gerçekleştirilmiştir (TA™ Discovery 250 series, ABD). Analiz sonucunda, PLA ve biyokompozit numunelerin erime sıcaklığı (T_m), camsı geçiş sıcaklığı (T_g)

ve kristalleşme sıcaklığı (T_c) değerleri belirlenmiş ve kristallik derecesi (X_c) Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır (Angin vd., 2023).

$$\boldsymbol{Xc}\ (\%) = \frac{\boldsymbol{\Delta H_m - \Delta H_c}}{\boldsymbol{W_{PLA} \times \Delta H_{PLA}}} \times \mathbf{100} \quad (3)$$

Denklemde; ΔH_m (J/g cinsinden) erime entalpisini, ΔH_c (J/g cinsinden) kristalizasyon entalpisini, W_{PLA}, biyokompozitteki PLA'nın ağırlık fraksiyonunu, ΔH_{PLA} ise %100 kristalli PLA'nın teorik erime entalpisini ifade etmektedir. ΔH_{PLA} PLA için 93,0 J/g'dır.

Isıl sapma sıcaklığı (HDT) analizi, biyokompozit numunelerin ısıl sapma sıcaklığını belirlemek amacıyla, ASTM D648-18 (2018) standardına göre 120 °C/saat akış hızı ve 0,46 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir (Instron Ceast HV3).

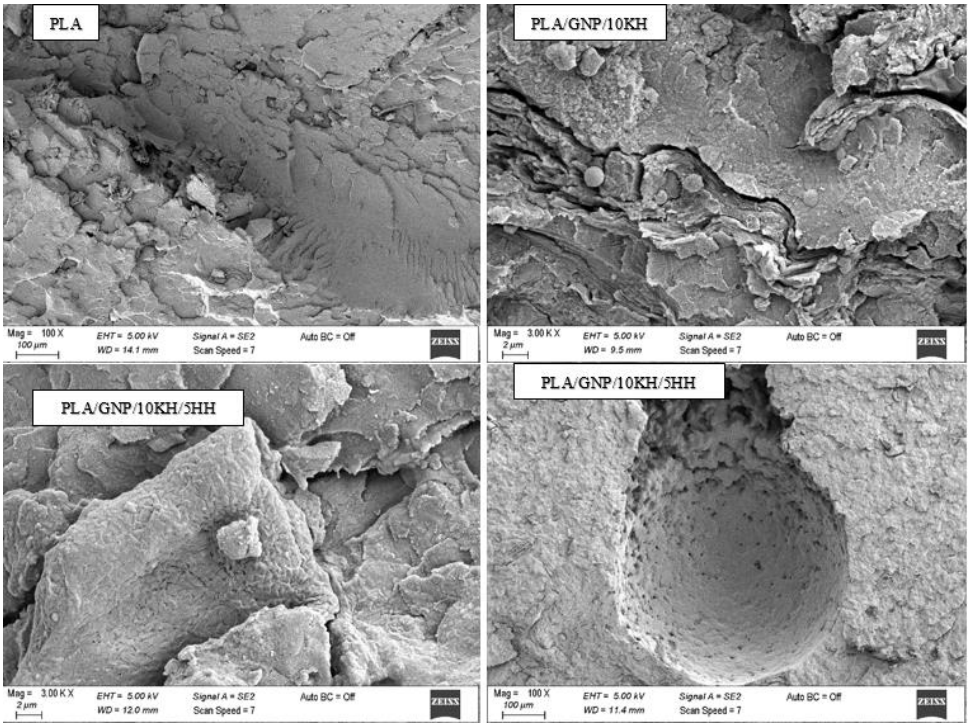
Huntit-hidromanyezit minerallerinin polimer matrisin yanma davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, UL-94 V testi gerçekleştirilmiştir. Bu test, UL-94 V (2014) standardına göre 127×12,7×3 mm boyutlarındaki test çubukları üzerinde yapılmıştır.

3. Bulgular ve tartışma
3. Result and discussion

3.1. Mikroyapısal ve mekanik özelliklerin karakterizasyonu
3.1. Characterization of microstructural and mechanical properties

3.1.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)
3.1.1. Scanning electron microscope (SEM)

Saf PLA, ağ. %10 KH içeren PLA/GNP/KH biyokompoziti ve ağ. %5 HH içeren PLA/GNP/KH/HH biyokompozitine ait SEM görüntüleri Şekil 3'te gösterilmektedir. KH'un küresel bir morfolojiye sahip olduğu, PLA matrisi ile zayıf bir yapışma sergilediği ve bu nedenle yüzeyde kalarak homojen dağılmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, topaklanmaların oluştuğu, deforme olmuş parçacıkların ortaya çıktığı, kırılma yüzeyinde çatlakların bulunduğu ve boşluklar gibi iç kusurların varlığının açıkça görüldüğü tespit edilmiştir (Sucheta vd., 2020; Sarıoğlu & Dirim, 2023; Chhodden vd., 2024; Ermeydan vd., 2024; Miller vd., 2024).

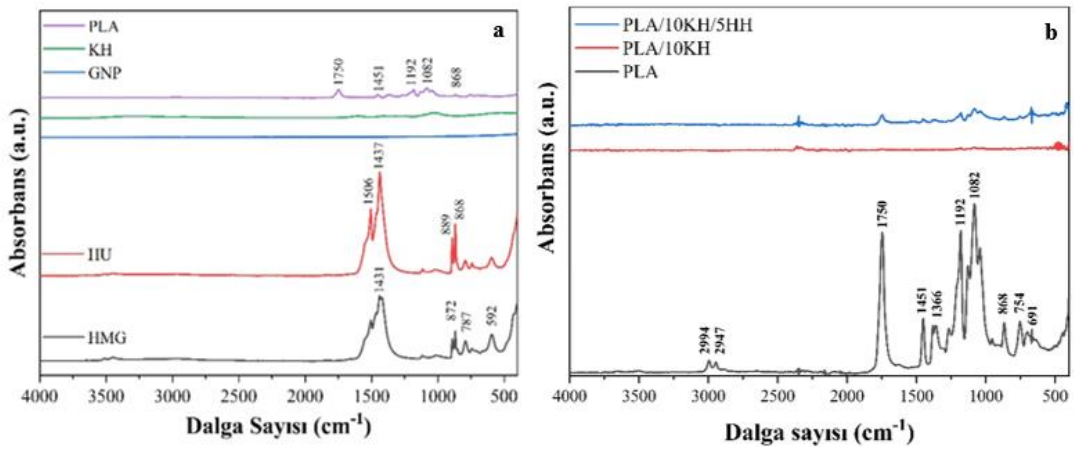


Şekil 3. PLA esaslı biyokompozitlere ait SEM görüntüleri
Figure 3. *SEM images of PLA-based biocomposites*

PLA/GNP/KH/HH biyokompozitlerinin incelenmesi sonucunda, HH parçacıklarının matris içinde homojen bir dağılım sağlayamadığı ve kaba, düzensiz bir yapı sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durumun temel nedeni, HH parçacıklarının boyutunun 5 µm üzerinde olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca hem KH ve hem de HH parçacıklarının kompozit matrisle tam uyum sağlayamadığı ve yüzeyde bağımsız birer faz olarak belirginleştiği tespit edilmiştir. Bu durum, KH ve HH ile matris arasındaki yapışma etkinliğinin yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, PLA/GNP/KH/HH biyokompozitinde; topaklanmalar, deforme parçacıklar, artan sayı ve boyutta boşluklar ile kırılma yüzeylerinde çatlaklar gibi mikro yapısal kusurlar açıkça tanımlanmıştır. Elde edilen bu morfolojik bulgular, biyokompozitlerin mekanik özelliklerindeki düşüsü destekler niteliktedir (Hollingbery & Hull, 2010; Atay & Çelik, 2013; Seki vd., 2013; Dike, 2020; Ermeydan vd., 2024).

3.1.2. FTIR Analizi
3.1.2. FTIR Analysis

Hammaddelerin ve biyokompozitlerin fonksiyonel gruplarını karakterize eden FTIR spektrumları Şekil 4'te verilmiştir. Saf PLA'nın FTIR spektrumunda 2994-2947 cm^{-1} (CH_3 gerilme titreşimleri), 1750 cm^{-1} (C=O, karbonil grubu), 1192 cm^{-1} (C-O gerilme titreşimleri), 1082 cm^{-1} (O=C−O) ve 868-754 cm^{-1} (kristal ve amorf fazlara ait pikler) gözlemlenmiştir. KH spektrumunda ise 3273 cm^{-1} (O-H germe bandı), 2920 cm^{-1} (CH, CH_2 ve CH_3 gruplarının –CH gerilme titreşimleri), 1733 cm^{-1} (hemiselüloz ve lignindeki ksilen, karbonil ve asetil gruplarının C=O gerilme titreşimleri), 1599 cm^{-1} (suya bağlı O-H bükülme titreşimleri), 1236 cm^{-1} (lignin varlığını gösteren C-O-C esneme) karakteristik bantlar tespit edilmiştir. Bu bulgular, KH posasında hemiselüloz ve lignin bileşenlerinin varlığını doğrulamaktadır.



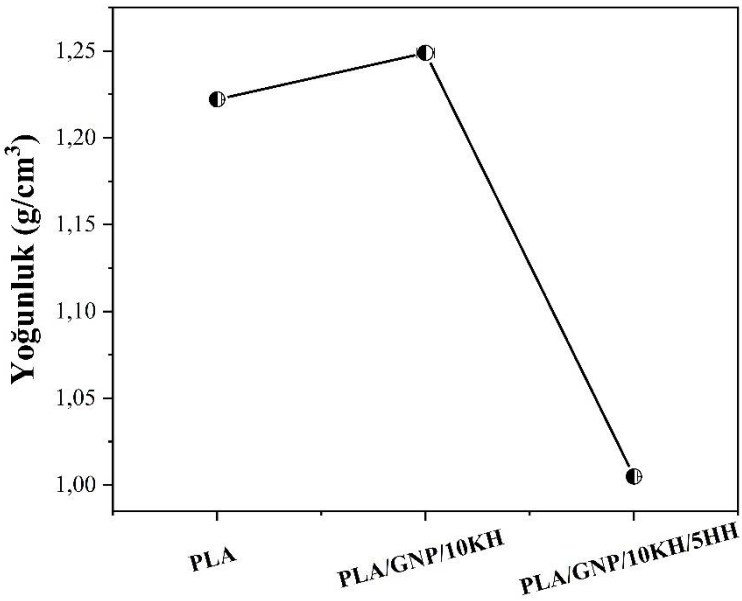
Şekil 4. PLA, katkı maddeleri (**a**) ve PLA esaslı (**b**) biyokompozitlerin FTIR analizleri
Figure 4. *FTIR analyses of PLA, additives (**a**) and PLA-based (**b**) biocomposites*

Grafene ait FTIR spektrumu incelendiğinde, grafenin düzlemsel bir yapıya sahip olduğu ve bunun, tek atom kalınlığındaki grafit tabakasından oluşan bir kristal yapıdan kaynaklandığı görülmüştür. Huntite ait FTIR spektrumunda 1506-1437 cm^{-1} aralığında (kalsiyum karbonat gerilme titreşimleri) ve 889-868 cm^{-1}'de (magnezyum karbonat gerilme titreşimleri) belirgin pikler gözlemlenmiştir. Hidromanyezite ait FTIR spektrumunda ise 1431 cm^{-1}'de (karbonat ve bikarbonat iyon bağlarının asimetrik gerilme titreşimleri) ile 872, 787 ve 592 cm^{-1}'de (karbonat iyonunun simetrik gerilme titreşimleri) bölgelerinde pikler tespit edilmiştir. FTIR sonuçlarının literatürle ile uyumlu olduğu belirlenmiştir (Auras vd., 2004; Kangal & Güney, 2006; Atay & Çelik, 2010; Han vd., 2011; Şen vd., 2014; Tucureanu vd., 2016; Kuenzel vd., 2018; Sucheta vd., 2020; Hayatioğlu vd., 2024).

Biyokompozit numunelerin FTIR spektrumları incelendiğinde, yeni bir pik oluşumu veya piklerde kayma gözlemlenmemiştir. Ancak KH ilavesi sonrasında 2994-2947, 1750, 1451, 1366, 1192, 1082, 868, 754, 691 cm^{-1} bantlarındaki pik yoğunluklarının azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, KH'un yapısında meydana gelen kısmi bozunmadan kaynaklandığı düşünülmektedir (Kumarage vd., 2023; Merino vd., 2024). HH ilavesi sonrasında ise pik yoğunluklarında hafif bir artış gözlemlenmiştir. 1750, 1451 cm^{-1} bantlarının HH'in CO_3^{-2} asimetrik bantlarına, 1192, 1082, 868, 754 cm^{-1} bölgelerindeki düşük yoğunluklu piklerin ise karbonat ligandlarına karşılık geldiği düşünülmektedir (Camlibel vd., 2019).

3.1.3. Yoğunluk
3.1.3. Density

PLA ve biyokompozitlerin ölçülen yoğunlukları Şekil 5'te gösterilmektedir. Saf PLA numunesinin yoğunluğu 1,22 g/cm^3 olarak belirlenmiş olup, bu değer literatürde rapor edilen verilerle uyumludur. Yapılan araştırmalara göre, havuç liflerinin yoğunluğunun yaklaşık 1,5 g/cm^3 olduğu belirlenmiştir. Kara havuç parçacıklarının PLA matrisine kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olması nedeniyle, biyokompozitin yoğunluk değerinde %1,6'lık bir artış gözlemlenmiş ve yoğunluk 1,24 gr/cm^3 olarak ölçülmüştür (Hussain & Rafiq, 2012; Encalada vd., 2016; Siquera vd., 2016).

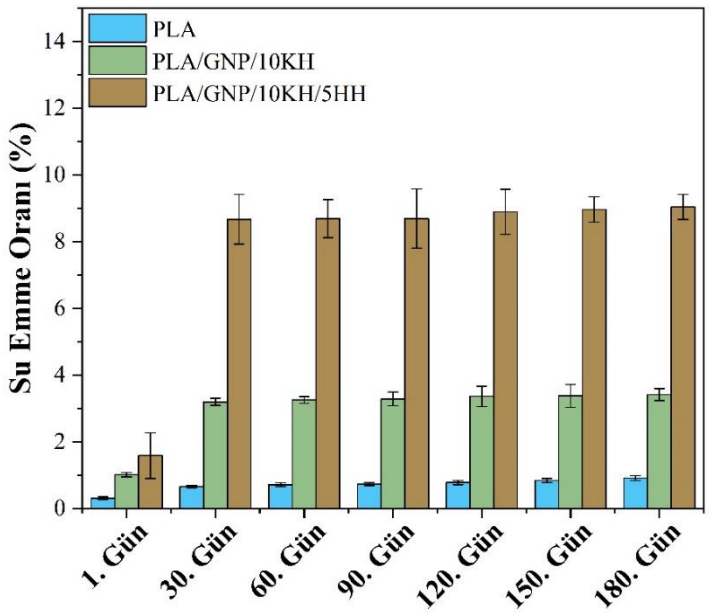


Şekil 5. PLA esaslı biyokompozitlerin yoğunlukları
Figure 5. *Densities of PLA-based biocomposites*

HH minerallerinin yoğunluğunun yaklaşık 2,70 gr/cm^3 olması sebebiyle, PLA/GNP/KH kompozitine ağ. %5 HH ilavesiyle yoğunluk değerinde bir artış beklenirken, tersine %17 oranında azalarak 1,03 gr/cm^3 seviyesine düştüğü belirlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, yoğunluğun azalmasının büyük gözeneklerin varlığı ve miktarındaki artışla ilişkili olduğu düşünülmektedir (Zakut, 2012).

3.1.4. Su emme oranı
3.1.4. Water absorption rate

PLA ve biyokompozitlerin su emme oranları Şekil 6'da gösterilmektedir. Saf PLA, hidrofobik yapısı nedeniyle düşük su emme kapasitesi sergilemiş ve 180. günde %1 su emme değeri kaydedilmiştir. Bu düşük su emme oranı, PLA'nın hidrofobik doğasına atfedilebilir. Bu durum, PLA'nın polar olmayan kimyasal yapısının su ile etkileşimi sınırlandırmasıyla açıklanabilir. KH ilavesiyle su emme oranında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Bu artış, lignoselülozik yapıdaki selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi hidrofilik bileşenlerin nem çekme eğilimden kaynaklanmaktadır. HH katkılı biyokompozitler ise en yüksek su emme değerlerine ulaşmıştır. Bu davranış, Fick'in tek fazlı difüzyon modeli ile uyumlu olup suyun polimer matris içindeki difüzyonel penetrasyonunu yansıtmaktadır (Dike, 2020). Ayrıca, malzeme yapısındaki gözenekliliğin artmasının da su emme kapasitesini olumlu yönde etkilediği öngörülmektedir.



Şekil 6. PLA esaslı biyokompozitlerin su emme oranları
Figure 6. *Water absorption rates of PLA-based biocomposites*

Saf PLA numunesi, 6 ay sonunda %0,91 su emme seviyesine ulaşırken, PLA/GNP/KH biyokompoziti %3,41 seviyesine, PLA/GNP/KH/HH biyokompoziti ise %9,04'e yükselmiştir (Ersus vd., 2020; Santos vd., 2020; Begum vd., 2021; Benaniba vd., 2023; Crupi vd., 2023; Hayatioğlu vd., 2024; Merino vd., 2024). Su emme miktarı, üretim yöntemi ve kompozit koşulları (örneğin, gazların varlığı), gözenek yapısı, dolgu parçacıklarının şekli ve boyutu gibi faktörlerden etkilenmektedir. Özellikle, dolgu parçacıklarının polimer yüzeyine kusurlu şekilde yerleşmesi, kompozitte oluşan gözeneklerin miktarını artırarak emilen su miktarının yükselmesine neden olabilir. ASTM D792-20 (2020) standardına göre, yoğunluk, gözeneklilik ve su emme özellikleri birbiriyle ilişkilidir ve bu durum mekanik özellikler üzerinde değişikliklere yol açabilir. Örneğin, yüksek gözenekliliğin çekme mukavemetini azalttığı bilinmektedir (Santos vd., 2020).

3.1.5. Mekanik özellikler
3.1.5. Mechanical properties

Saf PLA ve PLA biyokompozitlerin mekanik özelliklerindeki değişimler Tablo 2'de sunulmuştur. Ağırlıkça düşük oranlarda GNP eklenmesi, biyokompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirirken, daha yüksek oranlarda ise topaklanma oluşumu nedeniyle mekanik özelliklerde azalma gözlemlenmiştir (Santo vd., 2021). KH ilavesinin, PLA/GNP/KH biyokompozitinin çekme mukavemetini önemli ölçüde düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu düşüş, dolgu maddesi ile matris arasındaki aglomerasyon ve verimsiz bağlanmadan kaynaklanmaktadır. HH ilavesi, PLA/GNP/KH biyokompozitine kıyasla çekme mukavemeti, tokluk ve kopma uzama yüzdesinde azalmaya yol açmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda, mineral esaslı alev geciktirici dolgular içeren polimerlerde de benzer eğilimler rapor edilmiştir (Savaş vd., 2018). Çekme mukavemetindeki bu azalma, HH parçacıkları çevresinde çatlakları başlatan gerilim yoğunlaşmalarına bağlanmaktadır. Ayrıca HH'in topaklanma eğiliminden dolayı, biyokompozitlerin yük taşıma kapasitesinin azaldığı düşünülmektedir. Bu topaklanmalar, gerilim yoğunlaşma merkezleri olarak işlev görerek HH parçacıkları etrafında çatlak oluşumunu tetiklemektedir (Erdem & Doğan, 2020).

PLA/GNP/KH biyokompozitinin gerilme modülü ve kopma uzaması, saf PLA'ya kıyasla sırasıyla %32,5 ve %70,8 oranında azalmıştır. Kopma uzamasındaki bu düşüş, dolgu maddesinin polimer/dolgu arayüzünde gerilme yoğunlaşmasına neden olması ve malzemenin daha kırılgan hale gelmesiyle açıklanabilir (Seki vd., 2013; Righetti vd., 2019b; Kumar & Saha, 2024; Miller vd., 2024). PLA/GNP biyokompozitinde kara havucun aşırı miktarda eklenmesi (%10), PLA ile takviye elemanı arasında kümeleşmeye yol açarak gerilme konsantrasyon faktörünü artırmakta ve bu da eğilme özelliklerinde azalmaya neden olmaktadır. Maksimum eğilme modülü, PLA/GNP/KH/HH biyokompozitinde 12699,6 MPa olarak ölçülmüştür (Kumar & Saha, 2024).

Saf PLA'nın darbe dayanımı 9,27 kJ/m^2 olarak belirlenmiştir. Matris ve fiber arasındaki arayüzey bağlanma kuvvetinin, PLA biyokompozitlerinin darbe dayanımını doğrudan etkilediği bilinmektedir (Sun vd., 2017). Takviye elemanlarının matris içinde homojen dağılmaması ve arayüzey bağlarının zayıf olması nedeniyle, PLA/GNP/KH biyokompozitinin darbe dayanımı düşüş göstermiştir (Husssain & Rafiq, 2012; Güler, 2017). HH ilavesi, PLA/GNP/KH biyokompozitinin darbe dayanımında %14 oranında bir azalmaya yol açmıştır. Kırılma başlangıcı ve çatlak yayılımı, çentiksiz numunelerdeki parçacık dolgulu polimerlerde temel enerji dağıtım mekanizmalarıdır. HH parçacıkları, gerilme yoğunlaşma merkezleri olarak işlev görerek çatlak oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Seki vd., 2013; Erdem & Doğan, 2020).

Tablo 2. PLA esaslı biyokompozitlerin mekanik özellikleri
Table 2. *Mechanical properties of PLA-based biocomposites*

Materyal	Çekme Direnci (MPa)	Çekme Elastikiyet Modülü (MPa)	Kopmada Uzama Miktarı (%)	Eğilme Direnci (MPa)	Eğilme Elastikiyet Modülü (MPa)	Darbe Direnci (kJ/m^2)
PLA	33,9	1440,6	2,4	70,4	10321,9	9,27
PLA/GNP/10KH	7,1	971,9	0,7	19,4	9780,6	1,99
PLA/GNP/10KH/5HH	3,8	763,7	0,5	10,2	12699,6	1,71

3.2. Termal ve alev geciktirici özelliklerin karakterizasyonu
3.2. Characterization of thermal and flame retardant properties

3.2.1. TGA analizi
3.2.1. TGA analysis

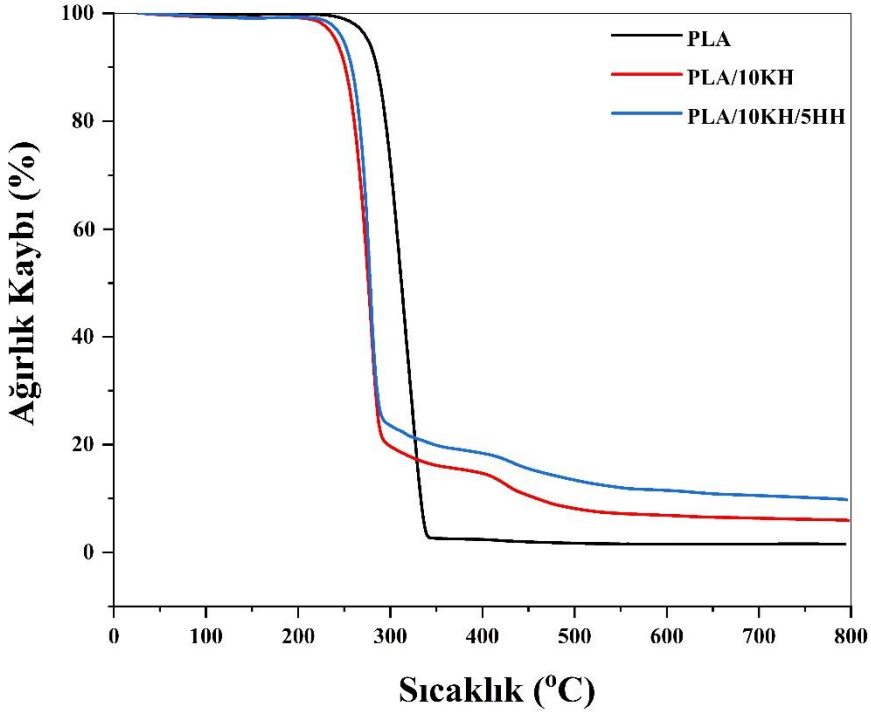
Biyokompozitlerin TGA grafiği ve sonuçları Tablo 3 ve Şekil 7'de özetlenmiştir. $T_{\%5}$, $T_{\%10}$ ve T_{max} sırasıyla numunelerdeki %5 ve %10'luk kütle kayıplarının gerçekleştiği bozunma sıcaklıklarını ve en yüksek termal bozunmanın gerçekleştiği sıcaklığı ifade etmektedir. TGA sonuçları, PLA'nın 276 °C'de %5'lik bir kütle kaybına uğradığını, 285,6 °C'de %10'luk bir bozunmanın meydana geldiğini ve 315,3 °C'de tam bozunduğunu göstermiştir. 800 °C'deki nitrojen atmosferi altında kalan PLA miktarı ise %1,5 olarak belirlenmiştir. Benzer bir sonuç Kopinke vd. (1996) tarafından da rapor edilmiştir.

Tablo 3. PLA esaslı biyokompozitlerin TGA analiz sonuçları
Table 3. *TGA analysis results of PLA-based biocomposites*

Materyal	**$T_{\%5}$ (°C)**	**$T_{\%10}$ (°C)**	**T_{max} (°C)**	**Kalıntı (800°C)**
PLA	276	285,6	315,3	1,5
PLA/GNP/10KH	239,3	250,4	280,7	6
PLA/GNP/10KH/5HH	247,7	257,7	278,9	9,7

PLA/GNP kompozitine KH ilavesi ile $T_{\%5}$, $T_{\%10}$ ve T_{max} sıcaklıklarının belirgin şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Isıl dayanımdaki bu düşüş, lignoselülozik malzemenin termal bozunması sırasında ortaya çıkan serbest radikallere atfedilmektedir. Bu serbest radikaller, malzemenin termal bozunmasını hızlandırarak polimer matrisinin daha düşük sıcaklıklarda bozunmasına neden olmaktadır (Angin vd., 2023).

Öte yandan, PLA/GNP/KH kompozitine HH ilavesi ile $T_{\%5}$ ve $T_{\%10}$ sıcaklıklarının arttığı belirlenmiştir. Hidromanyezitin, PLA'nın ilk adım bozunma sıcaklığından daha düşük bir dehidrasyon sıcaklığına sahip olması nedeniyle termal stabilite değerlerinde bir azalma beklenirken, aksine bu değerlerde artış gözlemlenmiştir. Bu artışın, HH tarafından oluşturulan koruyucu inorganik tabakanın, PLA'dan açığa çıkan gazların bir kısmını engellemesi sonucu meydana geldiği düşünülmektedir (Atabek Savaş vd., 2016).



Şekil 7. PLA esaslı biyokompozitlerin TGA eğrileri
Figure 7. *TGA curves of PLA-based biocomposites*

Biyokompozit numuneler kalıntı miktarları açısından değerlendirildiğinde, KH ve HH ilavesiyle kalıntı miktarlarının da arttığı tespit edilmiştir. KH (%10) ilavesiyle PLA/GNP/ KH biyokompozitinin kalıntı miktarı %6'ya yükselmiştir. Bu artış, havuç liflerindeki kül ve ligninin varlığına atfedilebilir. Piroliz nedeniyle lignin, selülozdan daha fazla artık kömür üretmektedir. Ayrıca karbon içeren liflerin yüksek artık ağırlık göstermesi, külün yüksek sıcaklıklarda bozunmamasına neden olmaktadır. HH (%5) ilavesiyle PLA/GNP/KH/HH biyokompozitinin kalıntı miktarı ise %9,7'ye yükselmiştir. Bu artışın, hidromanyezitin ayrışması sonucu oluşan magnezyum oksit ile huntitin ayrışması sonucu oluşan kalsiyum oksit ve magnezyum oksite dayalı inorganik kalıntıya bağlı olduğu düşünülmektedir (Hollingbery & Hull, 2010; Atabek Savaş vd., 2016; Rajinipriya vd., 2018; Erdem & Doğan, 2020).

3.2.2. DSC Analizi
3.2.2. DSC Analysis

PLA ve biyokompozitlerin DSC sonuçlarının özeti Tablo 4'te sunulmuştur. Yarı kristalin bir polimer olan saf PLA'nın camsı geçiş sıcaklığı (T_g) 58,3 °C, kristalizasyon sıcaklığı (T_c) 118 °C, erime sıcaklığı (T_m) 149 °C ve kristalizasyon derecesi (X_c) % 9 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin literatürdeki verilerle uyumlu olduğu görülmektedir (Mortalo vd., 2023).

PLA/GNP kompozitine KH ve HH ilavesi ile genel olarak T_g noktalarında belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu durum, PLA moleküllerinin zincir hareketliliğinin artmasına atfedilmektedir (Angin vd., 2023). Öte yandan, PLA/GNP/KH örneğinde KH varlığının, erime tepe şiddetinde artışa neden olduğu görülmüştür. Bu artış, PLA'nın erime tepe yoğunluğuna kıyasla daha belirgindir. PLA/GNP/KH/HH numunesinde ise HH ilavesinin erimeye karşı bir bariyer oluşturduğu ve PLA'nın erime zirvesinin şiddetinin azaldığı gözlemlenmiştir (Faghihi Rezaei vd., 2022).

Hem saf PLA hem de biyokompozit numunelerinde, KH ilavesiyle ΔH_m ve ΔH_c değerlerinin arttığt tespit edilmiştir. Bu durum, KH'un yüzeyinde PLA kristallerinin heteronükleasyonu ve büyümesinin gerçekleşmesiyle açıklanabilir (Chen vd., 2008). Ancak, PLA/GNP/KH kompozitine HH ilavesi ile ΔH_m ve ΔH_c değerlerinde düşüş gözlemlenmiş olup, bu durum katkı maddelerinin matris üzerindeki seyreltici etkisine atfedilmektedir (Angin vd., 2023).

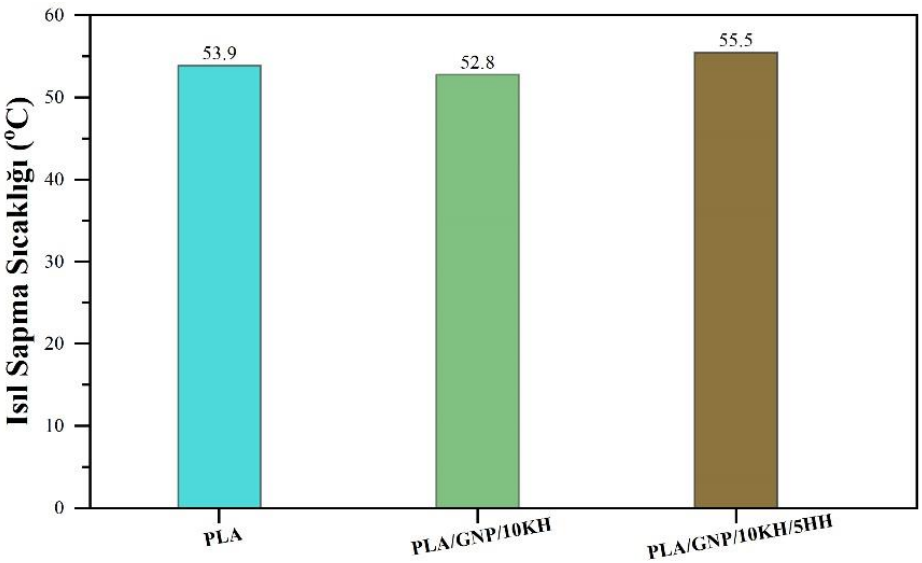
Saf PLA'nın kristalleşme sıcaklığı (T_c) 118 ºC belirlenmiştir. Biyokompozit karışıma KH ve HH ilavesiyle T_c değerinin kademeli olarak azaldığı tespit edilmiştir. Saf PLA'nın kristalleşme derecesi %9 ölçülürken, KH ilavesiyle üretilen biyokompozit numunesinde kristalleşme derecesinin arttığı görülmüştür. Benzer bir sonuç, Miller vd. (2024) tarafından raporlanmış olup, 125–250 µm parçacık boyut aralığındaki patates kabuğu takviyeli PLA kompozitlerinde kristalleşme derecesinin saf PLA'ya kıyasla arttığı belirtilmiştir (Miller vd., 2024). PLA/GNP/KH/HH numunesinde ise HH ilavesiyle kristalleşme derecesindeki artış, HH minerallerinin kristalizasyon derece sürecini desteklediğini ve PLA'nın kristalleşme sürecini hızlandırarak kristal büyüme oranını iyileştiren etkili bir çekirdekleştirici olarak görev yaptığını düşündürmektedir (Şen vd., 2014; Macedo vd., 2015; Tawiah vd., 2019).

Tablo 4. PLA esaslı biyokompozitlerin DSC analiz sonuçları
Table 4. *DSC analysis results of PLA-based biocomposites*

Materyal	Erime			Kristalleşme		
	T_g (ºC)	T_m (ºC)	ΔH_m (J/g)	T_c (ºC)	ΔH_c (J/g)	X_c (%)
PLA	58,3	149	21	118	12	9
PLA/GNP/10KH	56,71	153,27	34,612	97,75	25	11,28
PLA/GNP/10KH/5HH	55,66	151,22	33,189	81,73	8,8761	31,50

T_g: Camsı geçiş sıcaklığı, T_m: erime sıcaklığı, ΔH_m: eriyik kristalizasyonu, T_c: kristalizasyon sıcaklığı, ΔH_c: soğuk kristalizasyonu, X_c: kristalizasyon derecesi

3.2.3. HDT analizi
3.2.3. HDT analysis



Şekil 8. PLA esaslı biyokompozitlerin HDT analiz sonuçları
Figure 8. *HDT analysis results of PLA-based biocomposites*

PLA ve biyokompozitlerin HDT analizi sonuçları Şekil 8'de gösterilmektedir. Isıtma ve sabit yükleme koşulları altında, saf PLA'nın ısıl sapma sıcaklığı 53,9 ºC olarak bulunmuştur. Benzer bir sonuç, Yaisun ve Trongsatitkul tarafından da rapor edilmiştir (Yaisun & Trongsatitkul, 2023). PLA'nın düşük ısıl sapma sıcaklığı, kısmen düşük kristalliğinden kaynaklanmaktadır. PLA/GNP kompozitine ağ. %10 KH ilavesiyle HDT değerinin 52,8 ºC'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Nyambo vd. (2011), PLA'ya tarımsal kalıntıların eklenmesinin etkisini incelemiş ve ağ. %30 elyaf yüklemesi durumunda bile HDT'de bir iyileşme olmadığını tespit etmiştir. Bunun sebebi, kristalinitede önemli bir değişiklik olmamasıdır. Öte yandan, PLA/GNP/KH

kompozitine HH minerallerinin ilavesiyle ısıl sapma sıcaklığı 55,5 ºC'ye yükselmiştir. Bu artışın, kristalizasyon derecesindeki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir (Nagarajan vd., 2015; Kahraman, 2022).

3.2.4. UL-94 V Yanma Testi
3.2.4. UL-94 V Burning Test

HH ilavesinin PLA esaslı biyokompozitlerin alev geciktirici etkinliğini değerlendirmek amacıyla, UL-94 V (2014) standardına uygun dikey yanma testi gerçekleştirilmiştir. Tablo 5'te, saf PLA ve HH katkılı biyokompozitlerin test sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Saf PLA, alevle temas sonrası yoğun damla oluşumu eşliğinde sürekli yanma davranışı sergilemiş ve herhangi bir alev geciktirici kategoriye (V-0, V-1, V-2) girmemiştir. Bu durum, PLA'nın doğal yanıcılığı ile tutarlıdır (Jing vd., 2016; Gong vd., 2020; Zhu vd., 2020). HH katkılı biyokompozitlerde ise alev geciktirici verimlilikte kısmi iyileşme gözlemlenmiş ancak PLA/GNP/KH/HH örneği, homojen olmayan dağılım nedeniyle test sırasında yoğun damlama ve sürekli yanma davranışı sergileyerek başarısız olmuştur. Bu sonuç, HH'nin etkisinin ancak optimal dispersiyon sağlandığında ortaya çıkabileceğini vurgulamaktadır (Akan, 2013; Camlibel vd., 2019).

Tablo 5. PLA esaslı biyokompozitlerin yanma testi sonuçları (UL-94 V)
Table 5. *Combustion test results of PLA-based biocomposites (UL-94 V)*

Materyal	Birinci ve İkinci Ateşlemeden Sonra Ortalama Alevlenme Süresi (s)	Damlama	Pamuk Tutuşması	UL-94 V Derecelendirme
PLA	YANDI	DAMLADI	EVET	BAŞARISIZ
PLA/GNP/10KH/5HH	YANDI	DAMLADI	EVET	BAŞARISIZ

4. Sonuçlar
4. Conclusions

Bu çalışma, grafen katkılı, huntit-hidromanyezit mineralleri ve kara havuç atık dolgu maddeleriyle güçlendirilmiş PLA esaslı yeşil kompozitlerin morfolojik, fiziksel, mekanik, termal ve alev geciktirici özellikleri üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. SEM mikrografları, kara havuç ve huntit-hidromanyezit minerallerinin matris içinde zayıf dağılım gösterdiğini ve matrisle uyumsuzluk sergilediğini ortaya koymuştur. Bu durum, sistemdeki kusurların artmasına ve daha yüksek gerilim konsantrasyonlarına yol açarak PLA biyokompozitlerin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiştir. FTIR spektroskopisi sonuçları, PLA/GNP/KH biyokompozitindeki pik yoğunluklarının azalmasının, kara havuçtaki lignin, pektin ve hemiselüloz gruplarının uzaklaştırıldığını doğrulamıştır. Ayrıca, PLA/GNP/KH/HH biyokompozitinin IR spektrumunda 1750 cm^{-1} ve 1451 cm^{-1} dalga sayılarında CO_3^{-2} asimetrik bantlarındaki artışı, huntit-hidromanyezit bileşiklerinin biyokompozit yapıda mevcut olduğunu kanıtlamıştır. TGA analizleri, KH'un düşük termal kararlılığı nedeniyle PLA/GNP/KH biyokompozitinin termal dayanımının azaldığını göstermiştir. Ancak, KH ilavesi kütle kayıp hızını yavaşlatmış ve kalıntı miktarını artırmıştır. HH ilavesiyle üretilen PLA/GNP/KH/HH biyokompozitinde ise $T_{\%5}$ ve $T_{\%10}$ sıcaklıkları, PLA/GNP/KH biyokompozitine kıyasla sırasıyla %3,5 ve %1,3 oranında artış göstermiştir. Ayrıca, HH katkısı nitrojen ortamında 800 ºC'de kalıntı miktarını da belirgin şekilde yükseltmiştir. DSC analizi sonuçlarına göre, KH ve HH ilavesiyle üretilen tüm PLA biyokompozitlerin kristalizasyon derecelerinde artış gözlenirken, kristalleşme sıcaklıkları (T_c) önemli ölçüde düşmüş (97,75 - 81,73 ºC) ve bu durum termal davranışı etkilemiştir. HDT analizinde, KH ilaveli PLA/GNP/KH biyokompozitinin ısısal deformasyon sıcaklığının azaldığı tespit edilmiştir. Buna karşılık, HH katkılı PLA/GNP/KH/HH biyokompozitin deformasyon sıcaklığı 55,5 ºC'ye yükselerek saf PLA'ya kıyasla yaklaşık %2,97'lik bir iyileşme sağlamıştır. Alev geciktirici özellikler incelendiğinde ise PLA/GNP/KH karışımına HH eklenmesiyle üretilen biyokompozitin homojen dağılım sağlanamadığı için herhangi bir standart derecelendirme kategorisine giremediği anlaşılmıştır.

Yazar katkısı
Author contribution

AS: Araştırma, Deney, Kaynaklar, Görselleştirme. ŞD: Deney tasarımı, Metodoloji, Yazma. MSF: Araştırma, Deney tasarımı, Analiz ve Yorumlama, Yazma.

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
Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Akan, M. (2013). Production of flame retardent polyester composites and fibers. Master of Science. Middle East Technical University, Polymer Science and Technology Department, Ankara 67 s.

Alaybeyoğlu, E., Duran, K., & Körlü, A. (2022). Flammability behaviours of knitted fabrics containing pla, cotton, lyocell, chitosan fibers. *Mugla Journal Science and Technology.* https://doi.org/10.22531/muglajsci.1109115

Angin, N., Ertas, M., Caylak, S., & Fidan, M.S. (2023). Thermal and electrical behaviors of activated carbon-filled PLA/PP hybrid biocomposites. *Sustainable Materials and Technologies, 37,* e00655. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00655

ASTM D570-22. (2022). *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*.

ASTM D792-20. (2020). *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*.

ASTM D638-14. (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*.

ASTM D790-17. (2017). *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*.

ASTM D648-18. (2018). *Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position.*

Atabek Savaş, L., Kaya Deniz, T., Tayfun, Ü., & Doğan, M. (2016). Effect of microcapsulated red phosphorus on flame retardant, thermal and mechanical properties of thermoplastic polyurethane composites filled with huntite&hydromagnesite mineral. *Polymer Degradation and Stability, 135(4).* https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.12.001

Atay, H.Y., & Çelik, E. (2010). Use of Turkish huntite/hydromagnesite mineral in plastic materials as a flame retardant. *Polymer Composites, 31(10),* 1692–1700. https://doi.org/10.1002/pc.20959

Atay, H.Y., & Çelik, E., (2013). Mechanical properties of flame-retardant huntite and hydromagnesite-reinforced polymer composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering, 52(2),* 182–188. https://doi.org/10.1080/03602559.2012.735310

Auras, R., Harte, B., & Selke, S. (2004). An overview of polylactides as packaging materials. *Macromolecular Bioscience, 4(9),* 835–864. https://doi.org/10.1002/mabi.200400043

Begum, H.A., Tanni, T.R. & Shahid, M.A. (2021). Analysis of water absorption of different natural fibers. *Journal of Textile Science and Technology, 7,* 152–160. https://doi.org/10.4236/jtst.2021.74013

Benaniba, S., Djendel, M., Kessal, O., Abderraouf, B. A., Boubaaya, R., Dridi, M., & Driss, Z. (2023). Evaluation of mechanical properties of biocomposites treated with date palm fiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 18,* 1–10.

Camlibel, N.O., Avinc, O., Arik, B., Yavas, A., & Yakin, I. (2019). The effects of huntite–hydromagnesite inclusion in acrylatebased polymer paste coating process on some textile functional performance properties of cotton fabric. *Cellulose, 26,* 1367–1381. https://doi.org/10.1007/s10570-018-1924-y

Chen, F., Liu, C.K., Cooke, P., Hicks, K.B., Zhang, J. (2008). Performance enhancement of poly (lactic acid) and sugar beet pulp composites by improving interfacial adhesion and penetration. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 47(22).* https://doi.org/10.1021/ie800930j

Chhoden, T., Aggarwal, P., Singh, A., & Kaur, S. (2024). Valorization of black carrot pomace for the development of anthocyanin rich bio functional edible films: implications on structural, morphological and thermal properties for a sustainable approach. *Journal of Food Measurement and Characterization.* https://doi.org/10.1007/s11694-024-02582-y

Chieng, B.W., Ibrahim, N.A., Yunus, W.M.Z.W., Hussein, M.Z., & Silverajah, V.S.G. (2012). Graphene nanoplatelets as novel reinforcement filler in poly(lactic acid)/epoxidized palm oil green nanocomposites: mechanical properties. *International Journal of Molecular Sciences, 13,* 10920-10934. https://doi.org/ 10.3390/ijms130910920

Crupi, V., Epasto, G., Napolitano, F., Palomba, G., Papa, I., & Russo, P. (2023). Green composites for maritime engineering. *Journal of Marine Science and Engineering, 11(3),* 599. https://doi.org/10.3390/jmse11030599

Çamlıbel, N. O., & Koç, E. (2021). flame retardant and antibacterial coating on cotton fabric by layer-by-layer assembly with huntite-hydromagnesite, ammonium polyphosphate, chitosan and aptes. *Tekstil ve Konfeksiyon, 32(2)*. https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.959838

Dike, A.S., (2020). Improvement of mechanical and physical performance of poly (lactic acid) biocomposites by application of surface silanization for huntite–hydromagnesite mineral. *Journal of Thermoplastic Composite Materials, 35(5),* 1–15. https://doi.org/10.1177/0892705720930776

Encalada, A. M.I., Basanta, M. F., Fissore, E. N., De'Nobili, M. D., & Rojas, A. M. (2016). Carrot fiber (CF) composite films for antioxidant preservation: Particle size effect. *Carbohydrate Polymers, 136,* 1041–1051.

Erdem, A., & Dogan, M. (2020). Production and characterization of green flame-retardant poly (lactic acid) composites. *Journal of Polymers and the Environment, 28,* 2837–2850. https://doi.org/10.1007/s10924-020-01817-5

Ermeydan, M.A., Aykanat, O., & Altın,Y. (2024). Preparation and characterization of hybrid PLA biocomposites reinforced by wood and silane treated basalt fibers or compatibilized by Maleicanhydride-Grafted Polypropylene (MAPP). *Polymer Composites, 1–14*. https://doi.org/10.1002/pc.28442

Ersus, S., Yalçın Melikoğlu, A., & Cesur, S. (2020). Production of biocomposite packaging materials from fruit juice processing wastes. *Journal of the Institute of Science and Technology, 10(1),* 250–259. https://doi.org/10.21597/jist.528965

Faghihi Rezaei, V., Khonakdar, H.A., Goodarzi, V., Darbemamieh, G., & Otadi, M. (2022). Hydroxyapatite/TPU/PLA nanocomposites: Morphological, dynamic-mechanical, and thermal study. *Green Processing and Synthesis, 11,* 996–1012. https://doi.org/10.1515/gps-2022-0087

Gao, Y., Picot, O.T., Bilotti, E., & Peijs, T. (2016). Influence of filler size on the properties of poly(lactic acid) (pla)/graphene nanoplatelet (gnp) nanocomposites. *European Polymer Journal, 86(1).* https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.10.045

Gavallas, P., Savvas, D., & Stefanou, G. (2023). Mechanical properties of graphene nanoplatelets containing random structural defects. *Mechanics of Materials, 180(20),* 104611. https://doi.org/ 10.1016/j.mechmat.2023.104611

Gonçalves, C., Pinto, A.M., Machado, A.V., Moreira, J.A., Gonçalves, I.C., & Magelhaes, F.D. (2016). Biocompatible reinforcement of poly(Lactic acid) with graphene nanoplatelets. *Polymer Composites, 39*. https://doi.org/10.1002/pc.24050

Göçügenci, A., & Keskin, S.B. (2023). The effect of graphene nanoplatelet addition on the mechanical, durability and self-healing properties of engineered cementitious composites. MATEC Web conferences, 378, 02024. https://doi.org/10.1051/matecconf/202337802024

Güler, T. (2017). Mechanical, thermal and flammability properties of huntite hydromagnesite reinforced polyurethane elastomer. M.Sc. Thesis. Middle East Technical University Polymer Science and Technology Department, Ankara 120s.

Han, D., Wang, H., Lu,T., Cao, L., Dai,. Y., Cao, H., & Yu, X. (2022). Scalable manufacturing green core–shell structure flame retardant, with enhanced mechanical and flame-retardant performances of polylactic acid. *Journal of Polymers and the Enviroment, 30,* 2516 – 2533. https://doi.org/10.1007/s10924-021-02358-1

Han, H., Hu, S., Feng, J., & Gao, H. (2011). Effect of stearic acid, zinc stearate coating on the properties of synthetic hydromagnesite. *Applied Surface Science, 257,* 2677–2682.

Hayatioğlu, N., Tekin, İ., & Ersus, S. (2024). Optimization of cellulose extraction parameters and production of nanocellulose from black carrot juice wastes. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty, 21(2),* 547–560. https://doi.org/10.33462/jotaf.1326627

Hollingbery, L.A., & Hull, T.R., (2010). The thermal decomposition of huntite and hydromagnesite. *Thermochimica Acta, 509(1-2),* 1–11. https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.06.012

Hussain, W. A., & Rafiq, S. N. (2012). Mechanical properties of carrot fiber – epoxy composite. *Baghdad Science Journal, 9(2),* 335–340.

Kahraman, M. (2022). Polipropilen bileşiklerinin mekanik, fiziksel ve alev geciktirici özelliklerinin mineraller ve köpüren alev geciktiricilerin sinerjistik kombinasyonunun kullanılarak incelenmesi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Polimer Bilim ve Teknolojisi Anabilim Dalı, İstanbul.

Kangal, O., & Güney, A. (2006). A new industrial mineral: Huntite and its recovery. *Minerals Engineering, 19,* 376–378.

Kim, H., & Lee, S. (2019). Characterization of electrical heating textile coated by Graphene Nanoplatelets/PVDF-HFP composite with various high graphene nanoplatelet contents. *Polymers, 11(5),* 928. https://doi.org/10.3390/polym11050928

Kim, I., & Jeong, Y.G. (2010). Polylactide/exfoliated graphite nanocomposites with enhanced thermal stability, mechanical modulus, and electrical conductivity. *Journal of Polymers Science Part B Polymer Physics, 48(8),* 850 – 858. https://doi.org/10.1002/polb.21956

Kuenzel, C., Zhang, F., Ferrandiz-Mas, V., Cheeseman, C.R., & Gartner, E.M. (2018). The mechanism of hydration of MgO-hydromagnesite blends. *Cement and Concrete Research, 103,* 123–129.

Kumar, S., & Saha, A. (2024). Utilization of coconut shell biomass residue to develop sustainable biocomposites and characterize the physical, mechanical, thermal and water absorption properties. *Biomass Conversion and Biorefinery, 14,* 12815–12831. https://doi.org/10.1007/s13399-022-03293-4

Kumarage, S.H., Godakumbura, P.I., & Prashantha, M.A.B. (2023). A Novel banana fiber reinforced green composite from maleated castor oil and linseed oil. *Sustainable Chemical Engineering, 5(1),* 71–88. https://doi.org/10.37256/sce.5120243616

Macedo, J. N., Rosa, D. S., Garcia, M. P., Scuracchio, C. H., & Felisberti, M. I., (2015, October). Effect of nanoclay on viscoelasticity properties behaviour of PLA/MMT composites. XI Simposio Argentino de Polimeros. SAP

Mann, G.S., Singh, L.P., Kumar, P., & Singh, S. (2018). Green composites: A review of processing Technologies and recent applications. *Journal of Thermoplastic Composite Materials, 33(3),* 089270571881635. https://doi.org/10.1177/0892705718816354

Merino, D., Paul, U.C., & Athanassiou, A. (2024). Blending of polysaccharide-based carrot pomace with vegetable proteins for biocomposites with optimized performance for food packaging applications. *Food Hydrocolloids, 152,* 109903. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109903

Miller, K., Reichert, C.L., Loeffler, M., & Schmid, M. (2024). Effect of particle size on the physical properties of PLA/Potato peel composites. *Compounds, 4,* 119–140. https://doi.org/10.3390/compounds4010006

Mincheva, R., Guemiza, H., Hidan, C., Moins, S., Coulembier, O. Dubois, & P., Laoutid, F. (2019). Development of ınherently flame—retardant phosphorylated pla by combination of ringopening polymerization and reactive extrusion. *Materials, 13,* 13. https://doi.org/10.3390/ma13010013

Mohd, S.H., Rosdi, N.A.M., Bakar, M.B.A., Mohammed, M., Akil, H.M., & Thirmirzir, M.Z.A. (2022). Cellulose nano crystal/graphene nano platelets hybrid nanofillers reinforced polylactic acid biocomposites: mechanical and morphological properties. 4th International Conference on Tropical Resources and Sustainable Sciences, 1102, 012005. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1102/1/012005

Mortalo, C., Russo, P., Miorin, E., Zin, V., Paradisi, E., & Leonelli, C. (2023). Extruded composite films based on polylactic acid and sodium alginate. *Polymer, 282(23),* 126162. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126162

Nagarajan, V., Zhang, K., Misra, M., & Mohanty, A.K. (2015). Overcoming the fundamental challenges in improving the impact strength and crystallinity of PLA biocomposites: Influence of nucleating agent and mold temperature. *ACS Appl. Mater. Interfaces, 7,* 11203−11214. https://doi.org/10.1021/acsami.5b01145

Nyambo, C., Mohanty, A.K., & Misra, M. (2011). Effect of maleated compatibilizer on performance of PLA/wheat straw-based green composites. *Macromoleculer Material Engineering, 296,* 710−718. https://doi.org/10.1002/mame.201000403

Panchal, M., Raghavendra, G., Reddy, A.R., Omprakash, M., & Ohja, S. (2021). Experimental investigation of mechanical and erosion behavior of eggshell nanoparticulate epoxy biocomposite. *Polymers and Polymer Composites, 29(7),* 897 – 908. https://doi.org/10.1177/0967391120943454

Pinto, A.M., Gonçalves, C., Gonçalves, I.C., & Magalhaes, F.D. (2015, February). Effect of biodegradation on PLA/graphene-nanoplatelets composites mechanical properties and biocompatibility. nanoPT 2015 Nanoscience and Nanotechnology International Conference, Porto.

Rahmat, N.F., Sajab, M.S., Afdzaluddin, A.M., Chia, C.H., & Ding, G. (2024). Enhancing the electrochemical properties of biopolymer composites using starch-graphene nanoplatelets. *Polymer Composites, 1–11.* https://doi.org/10.1002/pc.28809

Rajinipriya, M., Nagalakshmaiah, M., Robert, M., & Elkoun, S. (2018). Homogenous and transparent nanocellulosic films from carrot. *Industrial Crops & Products, 118,* 53–64. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.076

Ramesh, P., Prasad, B.D., & Narayana, K.L. (2020). Effect of MMT clay on mechanical, thermal and barrier properties of treated aloevera fiber/ PLA-hybrid biocomposites. *Silicon, 12,* 1751–1760. https://doi.org/10.1007/s12633-019-00275-6

Righetti, M.C., Cinelli, P., Mallegni, N., Massa, C.A., Aliotta, L., & Lazzeri, A. (2019a). Thermal, mechanical, viscoelastic and morphological properties of poly(lactic acid) based biocomposites with potato pulp powder treated with waxes. *Materials, 12,* 990. https://doi.org/10.3390/ma12060990

Righetti, M.C., Cinelli, P., Mallegni, N., Massa, C.A., Bronco, S., Stäbler, A., & Lazzeri, A. (2019b). Thermal, mechanical, and rheological properties of biocomposites made of poly (lactic acid) and potato pulp powder. *International Journal of Molecular Science, 20,* 675. https://doi.org/10.3390/ijms20030675

Santos, L.G.S., Paz, S.P.A., Cunhaa, E.J.S., & Souza, J.A.S. (2020). Non-halogenated flame-retardant additive from Amazon mineral waste. *Journal of Materials Research and Technology, 9(5),* 11531–11544.

Savaş, L.A., Arslan, C., Hacioglu, F., & Dogan, M. (2018). Effect of reactive and nonreactive surface modifications and compatibilizer use on mechanical and flame-retardant properties of linear low-density polyethylene filled with huntite and hydromagnesite mineral. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 134,* 1657–1666. https://doi.org/10.1007/s10973-018-7378-5

Seki, Y., Sever, K., Sarikanat, M., Sakarya, A., & Elik, E. (2013). Effect of huntite mineral on mechanical, thermal and morphological properties of polyester matrix. *Composites: Part B, 45,* 1534–1540.

Siqueira, G., Oksman, K., Tadokoro, S. K., & Mathew, A. P. (2016). Re-dispersible carrot nanofibers with high mechanical properties and reinforcing capacity for use in composite materials. *Composites Science and Technology, 123,* 49–56.

Sogut, E., & Cakmak, H. (2020). Utilization of carrot (Daucus carota L.) fiber as a filler for chitosan based films. *Food Hydrocolloids, 106,* 105861. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105861

Sucheta, Misra, N.N., & Yadav, S.K. (2020). Extraction of pectin from black carrot pomace using intermittent microwave, ultrasound and conventional heating: Kinetics, characterization and process economics. *Food Hydrocolloids, 102,* 105592. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105592

Sun, Z., Zhang, L., Liang, D., Xiao, W., & Lin, J. (2017). Mechanical and thermal properties of PLA biocomposites reinforced by coir fibers. *International Journal of Polymer Science, 8*. https://doi.org/10.1155/2017/2178329

Şen, F., Madakbaş, S., & Kahraman, M.V. (2014). Preparation and characterization of Polyaniline/Turkish huntite-hydromagnesite composites. *Polymer Composites, 35,* 456–460. https://doi.org/10.1002/pc.22681

Tawiah, B., Yu, B., Yuen, R. K. K., Hu, Y., Wei, R., Xin, J. H., & Fei, B., (2019). Highly efficient flame retardant and smoke suppression mechanism of boron modified Graphene oxide/Poly (Lactic acid) nanocomposites. *Carbon, 150(3),* 8–20. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.002

Torres., F.G., Rodriguez, S., & Saavedra, A.C. (2019). Green composites materials from biopolymers reinforced with agroforestry waste. *Journal of Polymers and the Enviroment, 27,* 2651–2673. https://doi.org/10.1007/s10924-019-01561-5

Ţucureanu, V., Matei, A., & Avram, A.M. (2016). FTIR spectroscopy for carbon family study. *Critical Reviews in Analytical Chemistry, 46(6),* 502–520. https://doi.org/10.1080/10408347.2016.1157013

Türk, T., Sökmen, İ., & Kangal, M.O. (2023, December). Enrichment of huntite ore based on its characterization. 19th Balkan Mineral Processing Congress.

UL 94 (2014). Tests for Flammability of Plastic Materials for Partscin Devices and Appliances.

Yang, Y., Wang, D.Y., Haurie, L., Liu, Z., & Zhang, L. (2021). Combination of corn pith fiber and biobased flame retardant: a novel method toward flame retardancy, thermal stability, and mechanical properties of polylactide. *Polymers, 13,* 1562. https://doi.org/10.3390/polym13101562

Yenier, Z., Şen, İ., Sever, K., Seki, Y., Sarıkanat, M. (2015). Grafen takviyeli biyokompozitlerin mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi. XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, (s. 1055-1058). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi, Ağustos 24-28.

Yüksel Sarıoğlu, H., & Dirim, S.N. (2023). The effect of the fluidized bed agglomeration process on the powder properties of black carrot juice powders. *Journal of Food Process Engineering, 46(12).* https://doi.org/10.1111/jfpe.14460

Zakut, M. (2012). Effects of huntite/hydromagnesite on capacity of flame retardancy, mechanical and physical properties of polypropylene. M.Sc. Thesis. Istanbul Technical University Graduate School Of Science Engineering And Technology Polymer Science and Technology Programme, İstanbul 132s.

Zhu, T., Guo, J., Fei, B., Feng, Z., Gu, X., Li, H., Sun, J., & Zhang, S. (2020). Preparation of methacrylic acid modified microcrystalline cellulose and their applications in polylactic acid: flame retardancy, mechanical properties, thermal stability and crystallization behavior. *Cellulose, 27,* 2309–2323. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02931-x.

Zorah, M., Mudhafar, M., Majhool, A.A., Abbood, S.F., Alsailawi, H.A., Karhib, M.M., & Mustapa, I.R. (2023). Review of the green composite: ımportance of biopolymers, uses and challenges. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 111(1),* 194–216. https://doi.org/10.37934/arfmts.111.1.194216.

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 516-532 doi: 10.17714/gumusfenbil.1569247 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Büyük ölçekli ağlar için polinom zamanlı kritik düğüm tespiti algoritması

A polynomial-time algorithm for critical node detection in large-scale networks

Onur UĞURLU*[1], Yeşim AYGÜL[1]

[1]*İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İzmir*

• Geliş tarihi / *Received*: 17.10.2025 • Kabul tarihi / *Accepted*: 05.05.2025

Öz

Ağlar, karmaşık sistemlerin modellenmesinde ve analiz edilmesinde kritik bir rol oynar; bu nedenle ağ analizleri hem sosyal hem de teknolojik sistemlerde önemli veriler sağlar. Bu çalışmada, ağlardaki kritik düğümleri tespit etmeyi amaçlayan Kritik Düğüm Problemi (KDP) ele alınmıştır. KDP, bir ağdaki ikili bağlantılılığı minimize eden düğümlerin bulunmasını amaçlayan bir problemdir. Başka bir deyişle, KDP, silinmesiyle ağı benzer boyutlarda çok sayıda segmente bölen düğüm kümesini bulmayı hedefler. Bu problem, sosyal ağlardan biyolojik sistemlere, telekomünikasyon ağlarından kablosuz çok sekmeli ağlara kadar birçok alanda önemli uygulamalara sahiptir. KDP, NP-Zor bir problem olduğundan büyük ölçekli ağlarda optimale yakın etkin çözümlerin bulunması için polinom zamanlı algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmanın temel motivasyonu, özellikle büyük ölçekli ağlar üzerinde optimale yakın çözümler bulabilecek polinom zamanlı bir algoritma geliştirmektir. Çalışmada önerilen TrimCut algoritması, ağın dayanıklılığını azaltan kritik düğümleri belirlemek için üç aşamalı bir süreç kullanmaktadır. İlk aşamada, ağdan yüksek dereceli düğümler çıkarılarak ağ seyreltilir, ardından ikinci aşamada Derinlik Öncelikli Arama ağacı ile kesim düğümleri tespit edilir. Son aşamada ise ağdaki kritik düğümler tespit edilir. Önerilen algoritmanın performansı, literatürdeki mevcut algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Hesaplamalı deneyler, TrimCut algoritmasının mevcut kütüphane örnekleri üzerindeki hata oranının %6'nın altında olduğunu ve büyük ölçekli ağlarda kaliteli çözümler bulabildiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Ağ analizi, Kritik düğümler, Polinom zamanlı algoritmalar

Abstract

Networks play a crucial role in modeling and analyzing complex systems, providing valuable data in both social and technological systems. This study addresses the Critical Node Problem (CNP), which aims to identify critical nodes within networks. CNP seeks to find the nodes whose removal minimizes pairwise connectivity in the network. In other words, CNP aims to identify a set of nodes whose deletion fragments the network into several segments of similar size. This problem has significant applications in various fields, ranging from social networks to biological systems, from telecommunication networks to wireless multi-hop networks. As CNP is an NP-Hard problem, developing polynomial-time algorithms is essential to find efficient solutions for large-scale networks. The primary motivation of this study is to develop a polynomial-time algorithm capable of finding near-optimal solutions, particularly for large-scale networks. The proposed TrimCut algorithm employs a three-stage process to identify critical nodes that reduce network resilience. In the first stage, the network is sparsified by removing high-degree nodes. Then, in the second stage, a Depth-First Search (DFS) tree is used to detect cut nodes. Finally, in the last stage, the critical nodes in the network are identified. The performance of the proposed algorithm has been compared with existing algorithms in the literature. Computational experiments demonstrate that the TrimCut algorithm achieves an error rate below 6% on standard benchmark networks and provides high-quality solutions for large-scale networks.

Keywords*: Network analysis, Critical nodes, Polynomial-time algorithms*

*Onur UĞURLU; onur.ugurlu@bakircay.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Günümüzde ağlar, toplumsal ve teknolojik altyapının temel unsurlarından biri haline gelmiştir. İnternetten sosyal medya platformlarına, ulaşım sistemlerinden biyolojik yapılara kadar pek çok alanda, sistemler arasındaki ilişkileri temsil etmek için ağ yapıları kullanılır. Matematiksel olarak bu ağlar, düğümler ve bu düğümler arasındaki bağlantıları ifade eden kenarlardan oluşan bir çizge modeli ile temsil edilir. Bu yapılar, toplumsal etkileşim, bilgi akışı ve enerji dağıtımı gibi hayati işlevlerin analizi ve sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynar. Ağ analizi, bu karmaşık yapıları anlamayı ve optimize etmeyi amaçlar. Ağ analizi; sosyal ağlardaki bilgi yayılımı, biyolojik ağlardaki hücreler arası etkileşimler veya ulaşım ağlarındaki trafiğin düzenlenmesi gibi pek çok farklı alanda uygulanabilir. Özellikle büyük veri çağında, ağ analizleri hem verimliliği artırmak hem de olası riskleri önceden tespit etmek için temel bir araçtır. Bu nedenle, ağların yapısal özelliklerini anlamak hem günlük yaşamda hem de bilimsel çalışmalarda stratejik bir öneme sahiptir.

Ağ analizinde, ağlardaki kritik düğümlerin tespiti en önemli araştırma konularından biridir. Bu kritik düğümler, ağın genel yapısının bozulmasına neden olabilecek zayıf noktaları ifade eder ve bu düğümlerin tespiti, ağların dayanıklılığını artırmak, zayıf noktaları belirlemek ve verimliliği optimize etmek açısından önemli bir rol oynar. Kritik Düğüm Problemi (KDP) (Critical Node Problem) ağın birleştirilmişliğini önemli ölçüde etkileyen düğümleri tespit etmeyi amaçlayan bir optimizasyon problemidir. Bu problemde, bir k tamsayısına eşit ya da daha az sayıda düğüm silinerek kalan çizgedeki ikili bağlantılılık sayısının (en az bir yol ile bağlı olan düğüm çiftlerinin toplam sayısını) enküçüklenmesi hedeflenmektedir (Lalou vd., 2018).

KDP'nin de dahil olduğu Kritik Düğüm Tespiti Problemleri (KDTP), ağların özelliklerini, yapılarını ve işlevlerini analiz etmek ve anlamak için çok önemli bir araçtır. KDTP aslen teorik bir çizge problemi olarak önerilmesine ve bu doğrultuda birçok çalışma olmasına karşın, problem aynı zamanda birçok gerçek hayat probleminin çözümünde de önemli bir rol oynamaktadır. KDTP'nin en doğal uygulama alanı ağların dayanıklılıklarının analiz edilmesidir. Güçsüz bir ağ, rastgele yıkıcı olaylar karşısında savunmasız olabilir. Genel olarak bir ağın zayıflıkları, bozulduğunda ağ performansını önemli ölçüde düşüren düğümler ve kenarları olarak tanımlanır. Bu nedenle KDTP ile kritik düğümlerin bulunması ağdaki temel zayıflıkları keşfetmeye olanak sağlar. Farklı çalışmalar kritik düğümlerin merkez düğümler (Grubesic vd., 2008) gibi literatürde yaygın olarak kullanılan diğer metriklere göre ağ zafiyetini değerlendirme açısından daha uygun olduğunu göstermiştir (Borgatti, 2006; Dinh & Thai, 2011; Dinh vd., 2010; Veremyev vd., 2015).

KDTP'nin yaygın kullanım alanlarından biri de hesaplamalı biyolojidir. Bakteriler ve virüsler gibi biyolojik organizmalar, birbirleriyle etkileşime giren protein kümeleri oluşturarak bir protein ağı meydana getirir. KDTP, proteinlerin düğümler ile, aralarındaki etkileşimin ise kenarlar ile temsil edildiği bir çizge ile modellenebilir. Tüm proteinler arasındaki bağlantıyı koruyan kritik düğümlerin (proteinleri) tespiti birçok biyolojik uygulama için faydalı bilgiler sağlar. Örneğin akılcı ilaç tasarımında bu kritik proteinler ilgili zararlı organizmayı yok etmek ve etkisiz hale getirmek için hedef alınmalıdır (Jhoti & Leach, 2007; Liljefors vd., 2002). Tomaino vd., bir KDTP varyantı ile insan-protein etkileşim ağındaki kritik düğümleri belirleyerek saldırgan kanser hücrelerini yok etmek üzerine çalışmıştır (Tomaino vd., 2012).

KDTP'nin kullanımı için belki de en uygun alan telekomünikasyon ağlarıdır. Telekomünikasyon ağlarında kritik düğümlerin belirlenmesi hem savunma hem de saldırı yaklaşımları için kullanılabilir. Terörist iletişim ağları gibi muhalif ağlarda bireylerin ya da grupların arasındaki iletişimi koparmak için en az saldırı ile muhalif ağdaki iletişimin en aza indirilmesi için kritik düğümlerin tespit edilmesi gerekir (Krebs, 2002; Ovelgonne vd., 2012). Arulselvan vd., Krebs tarafından modellen terörist ağı üzerindeki iletişimi yok etmek için KDTP'yi kullanmışlardır. Ayrıca Commander vd., Kablosuz Ağ Bloke Etme Problemini (Wireless Network Jamming Problem) bir KDTP olarak formüle etmiştir (Commander vd., 2007). Kablosuz Ağ Bloke Etme Problemi, muhalif bir kablosuz iletişim ağını etkisiz hale getirmek için en uygun sayıda sinyal bozucuyu ve konumu belirlemeyi amaçlamaktadır. KDTP'nin askeri alandaki bir diğer uygulaması da tedarik zinciri ağlarıdır. Askeri bir tedarik zincir ağı, taburları düğüm ve aralarındaki bağlantıları kenar olarak düşünülerek bir çizge olarak modellenebilir. Askeri bir tedarik zinciri ağındaki kritik düğümler belirlenip bu düğümlere saldırılarak taburlar arasındaki paylaşım tahrip edilebilir.

KDTP'nin en önemli uygulama alanlarından biri de sosyal ağlardır. Sosyal ağlar, insanlar ve aralarındaki etkileşimlerin modellenmesiyle oluşturulduğundan hem bu ağların yapısının hem de üzerlerinde gerçekleşen

olayların incelenmesi önemlidir. Ağdaki toplulukların ve önemli bireylerin tespiti ağın yapısal özelliklerine; bilgi paylaşımı, ürün önerileri ve enfeksiyon yayılımı gibi fenomenler de ağ üzerinde gerçekleşen olaylara örnek olarak verilebilir. KDTP, daha yüksek ikili bağlantılılığın daha hızlı salgına neden olduğu varsayılarak, sosyal bir ağdaki kritik kişileri bulmak ve toplumdaki insanlar arasındaki ikili bağlantıları en aza indirgemek üzere onları aşılamak için kullanılabilir. Sosyal ağlarda kritik düğümleri/kişileri belirlemek, Covid-19 ve benzeri salgınlara karşı geliştirilecek stratejiler için büyük önem taşımaktadır. Geçen yıllarda Nature dergisinde yayımlanan bir çalışmada Block vd. Covid-19 virüsünün yayılımını sosyal ağlar üzerinde modelleyerek insanların sosyalleşme örüntülerinin sonuçlarını incelemiştir (Block vd., 2020).

KDTP ayrıca Kablosuz Çok Sekmeli Ağlar (KÇSA) ile modellenen, nesnelerin interneti, telsiz duyarga ağları ve drone ağları gibi birçok ağ türünde uygulamalara sahiptir. KÇSA'da önemli konulardan biri ağın güvenilirliği ve hata toleransıdır. Güvenilirlik ve hata toleransında önemli etkenlerden biri aktif düğümler arasında sürdürülebilir bağlantının sağlanmasıdır (Akram & Ugurlu, 2023). KÇSA'da bir merkezi iletişim alt yapısı olmadığından dolayı uzak düğümlerin birbirine bağlanması için aradaki diğer düğümlerden yararlanmak gerekmektedir. KÇSA'da kritik düğümlerin tespiti, sonrasında bu düğümlerin yedek düğümler ya da ekstra güç kaynakları ile güçlendirilmesi ağdaki dayanıklılığın minimum maliyet ile giderilmesini sağlar (Dagdeviren vd., 2018). Ayrıca kritik düğümler, ağdaki mevcut iletişim yollarının yükünün artmasına ve paketlerin ulaşım hızının düşmesine sebep olmaktadır. Bu da üst seviye uygulamaların verimliliğini düşürmektedir. Bu sebeple kritik düğümlerin tespiti, ağın yönlendirme performansını düşüren önemli noktaları belirler. Böylelikle bu ağlarda paket yönlendirmelerin (ING Routing) verimliliğini artırabilir. Kritik düğümlerin tespiti, ağın yaşam süresini etkileyen önemli düğümleri de belirleyebilir. Genel olarak, kritik düğümler ağın farklı bölgelerini birbirine bağlayan ara düğümler olduğundan, KÇSA'da paketlerin çoğu kritik düğümlerin üzerinden geçmektedir. Bu durum kritik düğümlerin üzerinde yoğun veri akışına ve bu düğümlerde hızlı enerji tüketimine sebep olur. Dolayısıyla, kritik düğümlerin tespiti ağın yaşama süresinde etkili olan en önemli düğümleri belirleyebilir (Cobanlar vd., 2022).

KDP, NP-Zor bir problem olduğundan problem için özellikle büyük ölçekli ağlarda etkin çözümlerin bulunması için polinom zamanlı algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, sosyal ağlar ve biyolojik ağlar gibi karmaşık büyük ölçekli sistemlerin analizinde, hızlı ve ölçeklenebilir yöntemlere duyulan ihtiyaç artmıştır. Bu çalışmanın ana motivasyonu, KDP için özellikle sosyal ağlar gibi büyük ölçekli ağlarda etkili bir şekilde çalışabilecek, polinom zamanlı bir algoritma geliştirmektir. Geliştirilen algoritma 3 temel aşamadan oluşmaktadır. Önerilen algoritmanın ilk aşamasında yüksek dereceye sahip düğümler ağdan çıkarılır, ikinci aşamasında ise bir Derinlik Öncelikli Arama ağacı oluşturulur ve kesim düğümleri belirlenir. Son olarak, üçüncü aşamada kritik düğümler tespit edilir.

Çalışmanın geri kalanındaki bölümler ise şu şekilde organize edilmiştir; ikinci bölümde, ele alınan problemin formal tanımı ve çalışma ile ilgili bazı ön bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölüm kısa bir literatür incelemesi sunmaktadır. Dördüncü bölüm, önerilen algoritma ve karmaşıklık analizini içermektedir. Beşinci bölümde hesapsal sonuçlar verilmiştir. Son bölüm ise çalışmayla ilgili genel değerlendirmelerden ve gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilerden oluşmaktadır.

2. Kritik düğüm problemi
2. Critical node problem

Çeşitli fenomenler ve bu fenomenler arasındaki etkileşimler çizgeler (graf) kullanılarak modellenebilir. Çizge teorisi, bu tür yapıları inceleyen ve bilgisayar bilimlerinde geniş bir uygulama alanına sahip önemli bir çalışma alanıdır. Bir $G = (V, E)$ çizgesi tanımlandığında, V düğüm (nodes/vertices) kümesini, E ise düğümler arasındaki kenarları/ayrıtları (edges/links) temsil eder. Burada $n = |V|$ çizgedeki toplam düğüm sayısını, $m = |E|$ ise çizgedeki kenar sayısını ifade eder. Bir düğümün derecesi (degree), o düğüme bağlı kenarların sayısıdır. Kenarların yalnızca düğümler arasındaki ilişkinin var olup olmadığını belirttiği çizgelere ağırlıksız çizge (unweighted graph) denir. Buna karşılık, kenarların belirli bir sayısal değerle ifade edildiği çizgelere ise ağırlıklı çizge (weighted graph) denir (Diestel, 2012). Bir çizgede, düğümler arasında yalnızca bir kez geçiş yapılan bağlantı kümesine yol (path) denir. Eğer bir çizgede herhangi iki düğüm arasında en az bir yol varsa bu çizgeye bağlı/bağlantılı çizge (connected graph) denir. Başlangıç ve bitiş düğümlerinin aynı olduğu yollara ise çevrim (cycle) adı verilir. Eğer bir çizge çevrim içermiyorsa ve iki düğüm arasında sadece tek bir yol varsa bu çizgeye ağaç (tree) denir. Bir çizgede bağlantılı bileşen (connected component), her iki düğümün de birbirine en az bir yol ile bağlı olduğu en büyük düğüm alt kümesidir. Başka bir deyişle, bağlantılı bileşen,

düğümlerinin birbirine dolaylı ya da doğrudan bağlı olduğu bir düğüm grubudur. Bir çizgede kesim düğümü (articulation point/cut node), çıkarıldığında çizgenin bağlantılı bileşenlerinin sayısını artıran bir düğümdür. Başka bir deyişle, bu düğümün çıkarılması, çizgeyi birden fazla alt bileşene böler. Derinlik Öncelikli Arama (DFS – Depth-First Search) ise çizge arama algoritmalarından biridir. DFS, bir düğümden başlayarak o düğüme bağlı olan tüm düğümleri derinlemesine ziyaret eder ve ardından geriye dönerek diğer dallara geçer. DFS sırasında, çizge üzerinde ziyaret edilen düğümler ve kenarlar bir DFS ağacı (DFS tree) oluşturur. DFS ağacı, bir kök düğümden başlayarak tüm bağlantılı düğümleri keşfetmek için oluşturulan ve çizgenin belirli bir sıralama ile temsil edildiği bir yapıdır. Tablo 1, makale boyunca kullanılan notasyonları özetlemektedir.

Tablo 1. Notasyon listesi
Table 1. *The list of notation*

Notasyon	***Anlamı***
G	Çizge
V	Düğüm kümesi
E	Kenar kümesi
n	Düğüm sayısı
m	Kenar sayısı
k	Kritik düğüm sayısı
Δ	Maksimum düğüm derecesi

Bir $G = (V, E)$ çizgesi ve bir k tamsayısı verildiğinde, KDP, silinmesi ile kalan $G(V \backslash S)$ çizgesinde düğüm ikilileri arasındaki bağlantıyı (pairwise connectivity) en aza indiren ve en fazla k düğümden oluşan bir $S \subseteq V$ kümesi bulmaya çalışır (Arulselvan vd., 2009). KDP'nin NP-Zor bir problem olduğu Arulselvan vd. (2009) tarafından gösterilmiştir. Problemin Veremyev vd. tarafından önerilmiş matematiksel modeli aşağıda verilmiştir (Veremyev vd., 2014a). İlgili modelde n toplam düğüm sayısını, $A = a_{ij}$ bitişiklik matrisini (eğer i ve j düğümleri arasında bir kenar varsa $a_{ij} = 1$, aksi halde $a_{ij} = 0$'dır) temsil eder. Her bir düğüm ikilisi için, eğer i ve j düğümleri arasında bir yol varsa $u_{ij} = 1$, aksi halde $u_{ij} = 0$'dır. Son olarak, eğer i düğümü kritik düğüm olarak silindiyse $v_i = 1$, aksi halde $v_i = 0$'dır.

$$min \sum_{i \in V} u_{ij} \tag{1}$$

k.s.

$$u_{ij} \leq 1 - v_i \qquad \forall i, j \in V,\ i \neq j, \tag{2}$$

$$u_{ij} \leq 1 - v_j \qquad \forall i, j \in V,\ i \neq j, \tag{3}$$

$$u_{ij} \leq \sum_{l \in V} a_{il} u_{lj} \qquad \forall i, j \in V,\ l \neq i, \tag{4}$$

$$u_{ij} \geq \frac{1}{n} \sum_{l \in V} a_{il} u_{lj} - v_i \qquad \forall i, j \in V, \tag{5}$$

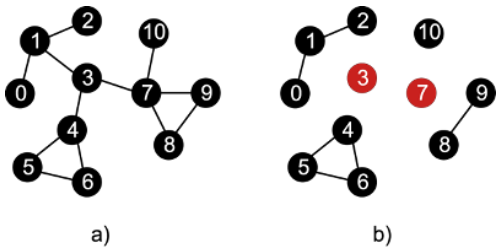
$$u_{ij} \geq a_{ij} - v_i - v_j \qquad \forall i, j \in V,\ i \neq j, \tag{6}$$

$$u_{ij} = u_{ji} \qquad \forall i, j \in V,\ i < j, \tag{7}$$

$$\sum_{i \in V} v_i \leq k, \tag{8}$$

$$v_i, u_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in V. \tag{9}$$

Yukarıdaki modelde amaç fonksiyonu (1), birbirine en az bir yol ile bağlı düğümlerin sayısını minimize eder. i ve j düğümlerinin arasında bir kenarın olmadığı ve bu düğümlerin kritik düğüm olarak seçilmediği varsayıldığında, eğer i ve j arasında bir yol varsa, i düğümüne bağlı bir l düğümü vardır. O halde, l düğümü j düğümüne bir yol ile bağlıdır. u_{ij} ve v_i değişkenleri arasındaki ilişki (2)-(6) kısıtları ile tanımlanmıştır. Kısıt (7) eğer i ve j arasında bir yol varsa, j ve i arasında da bir yol olmasını sağlar. Son olarak, kısıt (8) toplam silinen kritik düğümlerin sayısının k'dan küçük eşit olmasını sağlar.



Şekil 1. Örnek çizge ve $k = 2$ için KDP'nin en kritik düğümleri
Figure 1. *The most critical nodes of the CNP for a sample graph with* $k = 2$

Şekil 1a'da 11 düğümden oluşan örnek bir çizge verilmiştir. Bu örnek çizge üzerinde $k = 2$ için KDP çözülmek istediğinde en iyi çözüme ait S kümesi düğüm 3 ve 7'den oluşmaktadır (Şekil 1b). Bu düğümlerin yokluğunda ağ 4 parçaya bölünür ve kalan ağdaki ikili bağlantılılık değeri 7'ye eşit olur.

3. Literatür incelemesi
3. Literature review

KDTP silinmesiyle kalan çizgede önceden tanımlı bir birleştirilmişlik metriğini minimize eden ya da maksimize eden düğüm kümelerini bulmayı amaçlayan bir problem ailesidir. Literatürde en çok çalışılan birleştirilmişlik metrikleri arasında Bağlantılı Bileşen Sayısı, En Büyük Bağlantılı Bileşen Boyutu ve İkili Bağlantılılık (Pairwise Connectivity) sayısı yer almaktadır. Bu metrikleri ele alan tüm KDTP varyantları, literatürde çokça çalışılan bir problem olan Düğüm-Silme Problemlerinin (Node-Deletion Problems) alt problemleri olarak değerlendirilebilir (Lewis & Yannakis, 1980; Yannakis, 1981). Bu metrikler, KDTP kapsamında ilk olarak 2009 yılında Arulselvan vd. tarafından tanımlanmış ve önerilmiştir (Arulselvan vd., 2009). KDP, basit bir ifadeyle, düğümlerinden bir kısmını silerek ağı benzer boyutlarda çok sayıda parçaya bölmeye çalışır. Dolayısıyla KDP kalan ağdaki hem bağlantılı bileşen sayısını maksimize etmeye hem de en büyük bileşenin boyutunu minimize etmeye çalışan çok amaçlı bir problem olarak görülebilir. KDP kritik düğüm problemleri arasında en çok çalışılan problemdir.

Optimizasyon problemlerinin kesin çözümlerini bulmanın etkili yollarından biri tamsayılı programlamadır. KDP için tamsayılı doğrusal programlama kullanılarak geliştirilen ilk matematiksel formülasyon Arulselvan vd. tarafından önerilmiştir (Arulselvan vd., 2009). Di Summa vd., önerilen ilk formülasyon üzerine çalışmış ve çeşitli iyileştirme önerilerinde bulunmuştur (Di Summa vd., 2012). Bu iki model çok sayıda kısıt kullandığı ($O(n^3)$ kısıt karmaşıklığı) için sadece küçük boyutlu çizgelerde çalışabilmektedir. $O(n^2)$ kısıt karmaşıklığına sahip bir diğer geliştirilmiş matematiksel formülasyon Veremyev vd. tarafından önerilmiştir (Veremyev vd., 2014a). Bu formülasyon 1000 düğüme kadar olan çizgeler için kesin çözümler bulabilmektedir. Bu da araştırmacıların geliştirdikleri sezgisel algoritmaları, en iyi çözümü bilinen örnekler üzerinde test etmelerine imkân sağlamaktadır. Ayrıca KDP için Ventresca ve Aleman, Arulselvan vd. tarafından önerilen formülasyonu baz alarak iki farklı yaklaşım algoritması önermiştir (Ventresca & Aleman, 2014a; Ventresca & Aleman, 2014c; Arulselvan vd., 2009).

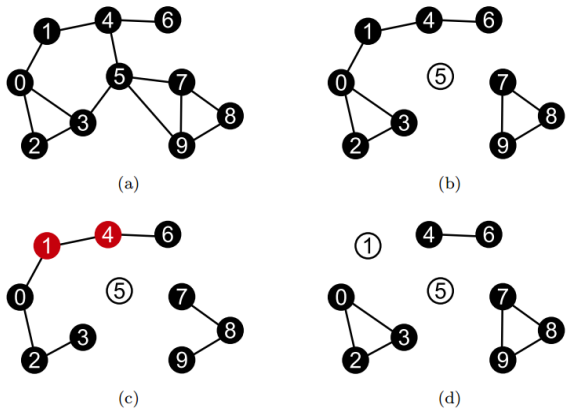
Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan bir diğer yaklaşım Metasezgisel Algoritmalardır (Metaheuristic Algorithms). KDP için de literatürde önerilmiş çok sayıda metasezgisel algoritmalar bulunmaktadır. Ventresca (2012) büyük boyutlu örnekler üzerinde Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing) ve Popülasyon Tabanlı Artan Öğrenme (Population-Based Incremental Learning) yöntemlerinin KDP üzerinde performansını araştırmıştır (Ventresca, 2012). Aringhieri vd. farklı yerel arama yöntemleri içeren iki farklı metasezgisel algoritma geliştirmiştir (Aringhieri vd., 2016a). Aynı araştırmacılar KDP için bir genetik algoritma yaklaşımı önermiştir (Aringhieri vd., 2016b). Bu çalışmalara ek olarak, Açgözlü Rassallaştırılmış Uyarlamalı bir Arama Yordamı GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) Purevsuren vd. tarafından önerilmiştir (Purevsuren vd., 2016). Son olarak, Zhou vd. KDP'nin çözümü için bir Memetik Algoritma (Memetic Algorithm) kullanmıştır (Zhou vd., 2019).

KDP, NP-Zor bir problem olduğundan problem için makul sürelerde kabul edilebilir sonuçlar bulmak oldukça önemlidir. Bu amaçla en çok kullanılan yöntemler polinom zamanlı algoritmalardır. Bu kapsamda önerilen ilk algoritma Arulselvan vd. tarafından geliştirilmiştir (Arulselvan vd., 2009). Önerilen algoritmada öncelikle

verilen çizgedeki en büyük bağımsız küme bulunur ve bu kümede olmayan tüm düğümler başlangıç çözümü olarak değerlendirilir. Bu başlangıç çözümü aynı zamanda G çizgesi için bir tepe örtüsü olma özelliğini taşır. Daha sonra çözüm kümesinde düğüm sayısı k'ya eşit olana kadar, çözüm kümesindeki düğümler ilgili kümeden çıkarılır. Önerilen bu yöntemin zaman karmaşıklığı $O(n^2m)$'dir. Bu algoritmanın en büyük dezavantajı en iyi çözümde olması gereken bir v düğümü başlangıç çözümüne giremediğinde, daha sonra çözüme girmesinin bir yolu yoktur. Bu sebeple, bu yöntemin çözümlerini iyileştirmek için çözüm kümesinde olan ve olmayan birer düğümün yer değiştirdiği 2-değişimli (2-exchange) bir yerel arama yöntemi önermiştir. Bu yöntem $O(n^3)$ zaman karmaşıklığı gerektirmektedir. Yerel bilgileri kullanan DFS algoritmasına dayalı daha hızlı algoritmalar Edalatmanesh (2013) tarafından önerilmiştir (Edalatmanesh, 2013). Önerilen yöntemler arasında literatür örnekleri üzerinde en iyi performans gösteren algoritma, DFS tarafından belirlenen sıralamaya dayanan DFSH − Post algoritmasıdır. DFSH − Post algoritmasının zaman karmaşıklığı $O(k(nm + nlogn))$'dir. Ventresca ve Aleman, modifiye edilmiş DFS'ye dayanan etkili bir algoritma önermiş ve sonuçlarını KDP için mevcut kütüphane örnekleri üzerinde raporlamışlardır. Önerilen algoritmanın zaman karmaşıklığı $O(k(n + m))$'dir. Bu çalışmalara ek olarak, Ugurlu, KDP'yi kablosuz çok sekmeli ağlar üzerinde çalışmış ve problem için bir dağıtık algoritma önermiştir (Ugurlu, 2023).

4. Önerilen algoritma
4. Proposed algorithm

KDP üzerine gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen kapsamlı sonuçlar incelendiğinde, çizgedeki en yüksek dereceye sahip düğümlerin genellikle en iyi çözüm kümelerinde yer aldığı, ancak kritik düğümler söz konusu olduğunda sadece derece kısıtının dikkate alınmasının çözüm kalitesini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında, çizgedeki en yüksek dereceye sahip bir çekirdek kümenin çizgeden çıkarılmasının KDP için kaliteli çözümler üretebileceği fikrine ulaşılmıştır. Bu düşünceye dayanarak KDP için geliştirilen polinom zamanlı algoritmada (TrimCut), öncelikle yüksek bağlantıya sahip $k/2$ adet düğüm ağdan çıkarılır. Ağın bu şekilde seyreltilmesi, kalan ağdaki kritik düğümlerin çok daha etkin bir şekilde tespitine olanak sağlamaktadır. Ardından, kalan ağda DFS ağacı oluşturulur ve ağdaki kesim düğümleri tespit edilir. Sonrasında tespit edilen her bir kesim düğümünün KDP amaç fonksiyonuna sağlayacağı azalma miktarı hesaplanır ve bu fonksiyonda en çok azalmayı sağlayan düğüm ağdan çıkarılır. Seyreltilmiş ağdaki bu işlem $k/2$ kere tekrarlanarak, toplamda k adet kritik düğüm belirlenir.



Şekil 2. TrimCut algoritmasının temel adımları
Figure 2. *The basic steps of the TrimCut algorithm*

Şekil 2'de TrimCut algoritmasının temel adımları görselleştirilmiştir. Şekil 2a'daki örnek çizge üzerinde $k = 2$ için KDP çözülmek istenildiğinde, TrimCut öncelikle ağdaki en yüksek dereceye sahip bir $(2/2 = 1)$ düğümü kritik düğüm olarak belirler ve bu düğümü (düğüm 5) ağdan çıkarır (Şekil 2b). Daha sonra kalan seyreltilmiş ağda DFS ağaçları oluşturulur (kalan ağda birden fazla bağlantılı bileşen olduğu için TrimCut birden fazla DFS ağacı içeren bir orman oluşturmaktadır). Sonraki adımda DFS ağaçlarındaki kesim düğümleri (kırmızı düğümler) tespit edilir (Şekil 2c) ve bu düğümler arasından KDP'nin amaç fonksiyonunu en çok azaltan düğüm, kritik düğüm (düğüm 1) olarak belirlenerek ağdan çıkarılır. Büyük ve özellikle seyrek olmayan ağlarda kesim düğümleri bulunmayabilir. Bu durumda TrimCut algoritması DFS ağacında en fazla çocuğa sahip düğümü kritik düğüm olarak belirler. DFS ağacında en fazla çocuğa sahip düğüm, genellikle ağın bağlantılılığını en çok etkileyen düğüm olarak değerlendirilebilir. Örnek çizge için TrimCut algoritmasının

bulduğu kritik düğümler ve kalan ağın yapısı Şekil 2d'de görselleştirilmiştir. Şekil 2'deki örnek üzerinde de görüldüğü gibi TrimCut algoritması birbirini takip eden üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada ağdaki en yüksek bağlantıya sahip düğüm kritik düğüm olarak tespit edilir ve ağdan çıkarılır. Bu işlem $k/2$ kere tekrarlanarak ağ seyreltilir. Daha sonra ikinci aşamada seyreltilmiş ağda DFS ağacı/ağaçları ile kesim düğümleri belirlenir. Son aşamada ise oluşturulmuş ağaçtaki/ağaçlardaki en kritik düğüm belirlenir. Görüldüğü üzere ikinci ve üçüncü aşama birbirini takip eden bir süreçtir ve bu süreç $k/2$ kere tekrarlanarak ağdaki en kritik k adet düğüm tespit edilir.

Şekil 3'te TrimCut'ın ilk aşamasının sözde kodu verilmiştir. İlgili algoritmada öncelikle her bir düğümün derece (komşu/bağlantı) sayısı hesaplanır (Algoritma 1 – Adım 1-3). Daha sonrasında ağdaki en yüksek dereceye sahip düğüm tespit edilir ve bu düğüm kritik düğüm olarak kaydedilir (Algoritma 1 – Adım 5-11). Sonraki adımda belirlenen kritik düğümün tüm komşularının dereceleri 1 eksiltilir (Algoritma 1 – Adım 12-14). Son olarak belirlenen kritik düğüm ağdan çıkarılır ve silinen düğüm sayısı güncellenir (Algoritma 1 – Adım 15-16). Bu işlemler silinen düğüm sayısı, $k/2$'ye eşit olana kadar tekrarlanır (Algoritma 1 – Adım 5-17).

Algoritma 1: En Yüksek Bağlantıya Sahip Düğümlerin Tespiti Algoritması

Girdi: $\boldsymbol{G(V,E)}$, $\boldsymbol{k}$
Başlangıçta: (deg[]) ← 0, *silinen_dugum_sayısı* ← 0
1: **For** $\boldsymbol{G}$'deki her bir $\boldsymbol{v_i}$ düğümü için **do**
2: | deg[$\boldsymbol{v_i}$] = $\boldsymbol{v_i}$'nin komşu sayısı
3: **end for**
4: **while** (*silinen_dugum_sayısı* < $\boldsymbol{k}$/2) **do**
5: | max = 0
6: | **for** $\boldsymbol{G}$'deki her bir $\boldsymbol{v_i}$ düğümü için **do**
7: | | **if** (deg[$\boldsymbol{v_i}$] > max) **then**
8: | | max = deg[$\boldsymbol{v_i}$]
9: | | *kritik_dugum* = $\boldsymbol{v_i}$
10: | | **end if**
11: | **end for**
12: | **for** *kritik_dugum*'un her bir v_j komşusu için **do**
13: | | deg[v_j] = deg[v_j] – 1
14: | **end for**
15: | $\boldsymbol{G}$ = $\boldsymbol{G}$ \ {*kritik_dugum*}
16: | *silinen_dugum_sayısı* = *silinen_dugum_sayısı* + 1
17: **end while**

Şekil 3. TrimCut algoritması sözde kodu 1: En yüksek bağlantıya sahip düğümlerin tespiti.
Figure 3. *TrimCut algorithm Pseudocode 1: Detection of nodes with highest connections*

Şekil 4'te TrimCut algoritmasının 2. aşamasının sözde kodu verilmiştir. Algoritma 2, DFS ağaçlarının oluşumunu ve kesim düğümlerinin tespitini içermektedir. TrimCut algoritması DFS ağacı oluşturmak için yığın veri yapısını kullanmaktadır. Ağdaki en yüksek dereceye sahip $k/2$ adet kritik düğüm ağdan çıkarıldıktan sonra, boş bir yığın (S) ile başlanarak DFS ağacı oluşturulur. Öncelikle ağda henüz ziyaret edilmemiş bir v_i düğümü S'e eklenir ve ilgili düğümün $r[v_i]$, $b[v_i]$ ve $root[v_i]$ değerleri güncellenerek düğüm ziyaret edildi olarak işaretlenir (Algoritma 2 - Adım 2-3). Burada $r[v_i]$, v_i düğümünün DFS ağacındaki ziyaret sırasıdır. Yani, kök düğümün sırası 0'dır ve bir v_i düğümü t adet düğümden sonra ziyaret edildiyse sırası $r[v_i] = t$ olacaktır. $b[v_i]$ ise v_i düğümünün kendisi ya da çocuklarının komşuları (orijinal ağdaki) arasındaki en küçük ziyaret sırasıdır. Eğer bir v_i düğümünün $b[v_i]$ değeri, v_i düğümünün ebeveyninin (v_{parent_i}) $r[v_i]$ değerine eşit ise bu durumda, v_i düğümü ebeveyninden daha düşük bir ziyaret sırasına sahip bir düğüme ebeveyni üzerinden geçmeden ulaşamaz, dolayısıyla v_{parent_i} bir kesim düğümüdür. $root[v_i]$ değeri de, eğer v_i düğümü bir DFS ağacının kök düğümü ise 1, aksi halde 0'dır. Eğer bir düğüm kök düğümse ve birden fazla çocuğu varsa bu düğüm de bir kesim düğümüdür. DFS ağacının kökü için bir düğüm belirlenip ilgili değerleri güncellendikten sonra, S yığınından sıradaki düğüm çekilir (v_j) ve bu düğümün henüz ziyaret edilmemiş bir komşusu olup olmadığı kontrol edilir (Algoritma 2 - Adım 5-7). Eğer böyle bir komşu düğüm var ise (v_k), bu düğüm S yığınına eklenir ve $parent[v_k]$, $r[v_k]$ değerleri güncellenir (Algoritma 2 – Adım 8). $parent[v_k]$,

v_k düğümünün DFS ağacındaki ebeveynidir. Sonrasında $ch[v_j][]$ matrisi güncellenir ve v_k düğümü ziyaret edildi olarak işaretlenir (Algoritma 2 – Adım 9-10). $ch[v][]$ matrisi, v düğümünün çocuk bilgilerini saklamaktadır ($ch[v][0]$, v düğümünün çocuk sayısını, $ch[v][t]$ ise v düğümünün t. çocuğunu temsil etmektedir). Sonraki adımda v_k düğümünün komşularının $b[]$ değerleri güncellenir (Algoritma 2 – Adım 11-15). Eğer S yığınından çekilen v_j düğümünün ziyaret edilmemiş bir komşusu yoksa v_j düğümünün $b[v_j]$ değeri ve sonrasında $parent[v_j]$'nin $ns[parent[v_j]]$ ve $stree[parent[v_j]][]$ değerleri güncellenir ve v_j düğümü S yığınından çıkarılır (Algoritma 2 – Adım 17-24).

Algoritma 2: DFS Ağacı Oluşturulması ve Kesim Düğüm Tespiti Algoritması

Girdi: $\boldsymbol{G(V,E)}$, $\boldsymbol{k}$
Başlangıçta: ($\boldsymbol{ch}[][]$, $\boldsymbol{stree}[][]$)← 0, ($\boldsymbol{root}[]$, $\boldsymbol{parent}[]$, $\boldsymbol{r}[]$, $\boldsymbol{b}[]$, $\boldsymbol{ns}[]$) ← 0, S ← {}
while (ziyaret edilmemiş bir düğüm $\boldsymbol{v_i}$ mevcutsa) **do**
  push($\boldsymbol{v_i}$, $\boldsymbol{S}$); $\boldsymbol{r[v_i] = 1}$; $\boldsymbol{b[v_i] = 1}$; $\boldsymbol{root[v_i] = 1}$
  $\boldsymbol{v_i}$'yi ziyaret edildi olarak işaretle
  while ($\boldsymbol{S}$ boş değilse) **do**
    $\boldsymbol{v_j = peek(S)}$
    $\boldsymbol{v_k = v_j}$'nin ziyaret edilmemiş bir komşusu
    if ($\boldsymbol{v_k}$ mevcutsa) **then**
      push($\boldsymbol{v_k}$, S); $\boldsymbol{parent[v_k] = v_j}$; $\boldsymbol{r[v_k] = r[v_j] + 1}$
      $\boldsymbol{ch[v_j][0] + +}$; $\boldsymbol{ch[v_j][ch[v_j][0]] = v_k}$
      $\boldsymbol{v_k}$'yı ziyaret edildi olarak işaretle
      for $\boldsymbol{v_k}$'nın her bir $\boldsymbol{v_z}$ komşusu için **do**
        if ($\boldsymbol{b[v_z] > b[v_k]}$) **then**
          $\boldsymbol{b[v_z] = b[v_k]}$
        end if
      end for
    else
      if ($\boldsymbol{b[v_j] < b[parent[v_j]]}$) **then**
        $\boldsymbol{b[parent[v_j]] = b[v_j]}$
      end if
      $\boldsymbol{ns[parent[v_j]] = ns[parent[v_j]] + ns[v_j] + 1}$
      $\boldsymbol{stree[parent[v_j]][0] + +}$
      $\boldsymbol{stree[parent[v_j]][stree[parent[v_j]][0]] = ns[v_j] + 1}$
      pop($\boldsymbol{S}$)
    end if
  end while
end while
for $\boldsymbol{G}$'deki her bir $\boldsymbol{v_i}$ düğümü için **do**
  if ($\boldsymbol{root[v_i] == 0}$) **then**
    for $\boldsymbol{v_i}$'nin her bir $\boldsymbol{v_j}$ komşusu için **do**
      if ($\boldsymbol{b[v_j] == r[v_i]}$) **then**
        $\boldsymbol{v_i}$'yi kesim düğümü olarak işaretle
      end if
    end for
  else
    if ($\boldsymbol{ch[v_i] > 1}$) **then**
      $\boldsymbol{v_i}$'yi kesim düğümü olarak işaretle
    end if
  end if
end for

Şekil 4. TrimCut algoritması sözde kodu 2 : DFS ağacının oluşturulması ve kesim düğümlerinin tespiti
Figure 4. *TrimCut algorithm Pseudocode 2: Establishing the DFS tree and detection of cut nodes*

$ns[v]$ değeri v düğümünü kök kabul eden alt ağaçtaki düğümlerin (v'nin torunları+1) sayısıdır. $stree[v][]$ ise v düğümünün çocuklarını kök kabul eden alt ağaçlardaki düğümlerin sayılarını saklar ($stree[v][0]$, v düğümünün çocuk sayısını, $stree[v][t]$ ise v düğümünün t. çocuğunu kök kabul eden alt ağaçtaki düğüm sayını temsil etmektedir). Bu işlemler S yığını boş olana kadar devam eder (Algoritma 2 – Adım 4-25). Eğer S yığını boş ise ve G çizgesinde ziyaret edilmemiş bir düğüm var ise bu düğüm S yığınına eklenir ve yukarıda açıklanan işlemler tekrarlanır (Algoritma 2 – Adım 1-26). G çizgesindeki tüm düğümler ziyaret edildikten sonra kesim düğümlerinin tespiti işlemine geçilir. Eğer bir v_i düğümü herhangi bir DFS ağacının kök düğümü değilse ve bu düğümün bir (v_j) komşusunun $b[v_j]$ değeri $r[v_i]$ değerine eşitse v_i düğümü, kesim düğümü olarak işaretlenir (Algoritma 2 – Adım 28-33). Eğer bir v_i düğümü bir DFS ağacının kök düğümü ise ve bu düğümün birden çok çocuğu varsa v_i düğümü kesim düğümü olarak işaretlenir (Algoritma 2 – Adım 35-37). Bu işlemler çizgedeki tüm düğümler için tekrarlanır (Algoritma 2 – Adım 27-39).

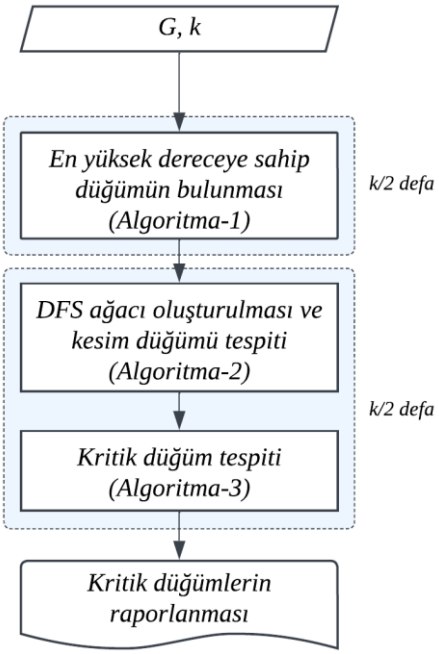
Algoritma 3: Kritik Düğüm Tespiti Algoritması

Girdi: $\boldsymbol{G(V,E)}$, $\boldsymbol{k}$, $\boldsymbol{parent}[]$, $\boldsymbol{root}[]$, $\boldsymbol{ch}[][]$, $\boldsymbol{stree}[][]$
Başlangıçta: max ← 0
1: **if** (herhangi bir kesim düğümü mevcutsa) **then**
2: **for** her bir kesim düğümü $\boldsymbol{v_i}$ için **do**
3: $\boldsymbol{p = v_i}$
4: **while** ($\boldsymbol{parent[p] != 0}$) **do**
5: $\boldsymbol{p = parent[p]}$
6: **end while**
7: **for** $\boldsymbol{v_i}$'nin her bir $\boldsymbol{v_j}$ komşusu için **do**
8: **if** ($\boldsymbol{b[ch[v_i][v_j]] == r[v_i]}$) **then**
9: $value1 = value1 + (\boldsymbol{stree[v_i][v_j] * (stree[v_i][v_j] - 1)) / 2}$
10: $value2 = value2 + \boldsymbol{stree[v_i][v_j]}$
11: **end if**
12: **end for**
13: $value3 = \boldsymbol{ns[p]} - value2$
14: $value1 = value1 + (value3 * (value3 - 1)) / 2$
15: $value4 = \boldsymbol{(ns[p] * (ns[p] - 1)) / 2}$
16: $fark = value4 - value1$
17: **if** ($fark >$ max) **then**
18: max = $fark$
19: $kritik_dugum = \boldsymbol{v_i}$
20: **end if**
21: **end for**
22: **else**
23: **for** her bir kesim düğümü olmayan düğüm $\boldsymbol{v_i}$ için **do**
24: **if** ($\boldsymbol{ch[v_i][0]} >$ max) **then**
25: max = $\boldsymbol{ch[v_i][0]}$
26: $kritik_dugum = \boldsymbol{v_i}$
27: **end if**
28: **end for**
29: **end if**
30: $\boldsymbol{G = G \setminus \{kritik_dugum\}}$

Şekil 5. TrimCut algoritması sözde kodu 3: Kritik Düğüm Tespiti
Figure 5. *TrimCut algorithm Pseudocode 3: Detection of critical node*

Şekil 5'te TrimCut algoritmasının 3. aşamasının sözde kodu verilmiştir. Algoritma 3 tespit edilen kesim düğümleri arasından, kritik düğümün belirlenme işlemlerini içermektedir. Eğer ağda kesim düğümü tespit edildiyse bu kesim düğümlerinin ağdan çıkarıldığında KDP'nin amaç fonksiyonuna getireceği azalma hesaplanır (Algoritma 3 – Adım 1-22). Bunun için öncelikle v_i düğümünün bağlı olduğu DFS ağacının kökü bulunur (Algoritma 2 – Adım 3-6). Sonrasında v_i düğümünün ağaçtan çıkarılması ile ağaçtan kopacak v_i düğümünün çocuklarını içeren bağlantılı bileşenlerin toplam boyutu (*value2*) ve bu bileşenlerin toplam KDP amaç fonksiyonu değeri (*value3*) hesaplanır (Algoritma 3 – Adım 7-12). Daha sonra ağaçtan kopan bağlantılı

bileşenlerin toplam boyutu ağacın boyutundan çıkarılarak kalan ağacın boyutu hesaplanır (*value3*) ve bu ağacın KDP amaç fonksiyonu değeri *value1*'e eklenir (Algoritma 3 – Adım 13-14). Dolayısıyla *value1*, v_i düğümünün ağaçtan çıkarıldığı durumdaki KDP amaç fonksiyonu değerine eşit olur. Sonraki adımda hiçbir düğümün ağaçtan çıkarılmadığı durumdaki *value4* (KDP amaç fonksiyonu) ve *value1* farkı ile düğümünün KDP amaç fonksiyonuna getireceği kazanç (*fark*) hesaplanır (Algoritma 3 – Adım 15-16). En büyük fark değerine sahip v_i düğümü kritik düğüm olarak seçilir. Bu işlemler tüm kesim düğümleri için tekrarlanır (Algoritma 3 – Adım 2-21). Eğer ağda kesim düğümü tespit edilmediyse DFS ağaçlarındaki en fazla çocuğu olan düğüm kritik düğüm olarak seçilir (Algoritma 3 – Adım 23-29). Son olarak seçilmiş olan kritik düğüm ağdan çıkarılır (Algoritma 3 – Adım 30). Algoritma 2 ve Algoritma 3 $k/2$ kere tekrarlanarak ağdaki en kritik k adet düğüm tespit edilir.



Şekil 6. Önerilen algoritmanın akış şeması
Figure 6. *The flowchart of the proposed algorithm*

Şekil 6'da TrimCut algoritmasının akış şeması verilmiştir. TrimCut algoritmasında ilk aşamada ağdaki en yüksek bağlantıya sahip düğüm kritik düğüm olarak tespit edilip, ağdan çıkarılır ve bu işlem $k/2$ kere tekrarlanarak ağ seyreltilir. Daha sonra ikinci aşamada seyreltilmiş ağda DFS ağacı/ağaçları ile kesim düğümleri belirlenir ve son aşamada ise oluşturulan ağaçtaki/ağaçlardaki en kritik düğüm belirlenir. İkinci ve üçüncü aşama birbirini takip eden bir birleşik bir süreçtir ve bu süreç $k/2$ kere tekrarlanarak ağdaki en kritik k adet düğüm tespit edilir.

4.1. Karmaşıklık analizi
4.1. Complexity analysis

TrimCut algoritmasının zaman karmaşıklığı aşağıdaki şekildedir.
Teorem 1: TrimCut algoritmasının zaman karmaşıklığı $O(kn^2)$'dir.
İspat: Algoritmanın ilk aşamasında ağdaki en yüksek dereceye sahip düğüm bulunmakta ve bu düğüm ağdan çıkarıldıktan sonra düğümün tüm komşularının dereceleri güncellenmektedir. Önerilen algoritmada her bir düğümün komşularının saklandığı bir veri yapısı kullanılmıştır. Dolayısıyla, seçilen bir düğümün komşularının taranması için $O(\Delta)$ zaman gerekmektedir. En yüksek dereceye sahip düğümün tespiti için ise $O(n)$ zaman gerekmektedir. Dolayısıyla, en yüksek dereceye sahip düğümün tespit edilmesi ve komşu düğümlerinin derecelerinin güncellenmesi için $O(n + \Delta)$ zaman gerekmektedir. Bu adım $k/2$ kere tekrarlanacağından algoritmanın ilk aşaması toplamda $O((k/2)\, x\, (n + \Delta)) = O(kn)$ zaman gerektirmektedir. Algoritmanın ikinci aşamasında DFS ağacı oluşturulur ve kesim düğümleri belirlenir. Bu işlem $O(n + m)$ (DFS ağacının oluşturulması) zaman gerektirir. Algoritmanın son aşamasında ise tüm düğümler taranarak ağdan çıkarılacak düğüm belirlenir. Bu yöntem $O(n^2)$ zaman gerektirir. DFS ağacı oluşturma ve kritik düğümlerin tespiti süreci

$(O(n + m) + O(n^2))$ $k/2$ kere tekrarlanacağından toplamda $O((k/2)\, x\, (n + m + n^2)) = O(kn^2)$ zaman gerekmektedir. Dolayısıyla, algoritmanın tüm aşamaları dikkate alındığında TrimCut algoritmasının zaman karmaşıklığı $O(kn) + O(kn^2) = O(kn^2)$'dir.

5. Hesapsal sonuçlar
5. Computational results

Önerilen algoritmanın performans analizi için 2 farklı veri seti kullanılmıştır. İlk veri seti küçük ölçekli rastgele çizgelerden, ikinci veri seti ise KDP için literatürde kullanılan çizgelerden oluşmaktadır. TrimCut algoritmasının örnekler üzerindeki hata oranları eşitlik 10'daki formül ile hesaplanmıştır.

$$Hata\ Oranı = \left|\frac{bulunan_çözüm - optimal_çözüm}{optimal_çözüm}\right| * 100 \quad (10)$$

İlgili formülde *optimal_çözüm* KDP'nin optimal çözümünün amaç fonksiyonun değeridir. *Bulunan_çözüm* ise TrimCut algoritması tarafından tespit edilen çözümün amaç fonksiyonunun değeridir. Önerilen algoritma C dilinde kodlanmış ve hesapsal sonuçlar Intel Xeon 6 (CPU 3.3 GHz) işlemci ve 32 RAM'e özelliklere sahip bir bilgisayar üzerinde alınmıştır. Önerilen algoritmanın C dili ile yazılmış kaynak koduna https://github.com/Yesim7/TrimCut-Algorithm adresinden erişilebilir.

5.1. Küçük ölçekli çizgeler üzerindeki sonuçlar
5.1. Results on small-scale graphs

Küçük boyutlu çizgelerin KDP için optimal sonuçları doğrusal programlama ile (Veremyev vd. tarafından önerilen formülizasyon kullanılarak) bulunmuştur (Veremyev vd., 2014b). Oluşturulan veri setinde düğüm sayıları 30, 40 ve 50 arasında değişmektedir. Her bir düğüm sayısı için çizgenin yoğunluk (ağdaki mevcut ayrıt sayısının ağda olabilecek tüm maksimum ayrıt sayısına oranı) değeri 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 ve 0.3 (ilgili yoğunluk oranları hem ağların bağlantılılığı hem de gerçek hayat örnekleri dikkate alınarak belirlenmiştir) olmak üzere 5 farklı örnek üretilmiştir.

Tablo 2. $k = 0.05n$ ve $k = 0.1n$ için KDP optimal değerleri ve TrimCut algoritmasının tarafından bulunan çözümlerin KDP amaç fonksiyonu değerleri
Table 2. *The CNP optimal values and the objective function values of the solutions found by the TrimCut algorithm for* $k = 0.05n$ ve $k = 0.1n$

n	***d***	***Optimal***		***TrimCut***		***Hata Oranı***	
		k=0.05n	***k=0.1n***	***k=0.05n***	***k=0.1n***	***k=0.05n***	***k=0.1n***
30	0.1	207	180	207	180	0	0
	0.15	325	300	325	300	0	0
	0.2	351	325	351	325	0	0
	0.25	351	325	351	325	0	0
	0.3	351	325	351	325	0	0
40	0.1	631	529	666	529	0.0555	0
	0.15	666	561	666	561	0	0
	0.2	666	561	666	561	0	0
	0.25	666	595	666	595	0	0
	0.3	666	595	666	595	0	0
50	0.1	990	861	990	903	0	0.049
	0.15	1035	903	1035	946	0	0.048
	0.2	1035	946	1035	946	0	0
	0.25	1035	946	1035	946	0	0
	0.3	1035	946	1035	946	0	0

Tablo 2'de oluşturulan orta boyutlu veri seti üzerinde sırasıyla düğüm sayısının %5 ($k = 2$) ve %10'luk ($k = 3$) k değerleri için KDP'nin optimal amaç fonksiyonu değerleri ve TrimCut algoritmasının sonuçları verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde TrimCut algoritmasının sadece 1 örnekte optimal çözümü bulamadığı görülmektedir. %5'lik k değeri için TrimCut algoritmasının ortalama hata oranı 0.004'tür. Tablo 2

incelendiğinde TrimCut algoritmasının sadece 2 örnekte optimal çözümü bulamadığı görülmektedir. %10'luk *k* değeri için TrimCut algoritmasının ortalama hata oranı 0.006'dır.

5.2. Kütüphane örnekleri üzerindeki sonuçlar
5.2. Results on library samples

Tablo 3'te optimal sonuçları bilinen literatürdeki kütüphane örnekleri üzerinde TrimCut algoritmasının sonuçları verilmiştir. İlgili kütüphane, her biri 4 adet örnek içeren 4 farklı çizge ailesinden oluşmaktadır. Barabasi–Albert (BA) çizgeleri ölçekten bağımsız (scale-free) ağlardır. Forest-Fire (FF) çizgeleri ise bir yangının bir ormanda nasıl yayıldığını taklit ederek, BA çizgeleri gibi ölçekten bağımsız bir yapıya sahip ancak daha yoğun bir yapıdadır. Erdos–Renyi (ER) rastgele çizgelerdir. Son olarak, Watts–Strogatz (WS) küçük-dünya (small world) yapısını taklit edecek şekilde tasarlanmış, daha yoğun bir yapıya sahip çizgelerdir ve KDP için çözülmesi en zor çizge ailesi olarak bilinmektedir. Bu çizgelerden hiçbiri gerçek bir ağın tam bir kopyası olarak düşünülmez. Ancak, gerçek ağlar genellikle her bir ağ türüne ait özelliklerin bir karışımını sergiler (Aringhieri vd., 2016). TrimCut algoritmasının literatürdeki kütüphane örnekleri üzerindeki sonuçları, ilgili örnekler üzerinde sonuçlarını raporlayan mevcut polinom zamanlı algoritmalar (*DFSH-Post* (Edalatmanesh, 2013) *ve GreedyVA* (Ventresca & Aleman, 2015)) ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 3. Optimal sonuçları bilinen literatürdeki kütüphane örnekleri üzerinde algoritmaların KDP amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması
Table 3. *Comparison of the CNP objective function values of the algorithms on benchmark instances in the literature with known optimal results*

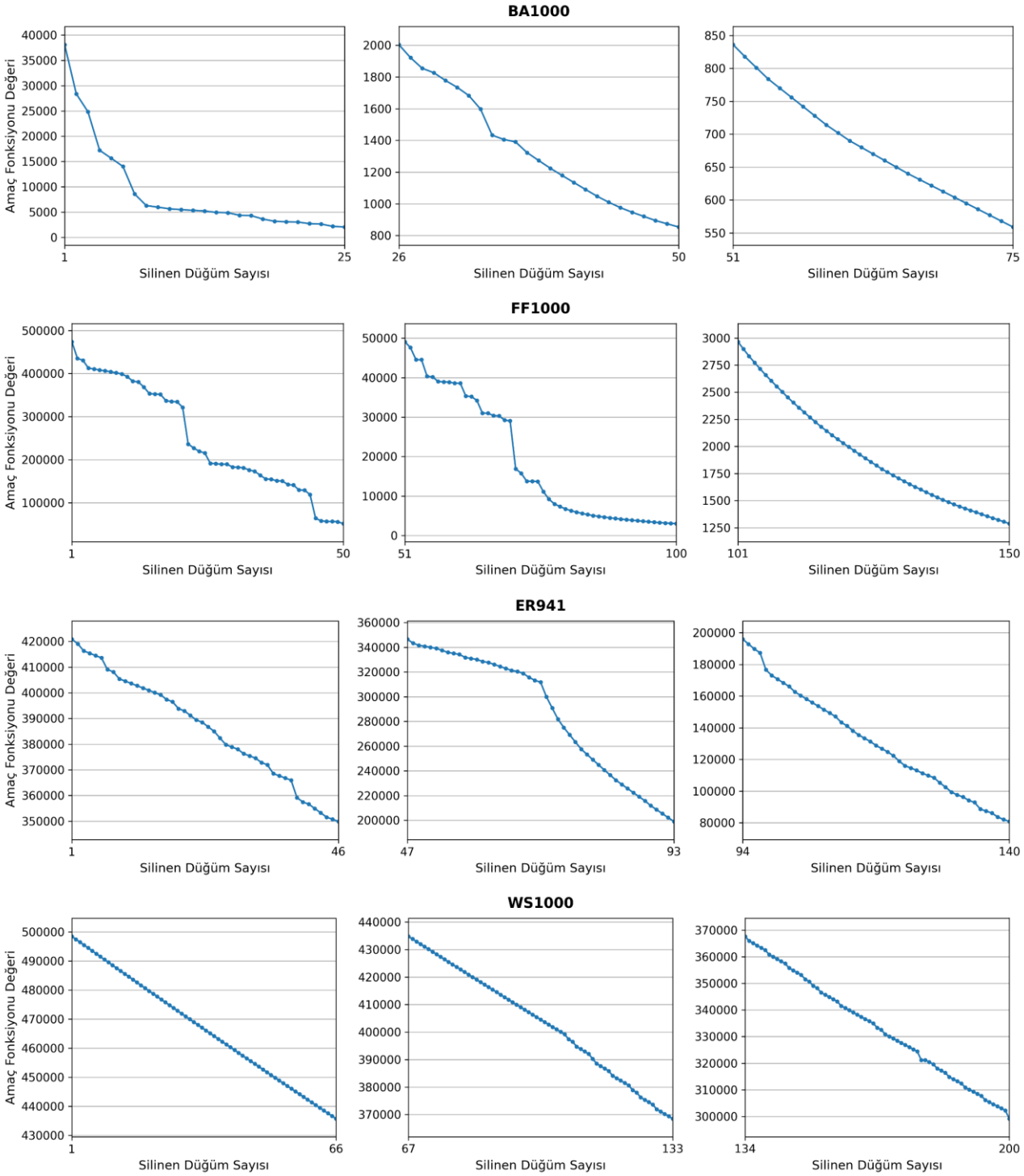
Instance	*n*	*k*	*Optimal*	*DFSH-Post*	*Hata Oranı*	*GreedyVA*	*Hata Oranı*	*TrimCut*	*Hata Oranı*
BA	500	50	195	203	0.041	199	0.021	199	0.021
BA	1000	75	558	580	0.039	559	0.002	559	0.002
BA	2500	100	3704	4292	0.159	3726	0.006	3722	0.005
BA	5000	150	10196	12273	0.204	10216	0.002	10199	0.001
FF	250	50	194	302	0.557	217	0.119	199	0.026
FF	500	110	257	344	0.339	293	0.140	269	0.047
FF	1000	150	1260	1880	0.492	1414	0.122	1288	0.022
FF	2000	200	4545	7432	0.635	5002	0.101	4793	0.055

Tablo 3 incelendiğinde BA çizge ailesi için tüm algoritmaların kaliteli sonuçlar ürettiği görülmektedir. Ancak FF çizge ailesi için DFSH-Post ve GreedyVA algoritmalarının çözümlerinin optimal çözümden uzaklaştığı görülmektedir. Buna karşın geliştirilen TrimCut algoritması FF çizge ailesi için de optimal çözüme yakın çözümler bulmaktadır. BA çizge ailesi için DFSH-Post, GreedyVA ve TrimCut algoritmalarının ortalama hata oranları sırasıyla 0.111, 0.008 ve 0.007'dir. FF çizge ailesi içinse DFSH-Post, GreedyVA ve TrimCut algoritmalarının ortalama hata oranları sırasıyla 0.506, 0.12 ve 0.037'dir. Tablo 3'teki sonuçlar incelendiğinde TrimCut algoritmasının optimal değeri bilinen kütüphane örnekler üzerindeki hata oranının %6'yı geçmediği görülmektedir.

Tablo 4. Optimal sonuçları bilinmeyen literatürdeki kütüphane örnekleri üzerinde algoritmaların KDP amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması
Table 4. *Comparison of the CNP objective function values of the algorithms on benchmark instances in the literature with unknown optimal results*

Instance	*n*	*k*	*DFSH-Post*	*GreedyVA*	*TrimCut*
ER	235	50	1144	3011	362
ER	466	80	19952	28994	16213
ER	941	140	114166	116135	80834
ER	2344	200	1606656	1395584	1434375
WS	250	70	16110	16110	14878
WS	500	125	55163	69751	46589
WS	1000	200	319600	319600	299154
WS	1500	265	653015	761995	366231

Tablo 4'te optimal sonuçları bilinmeyen kütüphane örnekleri üzerinde DFSH-Post, GreedyVA ve TrimCut algoritmalarının sonuçları verilmiştir. İlgili tablo incelendiğinde TrimCut algoritmasının tüm örnekler için rakiplerinden çok daha kaliteli çözümler ürettiği görülmektedir. ER çizge ailesi için DFSH-Post, GreedyVA ve TrimCut algoritmalarının sonuçlarının ortalamaları sırasıyla 435478.75, 385931 ve 382946'dır. WS çizge ailesi içinse DFSH-Post, GreedyVA ve TrimCut algoritmalarının sonuçlarının ortalamaları sırasıyla 260972, 291864 ve 181713'tür.



Şekil 7. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri – silinen düğüm sayısı grafikleri.
Figure 7. *The objective function values vs the number of deleted nodes in the proposed algorithm.*

Şekil 7 her bir çizge ailesinin bir örneği üzerinde TrimCut algoritmasının silinen düğüm sayısına göre elde ettiği KDP amaç fonksiyonu değerlerini göstermektedir. BA1000 ve FF1000 ağlarından az sayıda düğümün çıkarılmasıyla amaç fonksiyon değerinde hızlı bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu durum söz konusu ağların

nispeten daha az dirençli yapıya sahip olduğunu göstermektedir. ER941 ağında ise amaç fonksiyon değerindeki düşüşün kademeli olduğu görülürken, WS1000 ağında bu azalmanın, silinen düğüm sayısıyla doğrusal bir ilişki sergilediği söylenebilir. Bu sonuçlar farklı ağ tiplerinin topolojik özelliklerinin, ağların düğüm kayıplarına karşı dayanıklılıklarını etkilediğini göstermektedir.

Tüm sonuçlar incelendiğinde GreedyVA ve TrimCut algoritmalarının hata oranlarının DFSH-Post'tan daha iyi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, GreedyVA ve TrimCut algoritmalarının zaman karmaşıklıkları da DFSH-Post algoritmasının zaman karmaşıklığından daha düşüktür. Bu sebeple GreedyVA ve TrimCut algoritmalarının çalışma süreleri kıyaslanmış ve raporlanmıştır. Tablo 5 kütüphane örnekleri üzerinde GreedyVA ve TrimCut algoritmasının çalışma zamanlarını kıyaslamaktadır (GreedyVA algoritmasının kaynak kodu çalışmanın yazarlarından temin edilmiştir). Tablodaki sonuçlar incelendiğinde GreedyVA'nın TrimCut algoritmasına göre ortalama 1.3 kat daha fazla çalışma zamanına ihtiyaç duyduğu görülmektedir.

Çalışmada karşılaştırılan algoritmalar incelendiğinde, DFSH-Post'un zaman karmaşıklığı $O(nm + nlogn)$, GreedyVA'nın zaman karmaşıklığı $O(k(nm + nlogn))$ ve TrimCut algoritmasının zaman karmaşıklığı $O(k(nm + nlogn))$'dir. Bu 3 algoritma da temel DFS yöntemini kullanmakta, ancak düğümlerin kritikliklerinin belirlenmesi için farklı seçim mekanizmaları kullanmaktadır. DFSH-Post algoritmasında tek bir DFS ağacı oluşturulup, önerilen skorlama mekanizmaları ile k adet kritik düğüm tespit edilmektedir. GreedyVA algoritmasında ise DFS ağacı k kere oluşturulup, her bir ağaçtaki en yüksek skora sahip kesim düğümü ya da sıradan bir düğüm kritik düğüm olarak seçilir. GreedyVA algoritmasının en büyük dezavantajlardan biri kesim düğümü olmayan çizgelerde çözüm kalitesinin düşmesidir. Bu eksikliği gidermek adına önerilen algoritmada ilk olarak en yüksek dereceye sahip $k/2$ düğüm kritik düğüm olarak belirlenir ve çizgeden çıkarılır. Daha sonra seyreltilmiş çizgede kesim düğümleri önceliklendirilerek kritik düğümler araştırılır. Bu süreçte $k/2$ kere DFS ağacı oluşturulup, her bir ağaçtan/ormandan bir kritik düğüm seçilir. Dolayısıyla, GreedyVA ve TrimCut algoritmalarının iterasyon sayıları eşit olmakla birlikte, GreedyVA TrimCut algoritmasına göre $k/2$ ekstra DFS ağacı oluşturmaktadır. Bu da algoritmanın işlem maliyetini yükseltmektedir. Bu yaklaşım farkı, Tablo 5'te verilen değerlerin sebebini oluşturmaktadır.

Tablo 5. Algoritmaların çalışma sürelerinin (saniye) karşılaştırılması
Table 5. *Comparing the run times (in seconds) of the algorithms*

Instance	***n***	***k***	***GreedyVA***	***TrimCut***
BA	500	50	0.089	0.069
BA	1000	75	0.531	0.401
BA	2500	100	4.182	3.135
BA	5000	150	24.243	18.329
FF	250	50	0.022	0.016
FF	500	110	0.174	0.138
FF	1000	150	0.936	0.723
FF	2000	200	4.789	3.702
ER	235	50	0.019	0.014
ER	466	80	0.115	0.084
ER	941	140	0.623	0.606
ER	2344	200	7.150	5.341
WS	250	70	0.027	0.021
WS	500	125	0.179	0.141
WS	1000	200	1.094	0.884
WS	1500	265	3.275	2.603

6. Sonuç
6. Conclusion

Bu çalışmada, KDP için büyük ölçekli ağlarda optimale yakın çözümler sunmak amacıyla TrimCut algoritması geliştirilmiştir. KDP'nin ağ dayanıklılığı ve zayıflıklarının tespiti gibi önemli uygulama alanlarına sahip olduğu göz önüne alındığında, önerilen algoritma sosyal ağlar, biyolojik ağlar, telekomünikasyon ağları ve kablosuz çok sekmeli ağlar gibi farklı ağ yapıları üzerinde uygulanabilir. Algoritmanın temel yaklaşımı, öncelikle yüksek dereceli düğümlerin çıkartırılarak ağın seyreltilmesi ve ardından DFS ile kesim düğümlerini

önceliklendirilerek kritik düğümlerin tespit edilmesi üzerine kuruludur. Gerçekleştirilen deneyler, TrimCut algoritmasının literatürdeki diğer polinom zamanlı algoritmalarla karşılaştırıldığında daha iyi performans sergilediğini ve hata oranının %6'nın altında olduğunu göstermiştir. Özellikle büyük ölçekli ağlarda, algoritmanın hem hesaplama süresi açısından verimli olduğu hem de çözüm kalitesi bakımından tatmin edici sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, ağ güvenilirliği ve zayıf noktaların tespit edilmesi konularında yeni yaklaşımlar sunarken, gelecekteki çalışmalar için de potansiyel araştırma alanları sunmaktadır. Özellikle, farklı ağ yapılarında zayıflıkların tespit edilmesi ve algoritmanın daha da geliştirilmesi, ileride yapılacak çalışmalar için önemli katkılar sağlayabilir.

Teşekkür
Acknowledgement

Bu çalışma TÜBİTAK 3501 programı tarafından (121F092) desteklenmiştir. Y. Aygül, BİDEB 2211-A programı kapsamında verdiği burs desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

Yazar katkısı
Author contribution

Yazarlardan Onur UĞURLU makale yazımının düzenlenmesinde, teorik çerçeve oluşturma ve yazım aşamasında katkı sağlamıştır. Yeşim AYGÜL literatür taraması, algoritmanın veri seti üzerinde test edilmesinde, ilgili tablo ve şekillerin düzenlenmesinde yer almıştır.

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

Akram, V. K., & Ugurlu, O. (2023). Detecting the most vital articulation points in wireless multi-hop networks. IEEE/ACM Transactions on Networking. https://doi.org/10.1109/TNET.2023.3308142

Aringhieri, R., Grosso, A., Hosteins, P., & Scatamacchia, R. (2016). Local search metaheuristics for the critical node problem. Networks, 67(3), 209–221. https://doi.org/10.1002/net.21671

Aringhieri, R., Grosso, A., Hosteins, P., & Scatamacchia, R. (2016). A general evolutionary framework for different classes of critical node problems. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 55, 128–145. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.06.010

Arulselvan, A., Commander, C. W., Elefteriadou, L., & Pardalos, P. M. (2009). Detecting critical nodes in sparse graphs. Computers & Operations Research, 36(7), 2193–2200. https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.08.016

Block, P., Hoffman, M., Raabe, I. J., Dowd, J. B., Rahal, C., Kashyap, R., & Mills, M. C. (2020). Social network-based distancing strategies to flatten the COVID-19 curve in a post-lockdown world. Nature Human Behaviour, 4(6), 588–596. https://www.nature.com/articles/s41562-020-0898-6

Borgatti, S. P. (2006). Identifying sets of key players in a social network. Computational and Mathematical Organization Theory, 12(1), 21–34. https://doi.org/10.1177/0160017607308679

Cobanlar, M., Yildiz, H. U., Akram, V. K., Dagdeviren, O., & Tavli, B. (2022). On the tradeoff between network lifetime and k-connectivity-based reliability in UWSNs. IEEE Internet of Things Journal, 9(23), 24444-24452.

Commander, C. W., Pardalos, P. M., Ryabchenko, V., Uryasev, S., & Zrazhevsky, G. (2007). The wireless network jamming problem. Journal of Combinatorial Optimization, 14(4), 481–498. https://link.springer.com/article/10.1007/s10878-007-9071-7

Dagdeviren, O., Akram, V. K., & Tavli, B. (2018). Design and evaluation of algorithms for energy efficient and complete determination of critical nodes for wireless sensor network reliability. IEEE Transactions on Reliability, 68(1), 280-290.

Di Summa, M., Grosso, A., & Locatelli, M. (2012). Branch and cut algorithms for detecting critical nodes in undirected graphs. Computational Optimization and Applications, 53(3), 649–680. https://link.springer.com/article/10.1007/s10589-012-9458-y

Diestel, R. (2012). Graph theory (4th ed., Vol. 173). Graduate Texts in Mathematics, Springer.

Dinh, T. N., & Thai, M. T. (2011). Precise structural vulnerability assessment via mathematical programming. In Military Communications Conference, IEEE, 1351–1356. https://doi.org/10.1109/MILCOM.2011.6127492

Dinh, T. N., Xuan, Y., Thai, M. T., Park, E., & Znati, T. (2010). On approximation of new optimization methods for assessing network vulnerability. In INFOCOM Proceedings IEEE, 1–9. https://doi.org/10.1109/INFCOM.2010.5462098

Edalatmanesh, M. (2013). Heuristics for the critical node detection problem in large complex networks. Ph.D. dissertation, Faculty of Mathematics and Science, Brock University, St. Catharines, Ontario. http://hdl.handle.net/10464/4984

Grubesic, T. H., Matisziw, T. C., Murray, A. T., & Snediker, D. (2008). Comparative approaches for assessing network vulnerability. International Regional Science Review, 31(1), 88–112. https://doi.org/10.1177/0160017607308679

Jhoti, H., & Leach, A. R. (2007). Structure-based drug discovery (1st ed.). Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/1-4020-4407-0

Krebs, V. (2002). Uncloaking terrorist networks. First Monday, 7(4), 1–7. https://doi.org/10.5210/fm.v7i4.941

Lalou, M., Tahraoui, M. A., & Kheddouci, H. (2018). The critical node detection problem in networks: A survey. Computer Science Review, 28, 92-117.

Lewis, J. M., & Yannakakis, M. (1980). The node-deletion problem for hereditary properties is NP-complete. Journal of Computer and System Sciences, 20(2), 219–230. https://doi.org/10.1016/0022-0000(80)90060-4

Liljefors, T., Krogsgaard-Larsen, P., & Madsen, U. (2002). Textbook of drug design and discovery (3rd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b12381

Ovelgonne, M., Kang, C., Sawant, A., & Subrahmanian, V. (2012). Covertness centrality in networks. In Advances in Social Networks Analysis and Mining, ASONAM, IEEE, 863–870. https://doi.org/10.1109/ASONAM.2012.156

Purevsuren, D., Cui, G., Win, N. N. H., & Wang, X. (2016). Heuristic algorithm for identifying critical nodes in graphs. Advanced Computer Science: International Journal, 5(3), 1–4. https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.02.006

Tomaino, V., Arulselvan, A., Veltri, P., & Pardalos, P. M. (2012). Studying connectivity properties in human protein–protein interaction network in cancer pathway. In Data Mining for Biomarker Discovery, Springer, 187–197. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-2107-8_10

Ugurlu, O. (2023). ADA-PC: An asynchronous distributed algorithm for minimizing pairwise connectivity in wireless multi-hop networks. Computer Networks, 227, 109703. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109703

Ventresca, M. (2012). Global search algorithms using a combinatorial unranking-based problem representation for the critical node detection problem. Computers & Operations Research, 39(11), 2763–2775. https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.02.008

Ventresca, M., & Aleman, D. (2014). A derandomized approximation algorithm for the critical node detection problem. Computers & Operations Research, 43, 261–270. https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.09.012

Ventresca, M., & Aleman, D. (2015). Efficiently identifying critical nodes in large complex networks. Computational Social Networks, 2(6), 1–12. https://computationalsocialnetworks.springeropen.com/articles/10.1186/s40649-015-0010-y

Veremyev, A., Boginski, V., & Pasiliao, E. L. (2014a). Exact identification of critical nodes in sparse networks via new compact formulations. Optimization Letters, 8(4), 1245–1259. https://link.springer.com/article/10.1007/s11590-013-0666-x

Veremyev, A., Prokopyev, O. A., & Pasiliao, E. L. (2014b). An integer programming framework for critical elements detection in graphs. *Journal of Combinatorial Optimization*, *28*, 233-273. https://link.springer.com/article/10.1007/s10878-014-9730-4

Veremyev, A., Prokopyev, O. A., & Pasiliao, E. L. (2015). Critical nodes for distance-based connectivity and related problems in graphs. Networks, 66(3), 170–195. https://doi.org/10.1002/net.21622

Yannakakis, M. (1981). Node-deletion problems on bipartite graphs. SIAM Journal on Computing, 10(2), 310–327. https://doi.org/10.1137/0210022

Zhou, Y., Hao, J. K., & Glover, F. (2019). Memetic search for identifying critical nodes in sparse graphs. IEEE Transactions on Cybernetics, 49(10), 3699–3712. https://doi.org/10.1109/TCYB.2018.2848116

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 533-544 doi: 10.17714/gumusfenbil.1617222 Research Article

A comparative analysis of microbial, chemical composition, and quality parameters in Kürtün-Araköy and Gümüşhane breads

Kürtün-Araköy ve Gümüşhane ekmeklerinde mikrobiyal, kimyasal bileşim ve kalite parametrelerinin karşılaştırmalı analizi

Büşra ÇİMEN[1], Fırat YILMAZ*[1]

[1]*Gumushane University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Food Engineering, 29100 Gumushane, Türkiye*

• Received: 10.01.2025 • Accepted: 15.05.2025

Abstract

The objective of this study was to ascertain the distinguishing characteristics of Kürtün-Araköy bread and Gümüşhane bread, two local breads produced in Gümüşhane province in the Eastern Black Sea region. Furthermore, the bread dough samples employed in bread production were subjected to microbiological analyses. It was determined that the number of microorganisms in the sourdough samples used in the production of Gümüşhane bread was high ($P<0.001$). In this context, breads sold in the Gümüşhane province were collected and subjected to a series of analyses. These included chemical, microbiological, colour and HMF analyses of the bread samples. As a result of microbiological analyses performed on bread samples; It was observed that there were statistical differences in terms of lactic acid bacteria on MRS agar and yeast-mold counts. However, based on the chemical analyses performed on the bread samples, it was determined that there were statistically significant differences between the bread samples. The resulting data were then subjected to statistical analyses, with the objective of determining the differences between the bread samples. This was achieved through the use of PCA analysis, which also enabled the determination of the significance levels of these differences. In addition, the relationship between the colour values of the bread samples and the amount of HMF was also investigated in this study. The findings indicated that as the L^* and b^* colour values decreased, the HMF content of the bread samples increased. In this study, it was determined that Kürtün-Araköy and Gümüşhane breads have distinctive characteristics.

Keywords: Bread, Chemical analysis, HMF, Microbiological analysis, Principal companent analysis (PCA)

Öz

Bu çalışmanın amacı, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde Gümüşhane ilinde üretilen iki yerel ekmek olan Kürtün Araköy ekmeği ve Gümüşhane ekmeğinin ayırt edici özelliklerini tespit etmektir. Ayrıca, ekmek üretiminde kullanılan ekmek hamuru örnekleri mikrobiyolojik analizlere tabi tutulmuştur. Gümüşhane ekmeğinin üretiminde kullanılan hamur mayası örneklerindeki mikroorganizma sayısının düzeyde yüksek olduğu belirlenmiştir ($P<0.001$). Bu kapsamda Gümüşhane ilinde satılan ekmekler toplanmış ve bir dizi analize tabi tutulmuştur. Bunlar arasında ekmek örneklerinin kimyasal, mikrobiyolojik, renk ve HMF analizleri yer almaktadır. Ekmek örneklerinde yapılan mikrobiyolojik analizler sonucunda; MRS agarda gelişen laktik asit bakteri ve maya-küf sayıları bakıından istatistiksel farklılıkların olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte; ekmek örnekleirnde yapılan kimyasal analizler doğrultusunda, ekmek örnekleri arasında istatistiksel önemli farklılıkların olduğu belirlenmiştir. Elde edilen veriler daha sonra ekmek örnekleri arasındaki farklılıkları belirlemek amacıyla istatistiksel analizlere tabi tutulmuştur. Bu da PCA analizi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu farklılıkların anlamlılık düzeylerinin belirlenmesini sağlamıştır. Ayrıca, bu çalışmada ekmek örneklerinin renk değerleri ile HMF miktarı arasındaki ilişki de araştırılmıştır. Ekmek örneklerinin L ve b* renk değerleri azaldıkça, ekmek örneklerinin HMF miktarının arttığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada Kürtün-Araköy ve Gümüşhane ekmeklerinin ayırt edici özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.*

Anahtar kelimeler: *Ekmek, Kimyasal analiz, HMF, Mikrobiyolojik analiz, Başlıca bileşen analizi (PCA)*

*Fırat YILMAZ; asst.prof.firatyilmaz@gmail.com

1. Introduction

Bread is a dietary staple in Turkey, with a significant proportion of the population consuming it on a daily basis (Taşçı et al., 2017). It constitutes an important source of energy and a fundamental element of the national diet. Türkiye is renowned for its extensive assortment of breads, many of which are crafted using traditional methods that are unique to specific regions (Köten & Ünsal, 2007). These local breads possess distinctive characteristics, including the utilisation of locally sourced ingredients, bespoke baking techniques, artisanal expertise, and region-specific equipment. They are officially registered as a geographical indication. Two examples of geographically labelled breads from the Gümüşhane region are the Gümüşhane Bread and the Kürtün-Araköy bread. Gümüşhane Bread is characterised by a round shape and a long shelf life, which can be attributed to the use of sourdough and baking in stone ovens with forest products as fuel. Kürtün-Araköy bread is free from additives and exhibits a distinctive texture resulting from the fermentation process, which creates air pockets. It is traditionally baked in stone ovens and has a longer shelf life than other breads (Şen & Ekinci, 2020).

The Turkish Patent Institute has granted geographical indication status to several breads originating from the Eastern Black Sea region, thereby underscoring their significance at the local level (Şen & Ekinci, 2020). The process of sourdoughing, which has been employed for centuries, is of paramount importance in the production of bread with the desired qualities, including volume, texture, flavour, nutritional value and shelf life (Poutanen et al., 2009). In traditional sourdough, a combination of wild yeasts, lactic acid bacteria, citric acid bacteria, acetic acid bacteria, and cultured yeasts work in concert to ferment the dough (Behera & Ray, 2015). The natural sourdough flora is primarily composed of heterofermentative and homofermentative lactic acid bacteria and yeasts belonging to genera such as *Lactobacillus*, *Saccharomyces*, and *Candida*. The interaction between these microorganisms is responsible for the distinctive characteristics of sourdough bread, including its flavour, acidity, and elasticity. Furthermore, the sourdough process is a crucial factor in developing the distinctive taste of sourdough bread through the release of flavours during fermentation (Şahin & Meral, 2012).

Lactic acid bacteria exert a considerable influence on the expansion, resilience, acidity, and flavour of bread. Lactobacillus, a specific type of lactic acid bacteria, is of particular importance in the bread industry due to its distinctive metabolic properties. Sourdough bread, which contains beneficial microorganisms, may be considered a probiotic product. The most commonly occurring bacteria in sourdough are *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus rhamnosus*, *Leuconostoc* mesenteroides, and *Pediococcus spp.* Conversely, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus sanfranciscensis*, and *Lactobacillus fermentum* are employed in the production of traditional breads. Additionally, yeast species such as *Saccharomyces cerevisiae* and *Saccharomyces exigus* are present in sourdough (Gerçekaslan et al., 2012; Çifci, 2017). The presence of lactic acid bacteria is of paramount for the controlled and safe fermentation process in bread production, as they exert a profound influence on the quality of the final product in a number of ways, including lactic acid formation, proteolytic activity, phage resistance, and bacteriocin production (Göçmen, 2001).

The accurate detection, isolation and identification of microflora are essential for the study of sourdough in order to identify the most suitable microflora for bread production. The presence of rope disease and mould can result in microbiological spoilage of bread (Bakırcı & Köse, 2017). This may be caused by the use of unsuitable raw materials, inadequate hygiene standards, or contamination throughout the production process. To circumvent this issue, chemical preservatives and lactic starter cultures are frequently employed (Menteş et al., 2004).

Nevertheless, the baking of bread at elevated temperatures can result in the formation of hydroxymethylfurfural (HMF), a chemical compound that has the potential to impact the quality, safety, and human health of the food product (Türker & Elgün, 1998). The formation of HMF is a consequence of the exposure of carbohydrates to elevated temperatures or prolonged storage periods. This can occur as a result of processes such as the Maillard reaction and caramelisation. It is particularly prevalent in heat-treated foods that contain fructose and glucose. Therefore, it is essential to regulate HMF formation in order to produce bread of the highest quality for consumer health (Civelek et al., 2024).

HMF is acknowledged as a highly toxic substance with the capacity to induce mutations, carcinogenesis and cytotoxicity. The accumulation of HMF is an indicator of deterioration in food quality, which can be attributed to improper storage or processing. This has resulted in the monitoring of HMF levels in the food industry and

the implementation of rigorous regulatory measures. The Consumer Food Codex imposes restrictions on the levels of these compounds permitted in foodstuffs, given that they are formed through heat treatment (Gülcan, 2017).

The aim of this study was to investigate the quality parameters of Kürtün-Araköy and Gümüşhane breads produced in Gümüşhane province and to determine the differences between the breads based on the data obtained.

2. Material and method

2.1. Material

In this context, a total of 30 bread samples (15 Gümüşhane bread (GB) and 15 Kürtün-Araköy bread (KAB) and 8 dough samples (4 Gümüşhane bread dough (GB-D) and 4 Kürtün-Araköy bread dough (KAB-D)) obtained from the market in Gümüşhane province were subjected to examination for their microbiological and chemical properties.

2.2. Method

2.2.1. Preparation of samples

Ten grams of each collected bread and dough sample were transferred to sterile special bags under aseptic conditions and homogenised in a stomacher device for five minutes by adding 90 ml of 0.85% physiological saline. This resulted in a dilution of 10^{-1}, and the bread and dough samples were diluted up to 10^{-5} for microbiological analysis (Certel et al., 2009).

2.2.2. Microbiological analyses

The total mesophilic aerobic bacteria (TAMB) counts were determined by inoculating diluted samples onto Plate Count Agar (PCA) and enumerating the resulting colonies after incubation (Halkman, 2005, 2007). The enumeration of lactic acid bacteria (LAB) on MRS agar was conducted using the smear method under anaerobic conditions, and the resulting colonies were counted. The same methodology was employed for the enumeration of LAB on M17 agar (Hendek Ertop, 2017; Cebeci & Doğan, 2021). For the enumeration of yeast and moulds, diluted samples were inoculated on Potato Dextrose Agar (PDA) incubated for 5 days (Halkman, 2005; Erginkaya et al., 2016). For the enumeration of coliform bacteria, samples were transferred to Violet Red Bile Agar (VRBA) and incubated at 37°C for 24 hours. At the end of incubation, colonies with a diameter of 0.5 mm or larger and showing a dark red colour were identified as coliforms and counted (Morul & İşleyici, 2012).

2.2.3. Chemical and HMF analyses

Dry matter analysis was carried out by weighing 3 g of the homogenised sample and drying at 105°C until a constant weight was obtained (Elgün & Ertugay, 2002). In order to ascertain the ash content, a quantity of 2 g of the sample was subjected to incineration at a temperature of approximately 550°C until a white residue was produced (Demirci, 2019). For the analysis of protein content, the Kjeldahl method was used, in which 1 g of sample was digested with concentrated sulfuric acid and a digestion tablet. The ammonia obtained from the distillation was kept in boric acid and the resulting distillate was titrated with 0.1N HCl (Gamlı, 2022). The pH of the bread samples was determined by immersing a pH electrode in a homogenised sample, in accordance with the AOAC 943.02 method (Akgün, 2007; Gamlı, 2022). In addition, acidity was determined by homogenising 10 g of sample with water and titrating with 0.1 N NaOH solution (Gamlı, 2022).

In this study, the HMF content of bread samples was determined by HPLC chromatography. The method applied by Zappalà et al. (2005) was used to determine the HMF content of the samples. To 10 g of bread sample, 5 mL of deionised water was added followed by 1 mL of Carrez I and Carrez II solutions. After a one minute mixing time, the mixture was centrifuged and the clear supernatant was then transferred to a separate tube. The volume was then adjusted to 10 mL with deionised water. The supernatant was passed through a 0.45 micrometre diameter injector filter into vials. Chromatography was performed using a C18 column and a

DAD detector at 280 nm wavelength. Acetonitrile:water (5:1) was used as mobile phase in the HPLC system and the column oven temperature was set to 32°C. A standard curve was prepared using the HMF standard and the amount of HMF in the sample was calculated according to this standard curve.

2.2.4. Colour measurement

A colour measurement instrument (Konica, Minolta, Tokyo, Japan) was used for colour analysis. Three parallel measurements were made separately on the outer and inner parts of the bread samples and these parallels were averaged. The instrument measured *L**, *a** and *b** values on the crust and inner parts of the samples. The *L** value is known as darkness-lightness, the *a** value as green-red intensity and the *b** value as yellow-blue intensity (Elgün et al., 2002).

2.2.5. Statically analyses

The statistical analysis of the data obtained in the study was conducted using the IBM SPSS 22 software program. A one-way ANOVA test was conducted on all data sets to ascertain the differences between the sample groups. PCA and correlation analysis were performed using the XLSTAT program.

3. Result and discussion

3.1. Microbiological analysis

The results of the microbiological analysis in dough samples of KAB and GB were presented in Table 1. The results of the analyses demonstrated statistically significant differences between the microbiological values of the bread doughs. The microbiological results of the Gümüşhane bread dough samples were found to be higher than those of the Kürtün-Araköy bread dough samples. Furthermore, the utilisation of solely traditional sourdough in KAB-D and the combination of sourdough with fresh baker's yeast in GB-D may have proved an efficacious approach with regard to LAB and yeast counts. The number of lactic acid bacteria (LAB) and yeast varied depending on the fermentation process. In a further study by Çetin et al. (2021) investigated the impact of yam powder supplementation on sourdough fermentation. Their findings indicated that the number of lactic acid bacteria (LAB) increased with the addition of yam powder, although higher rates of supplementation resulted in a reduction in the LAB count. Moreover, Alver Oral (2016) conducted an analysis of breads produced by the addition of kefir to sourdough and wet yeast combinations. The microbiological analysis revealed notable discrepancies between the dough samples, which could be attributed to alterations in the raw materials and fermentation processes. In a previous study (Akgün, 2007), the effects of sourdough powder on bread production were investigated by fermenting dough with combinations of fresh yeast and a lactic starter.

Table 1. Microbiological analysis results of dough samples

Sample	TAMB		LAB on MRS		LAB on M17		Yeast-Mould	
	KAB-D	GB-D	KAB-D	GB-D	KAB-D	GB-D	KAB-D	GB-D
1	7.17±0.05	7.98±0.25	6.96±0.07	8.48±0.13	7.07±0.09	8.42±0.01	6.80±0.13	7.81±0.12
2	6.70±0.20	8.16±0.08	6.91±0.11	8.26±0.25	7.01±0.07	8.39±0.02	6.33±0.37	8.03±0.03
3	7.11±0.16	8.07±0.01	6.94±0.12	8.08±0.10	6.97±0.02	8.16±0.07	6.86±0.14	7.89±0.01
4	7.10±0.02	7.65±0.16	7.10±0.05	7.95±0.08	7.19±0.03	7.87±0.08	6.63±0.09	7.41±0.36
Means	**7.02±0.20^{A}**	**7.96±0.23^{B}**	**6.98±0.11^{A}**	**8.19±0.25^{B}**	**7.06±0.10^{A}**	**8.21±0.23^{B}**	**6.65±0.28^{A}**	**7.79±0.29^{B}**
Anova *P*-Sample	***0.000***		***0.000***		***0.000***		***0.000***	

KAB-D: Kürtün-Araköy Bread Dough, GB-D: Gümüşhane Bread Dough, TAMB: Total Aerobic Mesophilic Bacteria, LAB: Lactic Acid Bacteria

Microbiological analysis results of KAB and GB samples were given in **Table 2.** The TAMB count of KAB samples exhibited a range of 1.99 to 4.01 log cfu/g, with an average of 2.59 log cfu/g. In comparison, the TAMB count of GB samples ranged from 1.99 to 3.21 log cfu/g, with an average of 2.68 log cfu/g. The maximum total aerobic mesophilic bacteria count in bread was found to be 7 log cfu/g, which was not exceeded in KAB and GB samples. In a separate study (Postoğlu, 2018), the TAMB count in sourdough bread samples was 1.99 log cfu/g, which was lower than the average values observed in KAB and GB samples. Furthermore, the TAMB count in normal and wholemeal breads was observed to be affected by different storage conditions (Certel et al., 2009), the impact of diverse storage conditions on the quality of both standard and wholemeal breads produced with soluble dry yeast was investigated.

Table 2. Microbiological analysis results of bread samples

Sample	TAMB		LAB on MRS agar		LAB on M17 agar		Yeast-Mould		Coliform	
	KAB	GB	KAB	GB	KAB	GB	KAB	GB	KAB	GB
1	2.82±0.02	2.97±0.33	3.00±0.00	< 2	2.30±0.00	< 2	< 2	< 2	< 1	< 1
2	2.80±0.10	2.97±0.33	2.78±0.24	< 2	2.48±0.00	< 2	< 2	< 2	< 1	< 1
3	3.98±0.05	2.49±0.29	4.12±0.10	< 2	3.71±0.07	2.00±0.00	< 2	< 2	< 1	< 1
4	2.80±0.05	2.66±0.33	< 2	< 2	<2	< 2	< 2	< 2	< 1	< 1
5	< 2	2.82±0.09	< 2	< 2	2.00±0.00	2.00±0.00	< 2	< 2	< 1	< 1
6	2.90±0.05	3.21±0.24	3.73±0.27	< 2	2.00±0.00	2.84±0.06	< 2	< 2	< 1	< 1
7	2.09±0.10	2.69±0.31	< 2	< 2	<2	2.48±0.00	2.33±0.33	< 2	< 1	< 1
8	2.00±0.00	2.43±0.44	< 2	< 2	<2	< 2	2.32±0.33	< 2	< 1	< 1
9	4.01±0.01	2.59±0.30	3.15±0.01	< 2	3.88±0.02	2.00±0.00	2.86±0.13	< 2	< 1	< 1
10	2.32±0.16	2.79±0.12	< 2	< 2	<2	2.00±0.00	2.32±0.33	< 2	< 1	< 1
11	2.40±0.20	< 2	< 2	< 2	<2	< 2	2.32±0.33	2.00±0.00	< 1	< 1
12	< 2	2.75±0.15	< 2	< 2	<2	2.60±0.00	2.66±0.33	< 2	< 1	< 1
13	< 2	2.96±0.06	< 2	< 2	<2	2.83±0.12	2.32±0.33	< 2	< 1	< 1
14	2.20±0.10	2.09±0.10	< 2	< 2	<2	< 2	2.66±0.33	< 2	< 1	< 1
15	2.63±0.03	2.84±0.18	< 2	< 2	<2	2.20±0.10	2.32±0.33	2.30±0.00	< 1	< 1
Mean	**2.59±0.10^{A}**	**2.68±0.07^{A}**	**2.45±0.11^{B}**	**< 2^{A}**	**2.29±0.09^{A}**	**2.19±0.05^{A}**	**2.27±0.07^{B}**	**2.01±0.01^{A}**	**< 1**	**< 1**
Anova	***0.459***		***0.000***		***0.377***		***0.000***		-	
P-Sample										

KAB: Kürtün Araköy Bread, GB: Gümüşhane Bread, TAMB: Total Aerobic Mesophilic Bacteria, LAB: Lactic Acid Bacteria, $^{A-C}$: Capital letter indicates the difference between the samples

The findings revealed that the TAMB number was 1.15 log cfu/g in the case of standard bread and 1.92 log cfu/g in wholemeal bread. The lactic acid bacteria (LAB) count in KAB samples ranged from 1.99 to 4.12 log cfu/g, with an average of 2.45 log cfu/g. In contrast, all GB samples exhibited a LAB count of 1.99 log cfu/g. The LAB count on M17 agar in KAB samples ranged from 1.99 to 3.88 log cfu/g, with an average of 2.29 log cfu/g, while GB samples exhibited a range of 1.99 to 2.84 log cfu/g, with an average of 2.19 log cfu/g.

The lowest count for KAB samples was 1.99 log cfu/g, the highest was 2.86 log cfu/g, and the average was 2.27 log cfu/g. Similarly, the lowest count for GB samples was 1.99 log cfu/g, the highest was 2.30 log cfu/g, and the average was 2.01 log cfu/g. The maximum acceptable limit for mould-yeast in bread is 3 log cfu/g (Anonymous, 2009). Although the highest count for KAB samples was close to this limit, it remained within the permissible range. A comparison of these results with those of previous studies (Fırat, 2016; Patır & Güran, 2018) revealed no significant differences in mould-yeast counts. The overall mould-yeast counts in the bread samples analysed exhibited a relatively consistent pattern, falling within the acceptable limits. The maximum permissible level of coliform group bacteria in bread, as established by Anonymous (2009), is 3 log cfu/g. The analysis of bread samples revealed the absence of coliform bacteria <1 log cfu/g in all samples, indicating compliance with the Turkish Food Codex communiqué on microbiological criteria. Furthermore, the number of coliform bacteria in this study was found to be lower than that observed in previous studies (Karaoğlu, 2002; Patır & Güran, 2018).

3.2. Chemical analyses

The results of chemical analyses of bread samples were given in Table 3. The dry matter content of the KAB samples ranged from 53.03% to 61.28%, while in the GB samples, it ranged from 57.63% to 63.91%.

It was thus established that the dry matter values of GB samples exceeded those of KAB samples, with the mean dry matter values between the two sample groups exhibiting a statistically significant discrepancy. However, prior studies (Gülcan, 2017; Patır & Güran, 2018; Candal et al., 2020) had documented higher dry matter values in both the KAB and GB samples.

The ash content of the KAB samples ranged from 1.65% to 2.14%, while in the GB samples, it ranged from 1.27% to 2.31%. KAB samples exhibited higher average ash content compared to GB samples ($P<0.001$). As a result of the studies (Certel et al., 2009; Erdem & Gökmen, 2022) carried out on various bread samples; it was determined that the determined ash amounts exhibited similar results with both KAB and GB samples. The protein content of the KAB samples exhibited a range of 9.82% to 12.46%, while the GB samples demonstrated a range of 8.64% to 11.49%. Although the protein amounts of KAB (10.95%) and GB (9.85%) samples were at similar levels, it was determined that the protein values of both sample groups were statistically different. The average protein amounts of KAB and GB samples were lower than the protein amounts in the study conducted by Üçüncüoğlu (2021) and higher than the protein amounts in the study conducted by Karaağaoğlu et al. (2008).

The pH measurements of the KAB samples ranged from 4.73 to 5.38, with an average value of 5.03. The pH measurements of GB ranged from 5.89 to 6.36, with an average value of 6.04. There is a statistical difference in pH values between bread sample groups. In previous studies (Moroni et al., 2011; Erdem & Gökmen, 2022), bread samples exhibited higher pH levels compared to KAB and GB samples.

The acidity levels in KAB ranged from 5.72% to 9.01%, with an average of 7.81%, while GB exhibited acidity levels ranging from 2.74% to 4.96%, with an average of 3.88%. The difference between the mean titratable acidity values of bread samples is statistically significant. In the study conducted by Hendek Ertop (2017); bread samples produced using sourdough showed higher titratable acidity levels compared to control bread (without sourdough) samples. In addition, in the study conducted by Gül et al. (2021); It was reported that the titratable acidity levels of Isparta bread samples produced using sourdough varied between 3.90% and 8.80%. While KAB bread samples contained an average of 20.36 mg/kg HMF, GB samples were found to contain an average of 5.91 mg/kg HMF. In consideration of these findings, it was determined that the HMF content of KAB samples was statistically significantly higher than that of GB samples. The study revealed that as the ratio of whey to other ingredients in breads produced with whey addition increased, the amount of HMF in the bread also increased. The bread sample with 100% whey added exhibited HMF levels approaching those of the KAB (Candal et al., 2020). Furthermore, different bread varieties exhibited higher levels of HMF compared to the GB samples (Gülcan, 2017; Candal et al., 2020).

3.3. Colour measurement

The colour values of bread samples were given in Table 4. According to these results; it was determined that the values except the a value were statistically different in the color measurements made on the crust part of the bread samples. As a result; GB samples exhibited higher L^* and b^* values on average compared to KAB samples. In addition, when the color values of the inner parts of the bread samples were examined, it was seen that there were statistical differences between all color values. Accordingly; KAB samples exhibited higher L^*, a^* and b^* values on average compared GB samples. In a study conducted by Uslu et al. (2021), the effects of sourdough obtained from apples and figs on whole wheat bread were investigated. The findings revealed that as the sourdough rate increased, the L^* and b^* values decreased and the a^* value increased in the breads. In the other study, the L^* value of the outer of the bread was determined to be 54.02, the a^* value was 11.51, and the b^* value was 29.47. The L^* value of the inner of the bread was found to be 68.59, the a^* value was 0.11, and the b^* value was 13.72 (Aplevicz et al., 2014).

3.4. Correlation between colour and HMF values of bread samples

The correlation between the colour values (L^*, a^*, b^*) and HMF amounts of bread samples is presented in Table 5 and Table 6, along with the associated significance levels (P-values). Additionally, the correlation matrix for the related analysis is provided in Figure 1. These results indicate a highly negative correlation between the L^* and b^* values of the outer part of the bread samples and the HMF content of the bread samples. Furthermore, the correlation between the a^* value of the outer part of the bread samples and the HMF content of the bread samples is minimal and statistically insignificant.

Table 3. Chemical analysis results of bread samples

Sample	Dry matter (%)		Ash (%)		Protein (%)		pH		Titrable acidity (%)		HMF (mg/kg)	
	KAB	GB	KAB	GB	KAB	GB	KAB	GB	KAB	GB	KAB	GB
1	61.28±0.41	63.91±0.80	2.14±0.05	1.64±0.01	11.30±0.29	10.03±0.25	5.38±0.03	5.98±0.00	8.32±0.12	4.61±0.25	22.52±0.41	6.34±0.25
2	57.80±0.18	57.92±0.14	1.99±0.01	1.27±0.02	9.82±0.21	9.31±0.53	5.10±0.01	6.04±0.00	8.74±0.18	3.95±0.28	22.99±0.16	5.84±0.02
3	58.84±0.35	63.38±0.68	1.99±0.03	1.49±0.02	10.97±0.32	8.68±0.09	5.07±0.00	6.01±0.00	7.63±0.09	3.61±0.12	21.03±0.13	6.31±0.08
4	57.98±0.06	60.92±0.40	1.95±0.04	1.82±0.01	10.55±0.25	10.06±0.57	4.92±0.00	6.00±0.00	8.42±0.22	4.58±0.06	16.81±1.00	6.24±0.23
5	58.55±0.28	58.47±0.26	1.83±0.01	1.53±0.01	11.72±0.40	8.71±0.22	5.05±0.00	6.07±0.00	7.35±0.18	3.50±0.09	22.22±0.14	5.29±0.06
6	57.75±0.62	61.59±0.63	1.80±0.01	1.55±0.01	10.68±0.24	8.84±0.26	5.16±0.01	6.09±0.01	7.66±0.15	3.15±0.19	15.55±0.14	6.51±0.03
7	58.78±0.24	61.35±0.45	2.11±0.02	1.52±0.02	10.14±0.17	9.26±0.29	5.00±0.00	6.11±0.00	7.31±0.03	3.43±0.26	19.23±0.27	7.38±0.02
8	57.81±0.58	63.78±0.40	1.96±0.01	2.31±0.01	10.71±0.21	11.31±0.32	5.14±0.00	5.94±0.01	7.80±0.06	4.96±0.44	19.80±0.33	5.48±0.02
9	54.52±0.21	62.99±0.45	1.65±0.01	2.26±0.02	10.59±0.18	11.32±0.33	5.00±0.00	5.93±0.01	7.90±0.06	4.61±0.15	20.33±0.48	5.97±0.11
10	56.14±0.30	63.22±0.39	1.91±0.02	1.86±0.01	11.06±0.20	10.27±0.17	4.73±0.00	6.36±0.04	8.08±0.24	2.74±0.30	20.66±0.05	6.05±0.36
11	54.47±0.17	59.17±3.80	1.90±0.01	1.84±0.01	10.94±0.59	9.86±0.53	5.16±0.01	6.17±0.01	5.72±0.06	2.74±0.09	19.00±0.16	5.85±0.46
12	53.03±0.06	58.15±0.49	1.70±0.01	1.58±0.05	12.46±0.70	9.86±1.20	4.79±0.01	5.96±0.01	7.07±0.10	3.71±0.23	22.94±0.03	4.79±0.31
13	56.60±0.43	57.63±0.24	2.06±0.02	1.51±0.01	11.49±0.18	8.64±0.14	5.09±0.01	5.89±0.00	7.42±0.25	3.81±0.24	22.74±0.31	4.35±0.03
14	53.32±0.10	62.57±0.26	1.85±0.01	1.91±0.06	11.16±0.13	11.49±1.21	4.92±0.00	6.01±0.01	8.67±0.24	4.44±0.39	17.20±0.86	6.27±0.02
15	56.52±0.28	63.11±0.08	1.98±0.01	1.92±0.03	10.62±0.24	10.00±0.24	4.99±0.01	6.02±0.01	9.01±0.43	4.30±0.45	22.38±0.25	5.98±0.21
Mean	**56.89±0.34^{A}**	**61.21±0.41^{B}**	**1.92±0.02^{B}**	**1.73±0.04^{A}**	**10.95±0.12^{B}**	**9.84±0.18^{A}**	**5.03±0.02^{A}**	**6.04±0.02^{B}**	**7.81±0.13^{B}**	**3.88±0.12^{A}**	**20.36±0.40^{B}**	**5.91±0.11^{A}**
Anova P-Sample	***0.000***		***0.000***		***0.000***		***0.000***		***0.000***		***0.000***	

KAB: Kürtün Araköy Bread, GB: Gümüşhane Bread, HMF: Hydroxymethylfurfural, $^{A-C}$: Capital letter indicates the difference between the samples.

However, a negative correlation was observed between the *L** value of the inner part of the bread and the HMF content of the bread samples ($P < 0.0001$). Conversely, a positive correlation was identified between the a and values of the bread core and the HMF content of bread samples ($P < 0.0001$).

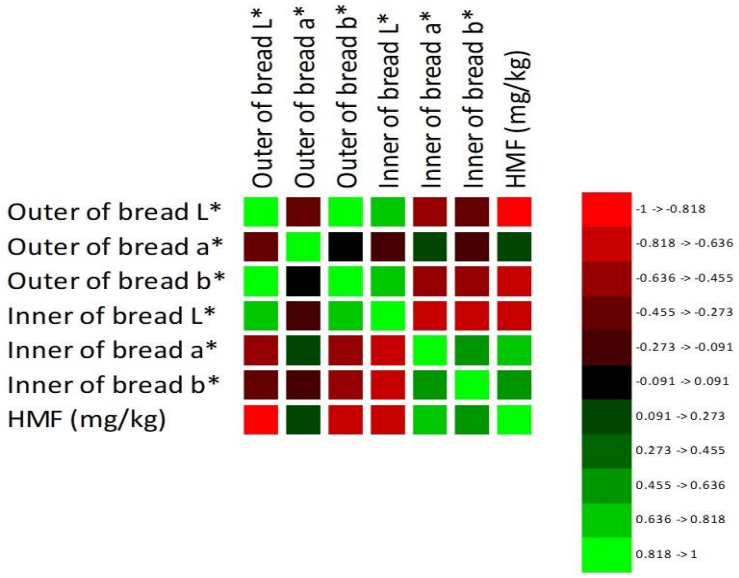


Figure 1. Correlation matrix between colour values and HMF content of bread samples

3.5. PCA analysis

Principal Component Analysis (PCA) was employed to conduct a comprehensive investigation into the variations in the physicochemical properties of the bread samples. The results of the principal component analysis (PCA) are presented in Figure 2. The data analysis of the KAB and GB samples revealed that the F1 and F2 axes collectively accounted for 77.14% of the total data. The F1 axis was responsible for 61.49% of the observed variance, while the F2 axis accounted for an additional 15.65%. The variable loadings analysis demonstrated that ash, protein, and titrable acidity exerted a negative influence on the F1 axis, whereas dry matter and pH exhibited a positive impact. Furthermore, the *L**, *a**, and *b** parameters also had a significant effect. The GB samples were found to cluster on the right side of the plot and were strongly associated with dry matter, pH, and colour values. In contrast, the KAB samples clustered on the left side with high ash and protein content. The F1 axis clearly differentiated between these two product groups, while the F2 axis highlighted the diversity within the sample distances. Therefore, it can be concluded that there are significant component differences between the KAB and GB samples, with colour values playing a crucial role in their separation on the F1 axis.

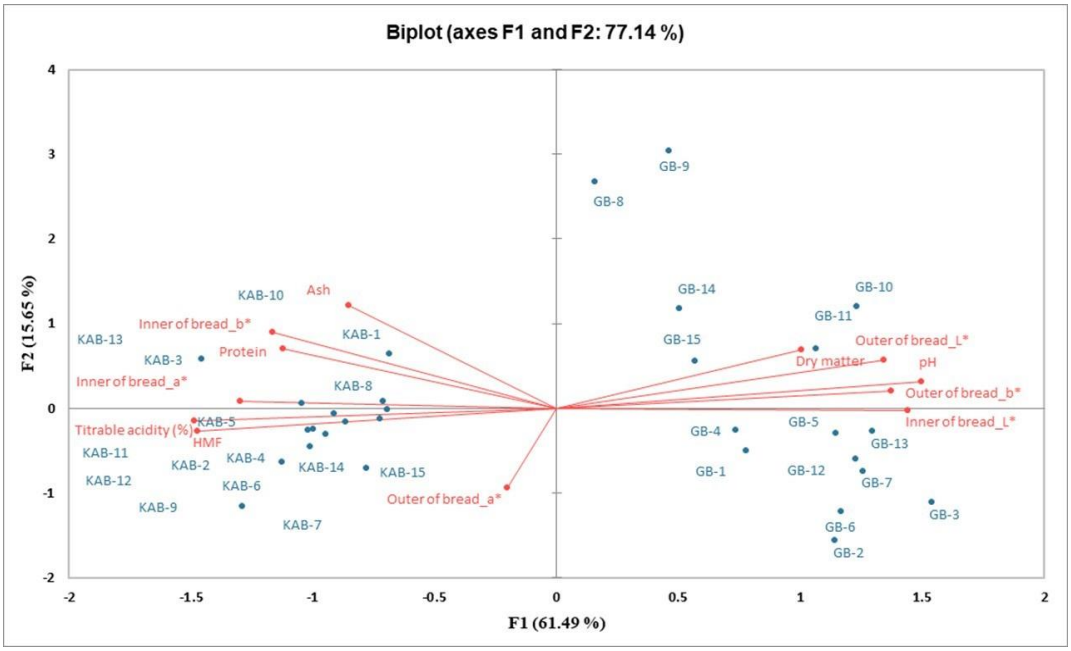


Figure 2. PCA analysis of bread samples

Table 4. Measurement of colour values in bread samples

Sample	Outer of bread						Inner of bread					
	*L**		*a**		*b**		*L**		*a**		*b**	
	KAB	GB	KAB	GB	KAB	GB	KAB	GB	KAB	GB	KAB	GB
1	45.26±0.52	50.97±2.32	10.88±0.40	13.12±1.24	22.48±0.32	30.66±1.36	66.73±1.07	68.20±1.53	0.39 ±0.13	0.19±0.091	19.06±0.42	16.74±0.43
2	40.53±0.16	52.58±1.41	10.97±0.41	11.71±0.05	20.11±0.27	31.16±0.96	62.74±1.31	70.84±1.41	0.72±0.09	-0.30±0.03	19.20±0.26	15.64±0.19
3	43.21±0.89	52.84±0.45	10.83±0.19	11.16±0.38	17.20±0.90	30.38±0.51	63.43±1.16	74.99±0.93	0.91±0.14	-0.49±0.05	19.33±0.23	13.93±0.33
4	40.02±0.89	50.63±1.35	11.06±0.15	11.22±0.21	18.16±0.96	27.41±1.67	64.88±0.23	70.58±2.18	0.72±0.17	0.13±0.08	19.80±0.66	15.43±0.48
5	46.85±0.12	57.84±2.39	10.92±0.24	9.53±1.14	24.51±0.21	30.33±0.53	62.20±0.18	68.79±0.22	-0.03±0.05	-0.46±0.28	18.76±0.19	17.60±0.60
6	42.24±0.34	52.29±1.50	12.73±0.26	12.34±0.15	21.82±0.21	30.50±1.03	61.95±1.31	70.38±1.12	0.47±0.09	0.28±0.02	19.44±0.86	14.44±0.55
7	41.50±0.83	55.06±0.70	11.23±0.76	11.41±0.14	20.87±0.78	32.82±0.78	62.62±0.25	68.98±1.27	-0.24±0.04	-0.52±0.01	19.04±0.29	15.61±0.15
8	45.93±0.78	57.84±0.59	10.86±0.27	9.73±0.26	22.33±0.63	31.35±0.18	64.13±1.62	65.73±0.39	0.65±0.18	0.76±0.13	19.46±0.21	21.67±1.15
9	38.44±0.35	62.41±1.48	10.97±0.25	6.42±0.67	15.13±0.40	28.45±0.10	60.77±0.74	67.99±0.84	1.02±0.055	0.27±0.12	19.29±0.25	19.99±0.34
10	44.63±1.45	54.43±3.61	11.10±0.71	8.43±0.53	23.49±0.40	28.80±1.99	61.82±0.74	73.14±1.17	0.46±0.14	-0.83±0.08	19.53±0.28	17.84±0.26
11	41.90±0.94	56.45±0.46	10.38±0.22	8.94±0.41	21.37±1.41	29.71±0.62	61.97±1.98	70.42±1.04	0.33±0.17	-0.72±0.21	19.99±0.27	17.92±0.10
12	43.95±1.04	54.56±0.93	11.67±0.12	9.90±0.40	24.32±0.85	28.93±0.47	62.86±0.93	72.50±0.87	0.53±0.04	-1.01±0.19	19.50±0.16	15.08±0.32
13	34.76±1.82	57.60±0.63	7.94±0.59	7.53±0.52	14.18±1.57	29.87±0.87	61.31±0.48	70.02±0.99	0.81±0.14	-0.94±0.06	20.15±0.42	16.22±0.18
14	48.05±0.94	53.09±0.74	10.67±0.32	11.35±0.42	25.15±0.87	30.94±0.31	62.78±1.06	68.28±1.01	0.71±0.17	-0.24±0.03	19.34±0.27	20.09±0.14
15	47.74±1.82	52.33±0.67	10.64±0.92	12.20±0.67	26.15±0.09	31.61±0.68	61.99±1.83	62.92±2.31	0.75±0.09	-0.31±0.06	18.96±0.35	19.22±0.29
Means	43.00±0.57^{A}	54.73±0.57^{B}	10.86±0.17^{A}	10.33±0.30^{A}	21.15±0.55^{A}	30.20±0.29^{B}	62.81±0.33^{A}	69.59±0.51^{B}	0.55±0.06^{B}	-0.28±0.08^{A}	19.39±0.10^{B}	17.16±0.35^{A}
Anova P-sample	*0.000*		*0.137*		*0.000*		*0.000*		*0.000*		*0.000*	

KAB: Kürtün Araköy Bread, GB: Gümüşhane Bread, *L**: 0-100 (Darkness- Lightness), *a**: (+/-, red/green), *b**: (+/-, yellow, blue), $^{A-C}$: Capital letter indicates the difference between the samples.

Table 5. Correlation levels (*R*) between colour values (*L**, *a**, *b**) and HMF amounts of bread samples

Variables	Outer of bread *L**	Outer of bread *a**	Outer of bread *b**	Inner of bread *L**	Inner of bread *a**	Inner of bread *b**	HMF (mg/kg)
Outer of bread *L**	1	-0.333	0.888	0.651	-0.600	-0.366	-0.821
Outer of bread *a**	-0.333	1	0.034	-0.106	0.202	-0.149	0.136
Outer of bread *b**	0.888	0.034	1	0.653	-0.629	-0.467	-0.812
Inner of bread *L**	0.651	-0.106	0.653	1	-0.651	-0.664	-0.744
Inner of bread *a**	-0.600	0.202	-0.629	-0.651	1	0.594	0.668
Inner of bread *b**	-0.366	-0.149	-0.467	-0.664	0.594	1	0.519
HMF (mg/kg)	-0.821	0.136	-0.812	-0.744	0.668	0.519	1

Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05. ***L**:*** 0-100 (Darkness- Lightness), ***a**:*** (+/-, red/green), ***b**:*** (+/-, yellow, blue)

Table 6. Significance levels (*P*) of correlation levels between colour values and HMF amounts of bread samples

Variables	Outer of bread *L**	Outer of bread *a**	Outer of bread *b**	Inner of bread *L**	Inner of bread *a**	Inner of bread *b**	HMF (mg/kg)
Outer of bread *L**	0	0.001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.000	<0.0001
Outer of bread *a**	0.001	0	0.750	0.319	0.056	0.161	0.200
Outer of bread *b**	<0.0001	0.750	0	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Inner of bread *L**	<0.0001	0.319	<0.0001	0	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Inner of bread *a**	<0.0001	0.056	<0.0001	<0.0001	0	<0.0001	<0.0001
Inner of bread *b**	0.000	0.161	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0	<0.0001
HMF (mg/kg)	<0.0001	0.200	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0

Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05. ***L****: 0-100 (Darkness- Lightness), ***a****: (+/-, red/green), ***b****: (+/-, yellow, blue)

4. Conclusion

A comprehensive evaluation of the microbiological and chemical characteristics of Gümüşhane and Kürtün-Araköy bread dough samples revealed statistically significant differences. The analysis of bread samples from Kurdün-Araköy revealed a substantially elevated presence of lactic acid bacteria (LAB) on MRS agar and yeast-mold populations. However, no statistical differences were detected in LAB on M17 agar and TAMB counts. Chemical analyses distinguished the Kürtün-Araköy breads with significantly lower dry matter content and pH values. In contrast, higher levels of ash, protein, titratable acidity and hydroxymethylfurfural (HMF) concentrations were observed in the Kürtün-Araköy bread samples compared to the Gümüşhane bread samples. Furthermore, a significant variation was identified in the colourimetric profiles of the two distinct groups of bread, indicative of their varied compositional characteristics. The results obtained demonstrate the microbiological and chemical uniqueness of Kürtün-Araköy and Gümüşhane breads, and also provide critical baseline data for the conservation, evaluation and future scientific research of traditional bread varieties unique to the region.

CRediT authorship contribution statement

Büşra ÇİMEN: Formal Analysis; Investigation; Methodology; Writing - review & editing. Fırat YILMAZ: Conceptualization; Data curation; Investigation; Resources; Writing - original draft; Writing - review & editing. Formal analysis.

Declaration of competing interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Funding

This research did not receive any specific grant from fundingagencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

References

Akgün, F. B. (2007). *Ekşi hamur tozu eldesi ve ekmek üretiminde kullanılabilme olanakları* [Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]

Alver Oral, A. (2016). *Ekşi hamura kefir ilavesi ile mikroflorası zenginleştirilmiş hamurlardan yapılan ekmeklerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Anonymous. (2009). Türk Gıda Kodeksi Mikrobiyolojik Kriterler Tebliği 2009/6 - 68.

Aplevicz, K. S., da Silva, T., Fritzen-Freire, C. B., Amboni, R. D. M. C., Barreto, P. L. M., & Sant'Anna, E. S. (2014). Effect of the incorporation of different freeze-dried cultures on the properties of sourdough bread. *Journal of Culinary Science & Technology*, *12*(4), 354-367. https://doi.org/10.1080/15428052.2014.904837

Bakırcı, F., & Köse, E. (2017). Ekşi hamurlardan laktik asit bakterileri ve mayaların izolasyonu ve tanımlanması. *Akademik Gıda, 15*(2), 149-154. https://doi.org/10.24323/akademik-gida.333670

Behera, S., & Ray, R. (2015). Sourdough bread; in : bread: its fortification for nutrition and health (Cristina M. Russell, Ed), CRC press, USA. In (pp. 53-67).

Candal, C., Cansız, Z., Mutlu, C., Arslan Tontul, S., Ercan, R., & Erbaş, M. (2020). Farklı oranlarda peynir alti suyu kullanımının beyaz ve tam buğday unlarından üretilen ekmeklerin bazı özellikleri üzerine etkisi. *Gıda, 45*(1), 125-138. https://doi.org/10.15237/gida.GD19066

Cebeci, A., & Doğan, O. (2021). Bazı geleneksel Türk gıdalarından laktik asit bakterilerinin izolasyonu. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University, 58*(1), 87-95. https://doi.org/10.20289/zfdergi.658513

Certel, M., Erem, F., & Karakaş, B. (2009). Farklı depolama koşullarında normal ve kepekli ekmeklerin mikrobiyolojik özellikleri, su aktivitesi ve sünme durumunun değişimi. *Gıda, 34*(6), 351-358. https://dergipark.org.tr/tr/pub/gida/issue/6864/91937

Civelek, P., Kotancılar, H. G., & Seyyedcheraghi, K. (2024). Investigation of the effect of using whole wheat flour and different additives in bread kadayif on acrylamide and hydroxymethyl furfural (HMF). *Gıda Bilimi ve Mühendisliği Araştırmaları, 3*(1), 68-78. https://dergipark.org.tr/en/pub/foodscience/issue/84026/1465804

Çetin, H., Arslan Tontul, S., & Akın, N. (2021). Yer elmasi tozu ilavesinin ekşi hamur fermantasyonu üzerine etkisi. *Gıda, 46*, 367-375. https://doi.org/10.15237/gida.GD20135

Çifci, M. M. (2017). *Ekşi hamur mayasından izole edilen Lactobacillus türlerinin klasik ve moleküler yöntemlerle tanımlanması* [Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Demirci, A. S., Palabıyık, İ., Özalp, S., Tırpancı Sivri,G. (2019). Effect of using kefir in the formulation of traditional Tarhana. *Food Science and Technology, Campinas, 39*(2), 358-364. https://doi.org/10.1590/fst.29817

Elgün, A., & Ertugay, Z. (2002). Tahıl İşleme Teknolojisi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Erzurum (4.Baskı)*.

Elgün, A., Ertugay, Z., Certel, M., & Kotancılar, H. (2002). Tahıl ve Ürünlerinde Analitik Kalite Kontrolü ve Laboratuar Uygulama Kılavuzu. *Atatürk Üniversitesi Yayınları, Erzurum (4.Baskı)*.

Erdem, N., & Gökmen, S. (2022). Zonguldak ili Çaycuma ilçesinin geleneksel cızlama ekmeği üzerine bir araştırma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(38), 218-228. https://doi.org/10.31590/ejosat.1104611

Erginkaya, Z., Ünal Turhan, E., & Özer, E. A. (2016). Nohut mayalı ekmek üretimi ve hakim mikroflora. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 30*(1), 89-99. https://dergipark.org.tr/tr/pub/ziraatuludag/issue/23971/255525

Fırat, S. (2016). *Humik asit içeren ekmek üretimi* [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya]

Gamlı, Ö. F. (2022). *Laboratuar Teknikleri ve Temel Gıda Analizleri*.

Gerçekaslan, K. E., Kotancılar, H. G., Kaban, G., & Karaoğlu, M. M. (2012). Vakfikebir ekmek hamurundan laktik asit bakterilerinin izolasyonu ve tanısı. *Akademik Gıda, 10*(3), 47-50. https://dergipark.org.tr/tr/pub/akademik-gida/issue/55821/764663

Göçmen, D. (2001). Ekşi hamur ve laktik starter kullanımının ekmekte aroma oluşumu üzerine etkileri. *Gıda, 26*(1). https://dergipark.org.tr/tr/pub/gida/issue/6917/92407

Gül, H., Acun, S., Hayıt, F., & Şirikçi, B. S. (2021). Geleneksel ekşi mayalı isparta ekmeğinin bazı kalite karakteristikleri açısından değerlendirilmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi, 16*(1), 34-45. https://dergipark.org.tr/tr/pub/sduzfd/issue/62754/908422

Gülcan, Ü. (2017). *İnert ve inhibitör gaz ortamlarında pişirme işlemlerinin ekmeklerin HMF ve akrilamid içeriğini azaltıcı etkilerinin belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Halkman, A. K. (2005). Merck Gıda Mikrobiyolojisi Uygulamaları. *Başak Matbaacılık, Ankara*.

Halkman, A. K. (2007). Gıdaların Mikrobiyolojik Analizi *Orlab On-Line Mikrobiyoloji Dergisi*, *5*(4), 2-6.

Hendek Ertop, M. (2017). Farklı fermentasyon ve kurutma yöntemleriyle üretilmiş toz ekşi hamurun bazı mikrobiyolojik nitelikleri ve ekmek küf gelişimi üzerindeki etkileri. *Gıda, 42*(5), 609-619. https://dergipark.org.tr/tr/pub/gida/issue/29788/300747

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/tr/pub/gida/issue/6820/91605

Karaoğlu, M. M. (2002). *Farklı sıcaklık ve sürelerde muhafaza edilen kısmi pişmiş ekmeklerin teknolojik ve mikrobiyolojik özellikleri* [Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Köten, M., & Ünsal, A. S. (2007). Şanlıurfa yöresine özgü tırnaklı ve açık ekmeklerin geleneksel üretimi. *Gıda*, *32*(2), 81-85. https://dergipark.org.tr/tr/pub/gida/issue/6804/91474

Menteş, Ö., Akçelik, M., & Ercan, R. (2004). Türkiyede üretilen ekşi hamurlardan lactobacillus suşlarının izolasyonu, identifikasyonu ve bu suşların temel endüstriyel özellikleri. *Gıda*, *29*(4). https://dergipark.org.tr/tr/pub/gida/issue/6988/93115

Moroni, A. V., Bello, F. D., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2011). Impact of sourdough on buckwheat flour, batter and bread: Biochemical, rheological and textural insights. *Journal of Cereal Science*, *54*(2), 195-202. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.04.008

Morul, F., & İşleyici, Ö. (2012). Divle tulum peynirinin kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri. *YYU Veteriner Fakultesi Dergisi*, *23*(2), 71-76. https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyuvfd/issue/13729/166142

Patır, B., & Güran, H. Ş. (2018). Elazığ peynirli ekmeğinin mikrobiyolojik ve kimyasal kalitesi. *Dicle Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, *11*(2), 83-87. https://dergipark.org.tr/tr/pub/duvetfd/issue/42529/513964

Postoğlu, E. (2018). *Aktif ambalajlama ve modifiye atmosfer paketleme uygulamalarınınndilimlenmiş ekmeğin raf ömrüne etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Poutanen, K., Flander, L., & Katina, K. (2009). Sourdough and cereal fermentation in a nutritional perspective. *Food Microbiology*, *26*(7), 693-699. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.07.011

Şahin, A., & Meral, Y. (2012). Turkey's Geographical Marking and Local Products. *Turkish Journal of Scientific Reviews*(2), 88-92. https://dergipark.org.tr/en/pub/derleme/issue/35087/389139

Şen, M. A., & Ekinci, E. (2020). Türkiye'de üretilen coğrafi işaret ile tescillenmiş ekmek çeşitleri üzerine bir nitel araştırma. *Journal of Eurasia Tourism Research, 1*(1), 32-41. https://dergipark.org.tr/tr/pub/atadergi/issue/60286/847187

Taşçı, R., Karabak, S., Bolat, M., Pehlivan, A., Şanal, T., Acar, O., Albayrak, M. (2017). Ankara ilinde ekmek fırınlarının üretim yapısı ve ekmek israfı. *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, *3*(1), 1-16. https://dergipark.org.tr/tr/pub/tead/issue/29947/322414

Türker, S., & Elgün, A. (1998). Süne-kımıl zararlı tavlı buğdaylara mikrodalga uygulamasının öğütme ve un özelliklerine etkisi. *Gıda*, *23*(1). https://dergipark.org.tr/tr/pub/gida/issue/6842/91796

Uslu, H., Yıldız, B., Çakıcı, A., & Yaprak Uslu, D. (2021). Ekmek üretiminde ekşi maya üzerine taze meyvelerin kullanımının. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *10*(1), 150-159. https://doi.org/10.28948/ngumuh.756207

Üçüncüoğlu, D. (2021). Geleneksellikten inovasyona giden yolda 'çankırı', atıştırmalık gıda üretimi: yoka çerezi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(32), 1181-1187. https://doi.org/10.31590/ejosat.1039631

Zappalà, M., Fallico, B., Arena, E., & Verzera, A. (2005). Methods for the determination of HMF in honey: a comparison. *Food Control*, *16*(3), 273-277. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.03.006

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 545-562 doi: 10.17714/gumusfenbil.1666480 Research Article

Classification of Turkish cuisine food images using transformer-based deep learning models

Transformer tabanlı derin öğrenme modelleri kullanılarak Türk mutfağına özgü yemek görsellerinin sınıflandırılması

Özkan BİNGÖL*

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Yazılım Geliştirme Bölümü, 61080, Trabzon

• Received: 27.03.2025 • Accepted: 15.05.2025

Abstract

In recent years, deep learning-based computer vision methods have made significant progress in the field of automatic classification of food images. However, the majority of studies in this field focus on Western and Far Eastern cuisines, while rich and visually complex local cuisines such as Turkish cuisine are underrepresented. In this context, our study aims to evaluate the effectiveness of transformer-based deep learning models in classifying food images of Turkish cuisine. Six current models, namely ViT, Swin Transformer (V1, V2), ConvNeXt, BEiT, and DEiT, are comparatively tested on four different datasets, namely Food4, Food15, Food24, and Turkish Food-102. Standardized hyperparameters and an 80%-20% training-test separation were used in the training process, and the performance of the models was evaluated with metrics such as accuracy, loss, f1-score, and Cohen's Kappa. The results showed that the ConvNeXt model achieved the highest accuracy in all datasets. Swin Transformer models also performed similarly, while ViT and BEiT performed less well. The data cleaning process resulted in an average 2-5% increase in model accuracy, demonstrating the critical importance of data quality. These findings show that transformer-based models, are very promising for automatic classification of Turkish cuisine dishes. Moreover, the critical importance of dataset quality on model success is once again emphasized. This study is expected to make a significant contribution to the field of food categorization specific to Turkish cuisine and provide guidance for future research. The results obtained can form a potential basis for restaurant recommendation systems and similar applications.

Keywords: Deep learning, Food image classification, Transformer-based models, Turkish cuisine image classification

Öz

Son yıllarda derin öğrenme tabanlı bilgisayarlı görü yöntemleri, yemek görüntülerinin otomatik sınıflandırılması alanında önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Ancak bu alandaki çalışmaların büyük çoğunluğu Batı ve Uzak Doğu mutfaklarına odaklanırken, Türk mutfağı gibi zengin ve görsel açıdan karmaşık yerel mutfaklar yeterince temsil edilmemektedir. Bu bağlamda, çalışmamız Türk mutfağına özgü yemek görüntülerinin sınıflandırılmasında Transformer tabanlı derin öğrenme modellerinin etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada ViT, Swin Transformer (V1, V2), ConvNeXt, BEiT ve DEiT olmak üzere altı güncel model, Food4, Food15, Food24 ve Turkish Food-102 adlı dört farklı veri kümesi üzerinde karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Eğitim süreçlerinde standartlaştırılmış hiperparametreler ve %80-%20 eğitim-test ayrımı kullanılmış; modellerin performansları doğruluk, kayıp, F1 skoru ve Cohen's Kappa gibi metriklerle değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ConvNeXt modelinin tüm veri setlerinde en yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını göstermiştir. Swin Transformer modelleri de yakın performans sergilerken, ViT ve BEiT daha düşük başarı göstermiştir. Veri temizleme süreci, model doğruluğunda ortalama %2-5 artış sağlayarak veri kalitesinin kritik önemini ortaya koymuştur. Bu bulgular, transformer tabanlı modellerin Türk mutfağı yemeklerinin otomatik sınıflandırılması için oldukça umut verici olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, veri seti kalitesinin model başarısı üzerindeki kritik önemi bir kez daha vurgulanmıştır. Bu çalışmanın Türk mutfağına özgü yemek sınıflandırması alanına önemli bir katkı sağlaması ve gelecekteki araştırmalar için yol gösterici olması beklenmektedir. Elde edilen sonuçlar, restoran öneri sistemleri ve benzer uygulamalar için potansiyel bir temel oluşturabilir.

Anahtar kelimeler: *Derin Öğrenme, Yemek görüntüsü sınıflandırma, Transformer tabanlı modeller, Türk mutfağı yemek görselleri sınıflandırma*

*Özkan BİNGÖL; bingolo@ktu.edu.tr

1. Introduction

In recent years, deep learning methods have achieved groundbreaking success in the field of computer vision, providing significant opportunities for the automatic classification of food images. These technologies have been applied in many areas, such as restaurant recommendation systems (Shu et al., 2024; Zhang et al., 2020) and health and nutrition applications (H. Wang et al., 2024; Zhao et al., 2024), and food quality (Sood & Singh, 2021; Zhu et al., 2021). With the increasing accessibility of visual data and the increasing number of food images shared on social media, the need for automatic information extraction in this field is increasing. The use of Convolutional Neural Networks (CNN) and Transfer Learning (TL) techniques in systems developed for this purpose has been significantly successful in the classification of food images (McAllister et al., 2018; Memiş et al., 2020; Suddul & Seguin, 2023). In particular, CNN-based models such as ResNet (He et al., 2016), DenseNet (Huang et al., 2017), and EfficientNet (Tan & Le, 2019) have proven their success by achieving high accuracy on common datasets such as Food-101 (Bossard et al., 2014).

Despite the technological advancements of the digital age, automated classification systems tailored to Turkish cuisine have not received sufficient attention in the literature. Although Turkish cuisine boasts remarkable diversity and gastronomic potential, most existing deep learning-based food classification studies have predominantly focused on Western or East Asian cuisines. Turkish dishes, characterized by their distinct visual features, diverse ingredient usage, and varying cooking techniques, present considerable challenges for the direct application of existing models. Particularly, CNN-based models frequently struggle to adequately capture the visual complexity inherent in Turkish dishes (e.g., similar color tones or irregular presentations), which consequently reduces classification accuracy.

In this context, it is hypothesized that the limitations of current classification approaches can be addressed by employing Transformer-based architectures and Transformer-inspired CNN models. Recent Transformer variants such as Vision Transformer (Dosovitskiy et al., 2021), Swin Transformer (Liu et al., 2021) and ConvNext (Liu et al., 2022) have demonstrated effectively model complex spatial relationships within images while maintaining high performance and computational efficiency. This study aims to evaluate the performance of various Transformer-based models in the automated classification of Turkish dishes, and demonstrate their superior ability in modeling the visual complexity and ingredient diversity specific to Turkish cuisine.

1.1. Automatic food image classification

One of the first notable studies on the classification of food types was conducted by Bossard et al. (2014) using the Food-101 dataset, achieving an accuracy of 50.76%. In comparison, Kagaya et al. (2014) obtained 73.7% accuracy on another dataset consisting of 10 classes, and reached 93.8% accuracy in food/non-food discrimination tasks using a CNN.

The widespread adoption of deep learning has led to extensive research on CNN architectures using large-scale food image datasets. Notable datasets such as UEC Food-256 (Kawano & Yanai, 2015), UPMC-Food101 (Wang et al., 2015), ISIA Food-500 (Min et al., 2020), Vireo Food-172 (Chen & Ngo, 2016), and Food2K (Min et al., 2023) have emerged as standard benchmarks in food classification research. In these studies, CNN architectures incorporating multiscale attention mechanisms that leverage both global and local image features have been explored extensively. Classical convolutional models, including ResNet (He et al., 2016), DenseNet (Huang et al., 2017), and Inception (Szegedy et al., 2015), have frequently served as baseline models due to their well-established performance.

Recently, transformer-based architectures have been observed to outperform traditional CNN methods. Gao et al. (2024) used the transformer-based Augmentplus, LayerScale and Multi-layer perception mechanisms through Vision Transformer (AlsmViT) to classify visually similar foods. In this study, accuracy rates of 95.17% and 94.29% were achieved on the Food-101 and Vireo Food-172 datasets, respectively. However, this model is notable for its high computational and memory requirements (Alp, 2024). Nijhawan et al. (2024) combined deep learning with some feature extraction methods in food type classification using a hybrid Vision Transformer (ViT) model and achieved 94.63% accuracy on a dataset of 13 categories.

Ansari et al. (2023) evaluated the classification performance of deep learning-based architectures on MeFood, a large-scale dataset they developed. In this study, the architectures EfficientNet-V2, ResNet50, ConvNeXt, and MobileNetV3 were comparatively analyzed, and the F1-scores obtained across all models were found to be similar. The models achieved an approximate F1-score of 0.95 in the classification task, indicating strong and consistent performance. On the other hand, Gokhale et al. (2023) proposed a two-stage classification strategy for distinguishing between fresh and spoiled fruits and vegetables. In the first stage of their study, classification was performed using the ConvNeXt model on a custom dataset composed of labeled images across 12 distinct classes. Experimental results demonstrated a high classification performance, achieving an accuracy rate of 99.77%, highlighting the effectiveness of the proposed approach.

1.2. Automatic classification of Turkish cuisine foods

It is seen that the majority of food recognition studies focus on specific types of food recognized in Western or Far Eastern cuisines. Notably, studies on local cuisines, especially Turkish cuisine, are still limited in the literature. This situation creates a deficiency in terms of dataset diversity and creates uncertainties about the applicability of existing methods to regional cuisines. To address this problem, Güngör et al. (2017) developed a Turkish cuisine dataset named "TürkSofrası-15," which contains 500 images in each class. In this study, transfer learning was applied using the Google Inception v3 model, achieving a test accuracy of 68.2% in classifying Turkish dishes. The results demonstrated that, despite the inherent challenges, deep learning techniques can effectively be used for Turkish cuisine classification. Ergün and Öztürk (2018) emphasized the importance of ontology-based queries by semantically associating Turkish dishes, ingredients, and recipes with a hierarchical structure called the Turkish Cuisine Ontology. This ontology model includes 50 different Turkish dishes, and an accuracy rate of 78% was achieved using the InceptionV3 model.

Kayıkçı vd. (2019) compared the performance of popular CNN models, such as Inceptionv3, ResNet50, Xception, and InceptionResNetV2, using a dataset called Food24, which contains 24 different Turkish dishes. In this study, a 93% accuracy rate was achieved using the Stochastic Gradient Descent (SGD) optimization algorithm and softmax activation function together. In another study, Şahin et al. (2021) created a customized deep-learning model called "TurkishFoodNet" using a large dataset (102 Turkish foods, approximately 500 images each). In this study, real-time object detection and type recognition tasks were separated, and an accuracy rate of 84% was achieved in the food type recognition phase. Nogay et al. (2025) focused on food grouping and portion estimation with CNN-based models using the BeBiS 9 dataset of Turkish cuisine. Using data augmentation techniques, 80% accuracy in food group classification and 80.47% accuracy in portion estimation were achieved. These results demonstrate the potential of deep learning techniques in the areas of portion and nutritional management, as well as food recognition.

Finally, Alp (2024) tested the integration of the ViT and Random Forest algorithm with EfficientNetV2M, ResNet101, and VGG16 models on the "Türk Sofrası – 15" dataset. According to the results, the integration of ViT and Random Forest stood out with 91% precision, 86% recall, and 88% F1 score.

Considering the results obtained in the literature, six current transformer models, which are detailed in the next section, were preferred in this study. In this study, a comprehensive evaluation was performed on four different datasets of Turkish cuisine (Food4, Food15, Food24, and TurkishFood-102). The transformer models were modified according to the datasets. Thus, the developed models enabled the recognition of Turkish cuisine dishes more efficiently and accurately. In addition, the model performance was improved by addressing the problems encountered in the datasets, such as mislabeling.

2. Materials and methods

2.1. Datasets of Turkish food images

2.1.1. Food4, Food15 ve Food24 datasets

The FoodXX series of datasets, developed with a focus on Turkish cuisine, form the basis of the experimental analyses in this study. The first dataset, Food4, was created by Kayıkçı et al. (2019) from images of four different food types (pizza, chicken wings, hamburger, and steak) selected from the Food101 (Bossard et al., 2014) dataset. Sample images from this dataset, which provides 1000 labeled images for each food type, are given in Figure 1.

Figure 1. Sample images from the Food4 dataset

The second, more comprehensive dataset, Food15, was derived from the "Türk Sofrası – 15" dataset developed by Güngör et al. (2017), comprising 15 traditional Turkish food classes. Using this dataset, we aimed to evaluate the classification success of dishes specific to the Turkish cuisine. The dishes included in the Food15 dataset were stuffed "pepper", "börek", "cig köfte", "artichoke", "anchovy", "hunkar beğendi", "spinach-stuffed meatballs", "kebab", "kısır", "dried beans", "Turkish delight", "manti", "bagel", and "stuffed leaves". The dataset contained 7448 images, with an average of approximately 495 images per class. One image of each food type in this dataset is shown in Figure 2.

Figure 2. Food15 veri setinden örnek görüntüler

The Food24 dataset, also prepared by Kayıkçı et al. (2019), was built by removing the "Turkish delight" class from the Food15 dataset, which had low accuracy rates, and adding new food types instead. The classes that are different from Food15 in this dataset are as follows: "aşure", "baklava", "meat saute", "gözleme", "İzmir meatballs", "karnıyarık", "lahmacun", "mücver", "rice pilaf" and "green beans". There are 10825 images in total in this dataset.

Figure 3. Example images of classes in Food24 that are different from Food15

In Food4, Food15 and Food24 datasets, each image is located in folders named with the class to which it belongs. In addition, in these datasets, train and test data are separated by 80% and 20%, respectively Kayıkçı et al. (2019). In this study, this separation was kept faithful.

2.1.2. Turkish Food - 102 Dataset

The Turkish Food – 102 dataset used by Şahin et al. (2021) is a comprehensive dataset specific to Turkish cuisine. Designed specifically for this culinary tradition, the dataset comprises 102 distinct food categories. These include dolma, sarma, various types of kebabs, traditional desserts such as baklava and künefe, dishes prepared with olive oil, pastry-based items such as mantı and börek, and a variety of soups. Each category contained approximately 500 images, resulting in a large-scale dataset encompassing 46,314 images. As illustrated in Figure 4, the dataset includes images of prepared dishes and uncooked representations of the vegetables and fruits used in these meals.

Figure 4. TurkishFood – 102 verisetinden rastgele seçilmiş örnek görüntüler

2.2. Transformer models

Transformer-based models, which have attracted attention in the field of computer vision in recent years, provide higher performance in image recognition tasks than traditional CNN methods. These models can effectively model context information by decomposing images into fixed-size chunks, thus achieving superior results, particularly in the classification of complex scenes. In this study, six different transformer-based models were selected for the classification of food images of Turkish cuisine, and their performances on Turkish dishes were analyzed in detail.

2.2.1. Vision transformer

Vision Transformer (ViT) is an adaptation of the Transformer architecture, which has revolutionized natural language processing and image processing. Unlike traditional CNNs, ViT treats image data directly as arrays of pixels and performs image classification tasks using a self-attention mechanism. It was first proposed by Dosovitskiy et al. (2020), ViT divides images into fixed-size patches and uses the features obtained from these patches as inputs to the transformer layers. These patches are transformed into fixed-size embedding vectors using a linear transformation, and positional encoding is added to each patch to preserve the positional information. Thus, the ViT model can efficiently capture the relationships between ordered patches using a self-attention mechanism while preserving the spatial structure of the visual input. The multi-head self-attention mechanism within the transformer blocks can directly model the long-distance relationships and contextual information between different regions of the image and learn richer feature representations than CNN-based models can.

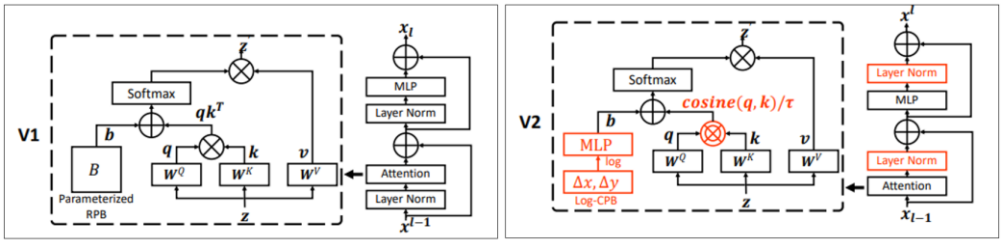
2.2.2. Swin transformer V1

To overcome the limitations of the classical ViT (Vision Transformer) architecture, the Swin Transformer (Shifted Window Transformer - Swin_B_V1) uses a window-based multilevel self-attention mechanism to learn the hierarchical representations of images (Liu et al., 2021). Owing to this structure, Swin_B_V1 can effectively capture local and global features in visual data, thus significantly improving the classification performance. The main innovation of the Swin Transformer is that it performs self-attention at the window level by dividing images into local windows of fixed size, and by reconstructing these windows with shifted windows, regional relationships can be modeled more effectively. This approach reduces the high computational complexity, which is the classic drawback of transformer architectures, and increases the ability to capture long-range interactions in the visual data. In the input layer of the model, the input images were first divided into fixed-size regions, and initial representations were created using linear embedding. Subsequently,

a shifted window attention mechanism is applied to successive transformer blocks to capture regional relationships and the overall contextual features of the image.

2.2.2. Swin transformer V2

The Swin Transformer V2 (Swin_B_V2) retains the strong core principles of Swin Transformer V1 while introducing significant architectural improvements, especially for large-scale training and high-resolution image processing (Liu, Hu et al., 2022). While the shifted window mechanism used in V1 is retained, scaled cosine attention is used in V2 for more stable training on large-scale datasets. In addition, the log-spaced overlapping window method in V2 improves the ability to capture contextual information more effectively in large-resolution images. To increase the scalability of the model, parameter-scaling strategies were optimized to maintain training stability, even at larger model sizes. The internal structures of the blocks used in Swin Transformer V1 and V2 and their differences are presented in Figure 5.



(a) **(b)**

Figure 5. Internal structures of blocks used in Swin Transfomer V1(a) and V2(b) architectures (Liu, Hu, et al. 2022).

2.2.3. ConvNeXt

The structure of the ConvNeXt model was originally developed based on the ResNet architecture, and Swin Transformer-like architectural improvements were applied to improve the performance of CNNs (Liu, Mao et al., 2022). In the ConvNeXt model, depth-wise convolutions are used instead of standard convolutional layers. This reduces the complexity of the model and often improves its performance. In addition, GELU is used as the activation function, and "layer normalization" is added between convolution layers to reduce pooling operations. In the ConvNeXt model, the connections between the convolution layers are organized similar to the block structure in transformer models, and a "stage" structure is adopted. Owing to the use of 7 × 7 kernels in the convolution blocks, extended "bottleneck" configuration, and larger receptive fields, the ConvNeXt model has achieved significant success in ImageNet and similar large-scale image classification tasks.

2.2.4. Bidirectional Encoder Representation from Image Transformers

Bidirectional Encoder Representation from Image Transformers (BEiT) was developed by Bao et al., (2021) in order to obtain efficient visual representations from images. Inspired by the BERT approach in natural language processing, the BEiT model uses a similar bidirectional encoder principle in the image domain to encode images. This method adopts a masked image modeling approach to learn semantically deep representations by processing images. The BEiT model first divides the input images into small square patches and treats them as arrays. A training process based on the reconstruction of randomly masked patches was then applied. This process allows the model to learn both the contextual and structural features of the image in a bidirectional manner.

2.2.5. Data-efficient Image Transformer

Data-efficient Image Transformer (DEiT) is a Transformer-based image analysis method developed to improve the data efficiency of the ViT architecture. The DEiT model proposed by Touvron et al. (2021) was developed to overcome the performance degradation of the traditional ViT method during training with limited datasets. This model is a data-efficient variation of the transformer, which enables high accuracy rates to be achieved during the training process using smaller datasets. The main novelty of the DEiT model is its ability to learn effectively with a limited number of images, owing to the distillation technique and unique data augmentation methods added to the training process.

3. Experimental studies and results

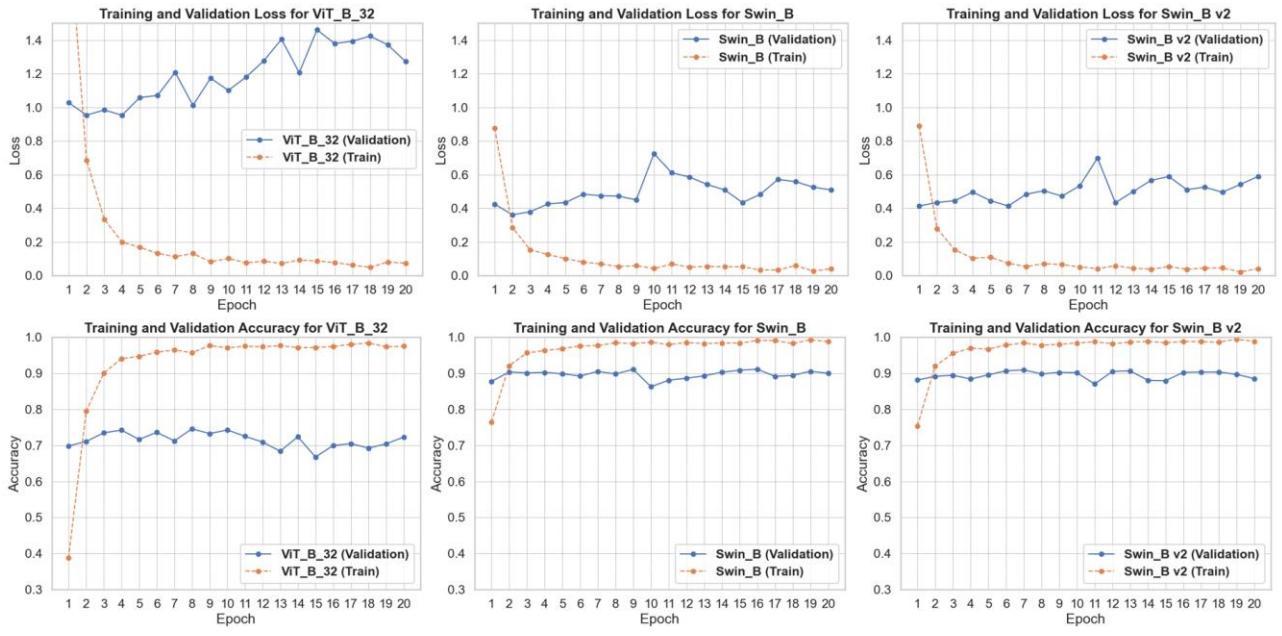
In this study, transformer-based deep learning models, which have shown high success in the literature, are preferred for the automatic recognition and classification of Turkish cuisine dishes from images. The selected methods included ViT, Swin_B_V1, Swin_B_V2, ConvNeXt, BEiT, and DEiT. This study aimed to compare the performance of these methods in learning and classifying complex visual features in Turkish food images. In this study, cross-entropy loss and accuracy metrics were prioritized for performance measurement, and recall, precision, f1-score, and Cohen's kappa values were also considered in the test data. In the datasets, the clusters provided by the original datasets were used with the training and test data at 80% and 20%, respectively. For these, train.txt and test.txt files in the meta folder of the Food4, Food15, and Food24 datasets were used. In the Turkish Food - 102 dataset, sub-datasets were determined in the same proportions, and train.txt and test.txt files were created for the names of the image files to be used.

In this study, commonly adopted hyperparameter values were employed during the training of deep learning models. The mini-batch size was set to 32, and the models were trained for 20 epochs. The learning rate was configured as 1×10^{-4}, and Adam was selected as the optimization algorithm. Input images were resized to 224×224 pixels to match the model requirements, and a patch size of 16×16 pixels was used in Vision Transformer-based architectures. These hyperparameters align with recommended values in the literature and are intended to promote stable learning and improved generalization performance.

3.1. Studies on Food4 dataset

The loss and accuracy values produced by each model during the training and validation processes for the Food4 dataset, which contains four classes, are shown in separate graphs in Figure 6. In all figures, the values of the training and validation data are represented by similar lines and colors. The loss and accuracy graphs of each transformer model are listed below.

When Figure 6 is examined, it is noteworthy that the loss values of all models in the training phase are very close to 0, and the accuracy values are very close to the maximum value of 1. However, in the validation phase, there were clear differences in both loss and accuracy for all models. In particular, in the ViT model, the validation loss value is slightly below 1 in the first epochs and increases after the 5th epoch. The validation accuracy of the ViT model remained at 0.75. On the other hand, Swin_B_V1, Swin_B_V2 and ConvNeXt models produced similar and successful results. All three models managed to stay above 0.9 in the validation accuracy value, while the DEiT model produced results close to this.



► ***The figure 6 continues on the following page!***

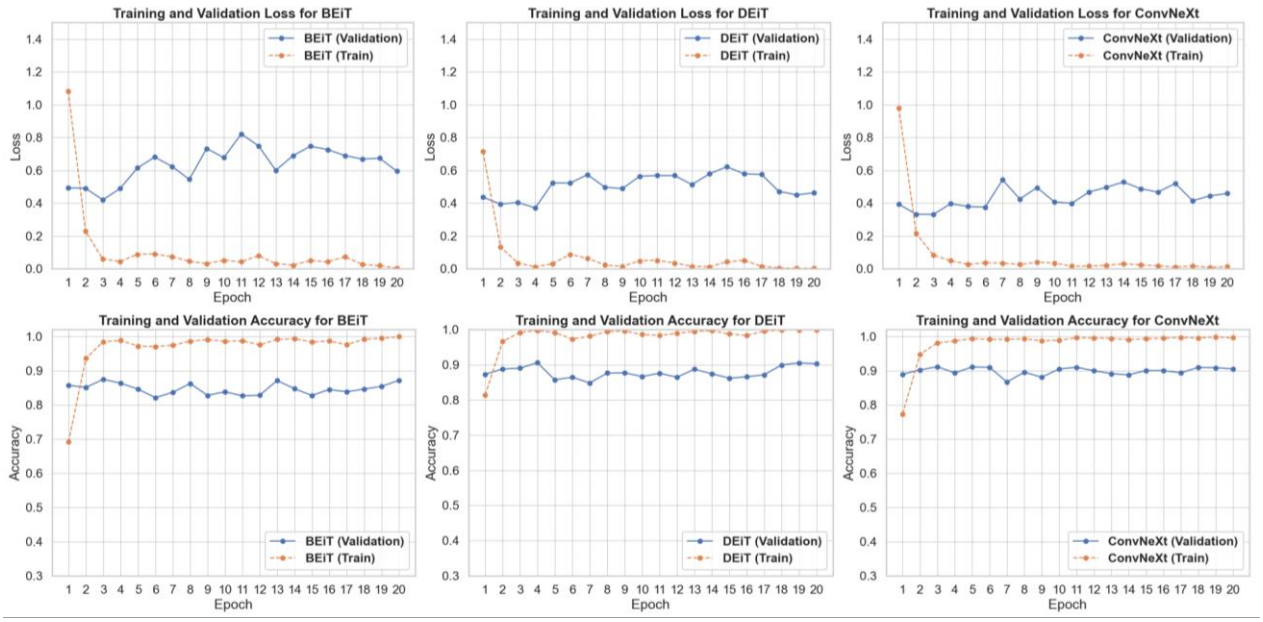


Figure 6. Accuracy and loss values obtained from all models in train and validation phases.

Table 1 shows the loss and accuracy values produced by the six different models in the Food4 dataset during the validation process. One of the first noteworthy facts in the table is that the models generally reached their most successful values in the first epochs. However, in terms of accuracy, the results of the models, except ViT and BEiT, were very close to each other (0.989). ConvNeXt achieved the lowest loss values.

Table 1. Loss and Accuracy values obtained in the validation phase from the Food4 dataset

	Validation Loss Values						Validation Accuracy Values					
Epoch	**ViT**	**Swin_V1**	**Swin_V2**	**ConvNeXt**	**BEiT**	**DEiT**	**ViT**	**Swin_V1**	**Swin_V2**	**ConvNeXt**	**BEiT**	**DEiT**
1	**0,150**	0,083	0,067	0,048	0,680	0,084	**0,946**	0,976	0,982	0,988	0,722	0,975
2	0,172	**0,055**	0,052	**0,043**	0,245	0,053	0,943	0,988	0,985	**0,989**	0,911	0,986
3	0,229	0,065	**0,045**	0,045	0,147	0,087	0,938	0,980	0,986	0,988	0,943	0,976
4	0,207	0,073	0,079	0,096	0,296	0,050	0,938	0,983	0,981	0,975	0,908	0,988
5	0,207	0,053	0,067	0,045	0,160	0,059	0,939	**0,989**	**0,989**	0,986	0,951	0,986
6	0,218	0,088	0,128	0,052	0,216	**0,056**	0,936	0,981	0,967	0,988	0,937	**0,989**
7	0,198	0,097	0,091	0,054	0,122	0,058	0,931	0,984	0,980	0,987	0,961	0,988
8	0,312	0,080	0,152	0,048	0,118	0,059	0,916	0,980	0,969	0,987	0,965	0,988
9	0,237	0,120	0,139	0,068	0,116	0,060	0,931	0,974	0,975	0,987	**0,970**	0,988
10	0,264	0,088	0,112	0,058	**0,116**	0,060	0,933	0,980	0,976	0,988	0,970	0,988
11	0,236	0,080	0,102	0,057	0,116	0,061	0,932	0,984	0,980	0,987	0,970	0,988
12	0,291	0,135	0,130	0,069	0,117	0,062	0,925	0,976	0,967	0,984	0,970	0,988
13	0,526	0,143	0,081	0,064	0,117	0,063	0,856	0,975	0,982	0,986	0,970	0,988
14	0,296	0,132	0,062	0,049	0,118	0,063	0,922	0,979	0,986	0,989	0,970	0,988
15	0,316	0,147	0,073	0,054	0,119	0,064	0,917	0,964	0,989	0,989	0,969	0,988
16	0,378	0,078	0,094	0,075	0,119	0,065	0,907	0,988	0,987	0,985	0,969	0,988
17	0,283	0,055	0,119	0,070	0,120	0,065	0,922	**0,989**	0,980	0,985	0,969	0,988
18	0,347	0,073	0,053	0,071	0,120	0,066	0,907	0,983	0,988	0,983	0,969	0,988
19	0,305	0,065	0,085	0,105	0,121	0,066	0,916	0,986	0,986	0,981	0,969	0,988
20	0,359	0,070	0,104	0,075	0,122	0,067	0,890	0,988	0,977	0,982	0,969	0,988

Figure 7 shows the loss and accuracy values in a single graph for a clearer comparison of the models with the validation data. In these graphs, the DEiT and ConvNeXt models are superior to the other models. All models, except ViT, were stabilized, particularly after the 7th epoch. When the table and graphs are evaluated together, it is observed that the Swin_B_V1 and Swin_B_V2 models achieve the highest verification accuracy (98.9%) and show the most stable performance during the training process. The ConvNeXt and DEiT models also achieved high accuracy rates (98.6%-98.9%); however, fluctuations in the verification loss values were

observed across epochs. The BEiT and ViT models achieved lower validation accuracies (95.1% and 94.6%, respectively) than the other models and showed significant increases in loss values during the training process. In particular, the BEiT model was found to learn quickly from low accuracy levels at the beginning but exhibited instability in later epochs.

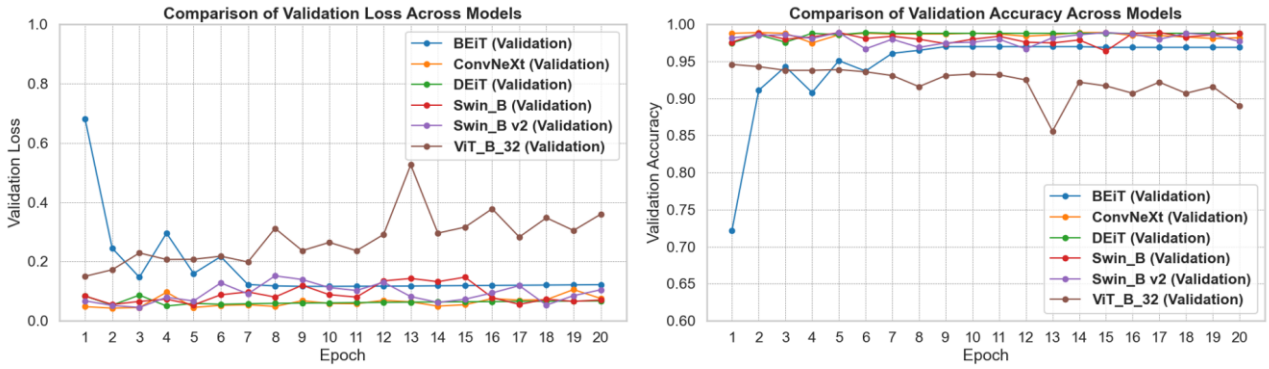


Figure 7. Accuracy and loss values obtained from all models in the validation phase

The Swin_B_V2 model stands out with its high accuracy rates and low loss values, whereas the Swin_B_V1 model achieved a similar level of accuracy with a shorter epoch duration. Although the ConvNeXt and DEiT models offer high accuracy rates, they are vulnerable to overlearning owing to epoch-based fluctuations. The BEiT and ViT models, despite being transformer-based, exhibited lower accuracy and higher loss values than the other models, indicating that additional improvements in the optimization processes are required. The results show that the Swin Transformer architecture stands out with high accuracy and low loss values on the dataset and is a strong option for similar tasks.

3.2. Studies on Food15 dataset

Studies on Food15 were conducted following similar processes as Food4. However, instead of presenting the results of all models separately, graphs showing the models together are preferred. In the experimental studies, the Swin_B_V2 and Swin_B_V1 models achieved 95.4% and 94.9% validation accuracy on the dataset, respectively. The ConvNeXt model achieved the highest accuracy (95.9). Although the DEiT Base model initially exhibited a fast learning curve, by the 5th epoch, there was a significant increase in the validation loss values, and the accuracy level decreased.

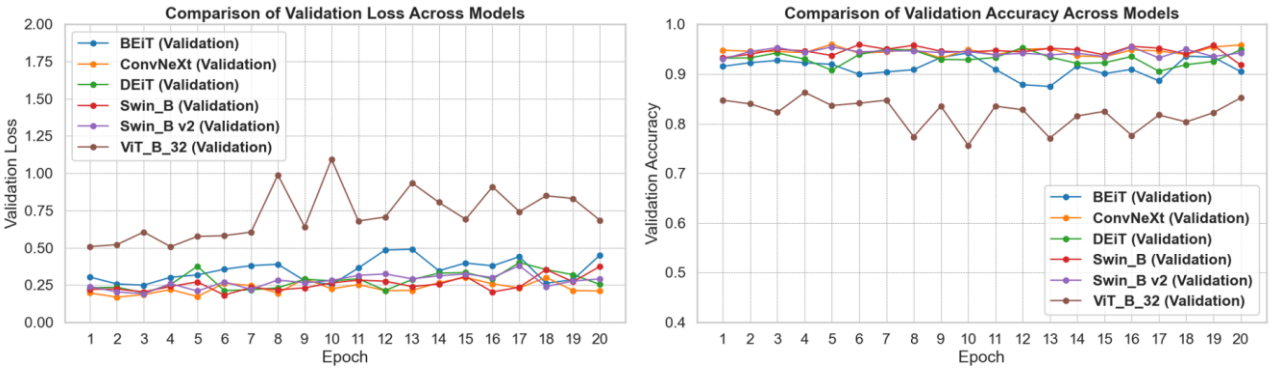


Figure 8. Validation accuracy and loss values obtained using the Food15 dataset

The BEiT and ViT models exhibited lower accuracy than the other models. The validation accuracy of the BEiT model was 91.9%, whereas that of the ViT model was 86.3%. Although the BEiT model started with a high loss at the beginning of the epoch, and the accuracy rate increased over time, the validation loss values started to increase in the last epochs. The ViT model, on the other hand, showed an unstable learning process, exhibiting large fluctuations in the verification loss values during the epoch. This shows that it is critical to determine the appropriate training hyperparameters, particularly for transformer-based architectures.

The ConvNeXt model achieved the highest accuracy on the Food15 dataset, while the Swin Transformer-based models approached this model and showed the most stable performance during the training process. The DEiT Base model, on the other hand, shows high performance at the beginning of the epoch process, but in the following epochs, it shows an increase in loss values and a decrease in accuracy. The fact that the BEiT and ViT models exhibited lower accuracy rates and higher loss values than the other models indicates that these models require additional improvements in the optimization process.

3.3. Studies on Food24 dataset

In this study, the epoch-wise performance of different transformer models trained using the Food24 dataset was compared, and the results are presented graphically in Fig 9. Although the ConvNeXt model had a high loss value at the beginning, it performed competitively, increasing its validation accuracy to 91.0% over time. The Swin_B_V1 and Swin_B_V2 models produced the best results after the ConvNeXt model, reaching validation accuracies of 90.3% and 89.5%, respectively. Although the DEiT Base model showed rapid learning in the first epochs of training, the validation loss increased in the following epochs, and the accuracy level dropped to 85.7%. This fluctuation suggests that the model tends to overfit.

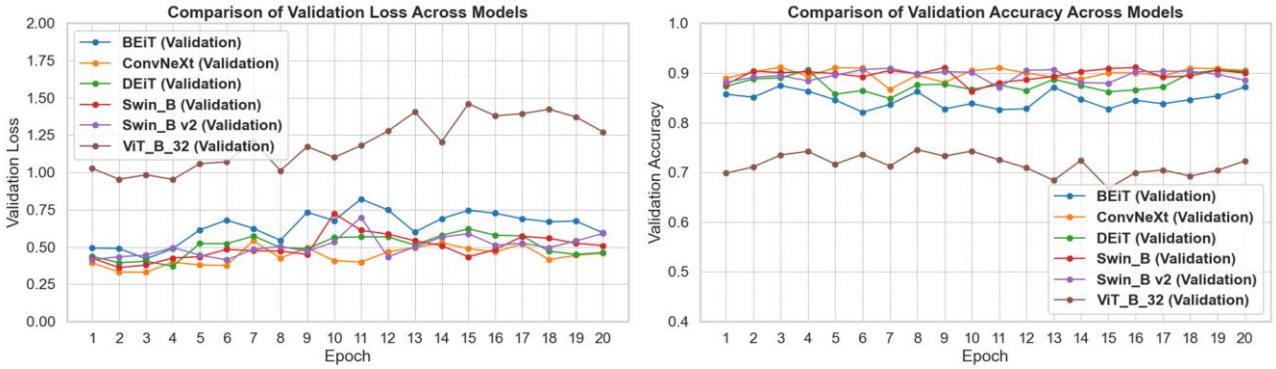


Figure 9. Validation accuracy and loss values obtained using the Food24 dataset

The BEiT and ViT models were characterized by lower accuracy rates and higher verification losses than the other models. The BEiT model was able to increase the verification accuracy to 87.4% during the epoch, but the verification loss increased in the last epochs, showing unstable performance. The ViT model had the lowest accuracy rate (74.2%), and it was observed that the model could not achieve a steady improvement during the learning process. This shows that transformer-based models should be optimized with larger datasets and appropriate hyperparameters. Swin_B_V2 was one of the most stable models with high accuracy and low losses, following a balanced course in terms of loss and accuracy values.

3.4. Studies on Turkish Food – 102 dataset

In the studies with the Turkish Food 102 dataset, all metrics belonging to the training and validation phases were produced according to the epochs, as in the other datasets. The loss and accuracy values in the validation phase are shown in Figure 10. The ConvNeXt model used in this dataset showed that it adapted quickly to the dataset by achieving high accuracy rates in the early stages of training and achieving a validation accuracy of 89.0%. Furthermore, the ConvNeXt model exhibited a more consistent loss reduction during training than the other models. This shows that the model can be effective on both small and large datasets. Swin_B_V1 and Swin_B_V2 models based on Swin Transformer achieved validation accuracy values of 89.9% and 88.8% respectively. However, the loss values observed during the epoch indicate that the Swin Transformer models are more costly in terms of complexity and computational load. Although models based on the transformer architecture are known to work better with large datasets, the fact that the ConvNeXt model is CNN-based and achieves competitive accuracy levels with a lower number of parameters makes it an ideal choice for practical applications. The DEiT model achieved a rapid increase in accuracy in the early epochs; however, an increase in verification losses was observed in the later epochs. This suggests that the model tends to overlearn and requires further regularization methods.

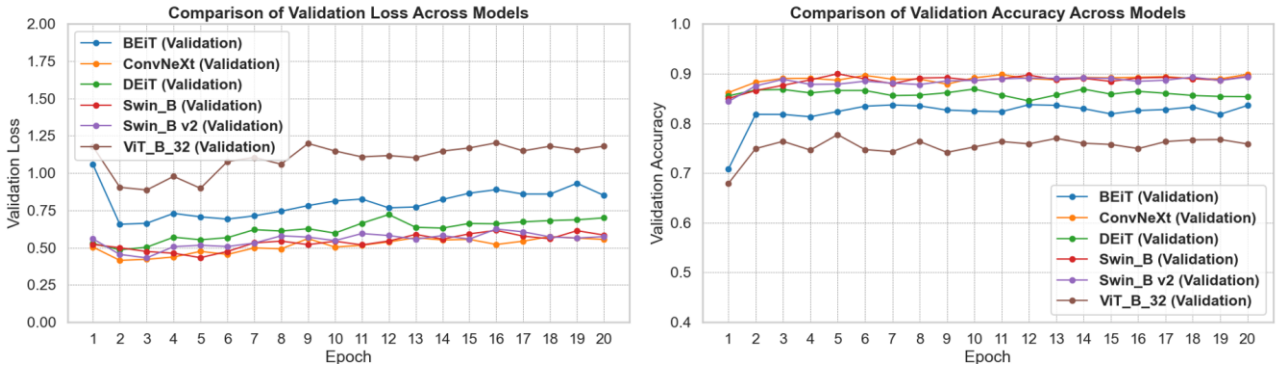


Figure 10. Validation accuracy and loss values obtained using the Turkish Food-102 dataset

In contrast, the BEiT and ViT models had lower accuracy rates and higher validation losses than the other models. Although the BEiT model achieved a certain stability during the epoch process, it could not exceed an accuracy of 82.3 %. The ViT model, on the other hand, had the lowest accuracy, with a validation accuracy of only 77.3%. These results show that transformer-based models are more sensitive to high parameter requirements and long training processes. The ConvNeXt Base model is a strong alternative, achieving high accuracy and a more stable loss reduction during the training process. In conclusion, the ConvNeXt model offers a more efficient and stable learning process than transformer models while maintaining the strengths of modern CNN architecture. ConvNeXt is the most balanced and feasible model, particularly for real-time applications and situations in which the computational cost is critical.

Overall, the ConvNeXt, Swin_B_V1, and Swin_B_V2 models stand out with high accuracy rates and stable learning processes compared to the other models. Although the DEiT Base model achieved good results at certain epochs, it is considered to have a tendency to overlearn because of the decrease in verification accuracy and increase in loss values.

3.5. Extracting mislabeled images in datasets

Deep learning models are sensitive to mislabeled examples in datasets, and such errors can negatively affect the learning process of the model. In this study, the images were examined, and mislabeled images were found in the Food4, Food15, Food24, and TurkishFood102 datasets. Example images of mislabeled images are shown in Figure 11.

Figure 11. Examples of mislabeled images in the Food4, Food15, and Food24 datasets

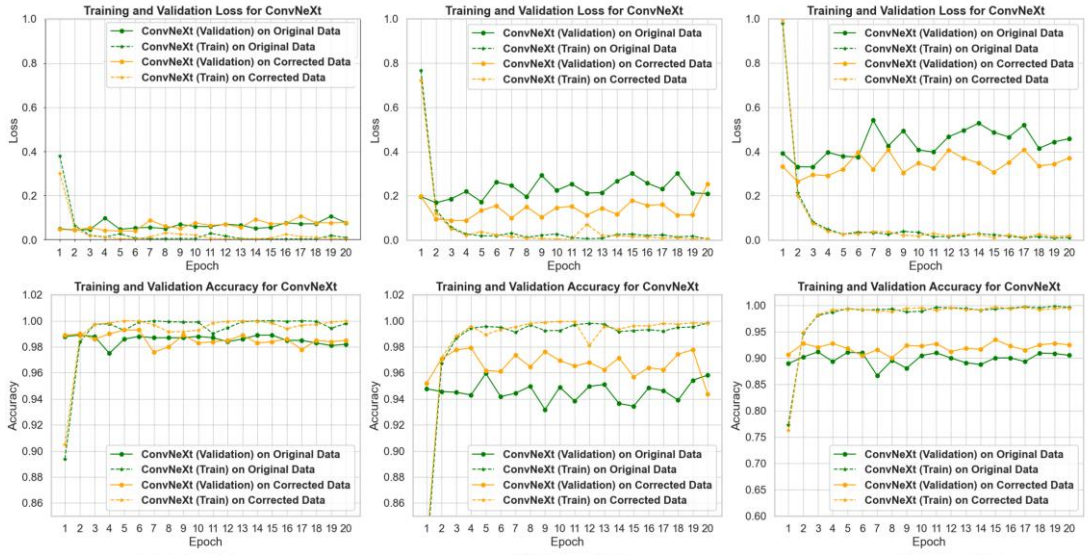
As can be seen from the figure, some images are labeled with different food types, and some images are not related to any food types. Considering that the datasets were created with libraries that collect images automatically over the Internet, this may be considered normal. In addition, the "Lokum" class in the Food15 dataset, which has the highest number of mislabeled images, has classification difficulties owing to cultural factors. While the term "lokum" in Turkish describes a food item, it also has different metaphorical and extended meanings in Turkish culture. For example, a well-cooked steak can be colloquially described as "like a Turkish delight," and it is also frequently used in animal nomenclature. This polysemy caused different objects in the dataset to be mistakenly included in the "Turkish Delight" category and negatively affected the classification success of the model. Figure 12 shows examples of incorrectly labeled objects in the "Lokum" category. The figurative meanings of the keywords used in the preparation of the datasets caused incorrect images to be captured.

Figure 12. Examples of mislabeled images of the "Turkish Delight" class in the Food15 database

A multi-stage validation process was followed to detect the mislabeled images. First, ConvNeXt, DEiT, BEiT, Swin Transformer, and ViT models trained on each dataset were evaluated to identify instances misclassified by most models. In this process, the identified images were manually checked, and instances with labeling errors were removed from the datasets. Thus, we prioritized data that all models misclassified rather than images in which only a single model failed. Consequently, only images with high error rates, misclassified by most models, and identified as incorrect by manual verification were removed from the datasets.

3.6. Studies Conducted on Corrected Datasets

The corrected datasets, in which mislabeled images were removed, were re-evaluated using the ConvNeXt model. The main reason for choosing the ConvNeXt model was that it achieved high accuracy and low loss values in the previous stages. In addition, although transformer-based models, such as Swin Transformer, ViT, DEiT, and BEiT, can achieve effective results with large datasets, they can be prone to overlearning owing to the high parameter requirements for relatively small and medium-sized datasets. The ConvNeXt model, on the other hand, preserves the efficient computational power of the CNN architecture while providing more stable and generalizable results with extended convolution kernels and advanced normalization techniques.



(a) Food4 (b) Food15 (c) Food24

Figure 13. Loss and accuracy values obtained in the training and validation phases for original and corrected datasets.

Experiments on the ConvNeXt model have shown that it is more stable and achieves higher accuracy. After removing erroneous samples from the datasets, the validation accuracy of the model increased, and the number of missing values decreased. The results are shown in Figure 13, along with those from the original datasets. The first, middle, and last columns in Figure shows the results obtained from the Food4, Food15, and Food24 datasets, respectively. The values from the training phase are listed in the first row, and the values from the validation phase are listed in the second row.

The updated training process on the Food4 dataset showed a significant improvement compared to previous versions, with the validation accuracy of the model reaching 99.3%. The validation loss values were significantly reduced, and the model exhibited a stable learning process. In the Food15 dataset, the validation accuracy of the model reached 98.0% after the removal of mislabeled samples, and the loss values decreased significantly. This proves that the data cleaning process enabled the model to produce more reliable and consistent predictions. In the Food24 dataset, the model increased the validation accuracy to 93.5% and showed more stable performance than previous versions by reducing missing values.

These results clearly show that one of the main reasons for the drop in model performance is the mislabeled samples in the datasets. The fact that the ConvNeXt model provides the best results after removing the incorrect data proves its flexibility and robustness and shows that it can be a more resilient model for mislabeling problems. In this context, it is suggested that in future classification studies, the quality of the dataset should be improved, mislabeled examples should be eliminated, and hybrid CNN architectures, such as ConvNeXt, which provide a balance between computational efficiency and accuracy, should be preferred in model selection.

The Confusion Matrix plots obtained from the cleaned datasets of the ConvNeXt model are shown in Figure 14. In addition, bar graphs of the accuracy values of the classes in the relevant dataset are presented for each matrix. Very high accuracy values for all classes in the Food4 dataset are clearly visible in these graphs. Misclassifications occurred, especially between the hamburger and steak classes. This is thought to be due to the ingredients used in these two classes (especially bread). The confusion matrix and class-wise accuracy graphs of the cleaned Food15 dataset show that the most striking result is a transition from the "borek" class to the "simit" class. In the Food24 class, a similar misclassification for the "borek" class is noteworthy. In addition, low accuracy values for the "et_sote" and "pirinc_pilavi" classes of this dataset were observed. The reason for the low accuracy of these dishes is the high number of common ingredients used for other classes in the images of these dishes. This may be a result of the frequent use of certain ingredients in many dishes in Turkish food culture.

All performance values obtained from the corrected datasets are listed in Table 2. The accuracy values improved by 2-5% from the values obtained from the original images. However, there were also significant decreases in the loss values. In addition to the loss and accuracy values, Cohen's kappa and top-5 accuracy values are also presented in this table.

Table 2. Performance rates obtained from corrected datasets

Dataset		Precision	Recall	F1-score	Loss	Accuracy	Cohen's Kappa	Top-5 Accuracy
Food4	Original	0,989	0,989	0,989	0.043	0.989	0.985	Nan
	Corrected	0,993	0,993	0,993	0.038	0.993	0.991	Nan
Food15	Original	0,960	0,960	0,960	0.173	0.960	0.956	0.997
	Corrected	0,979	0,979	0,979	0.087	0.980	0.977	0.997
Food24	Original	0,915	0,911	0,912	0.330	0.912	0.907	0.989
	Corrected	0,935	0,935	0,934	0.307	0.935	0.932	0.991

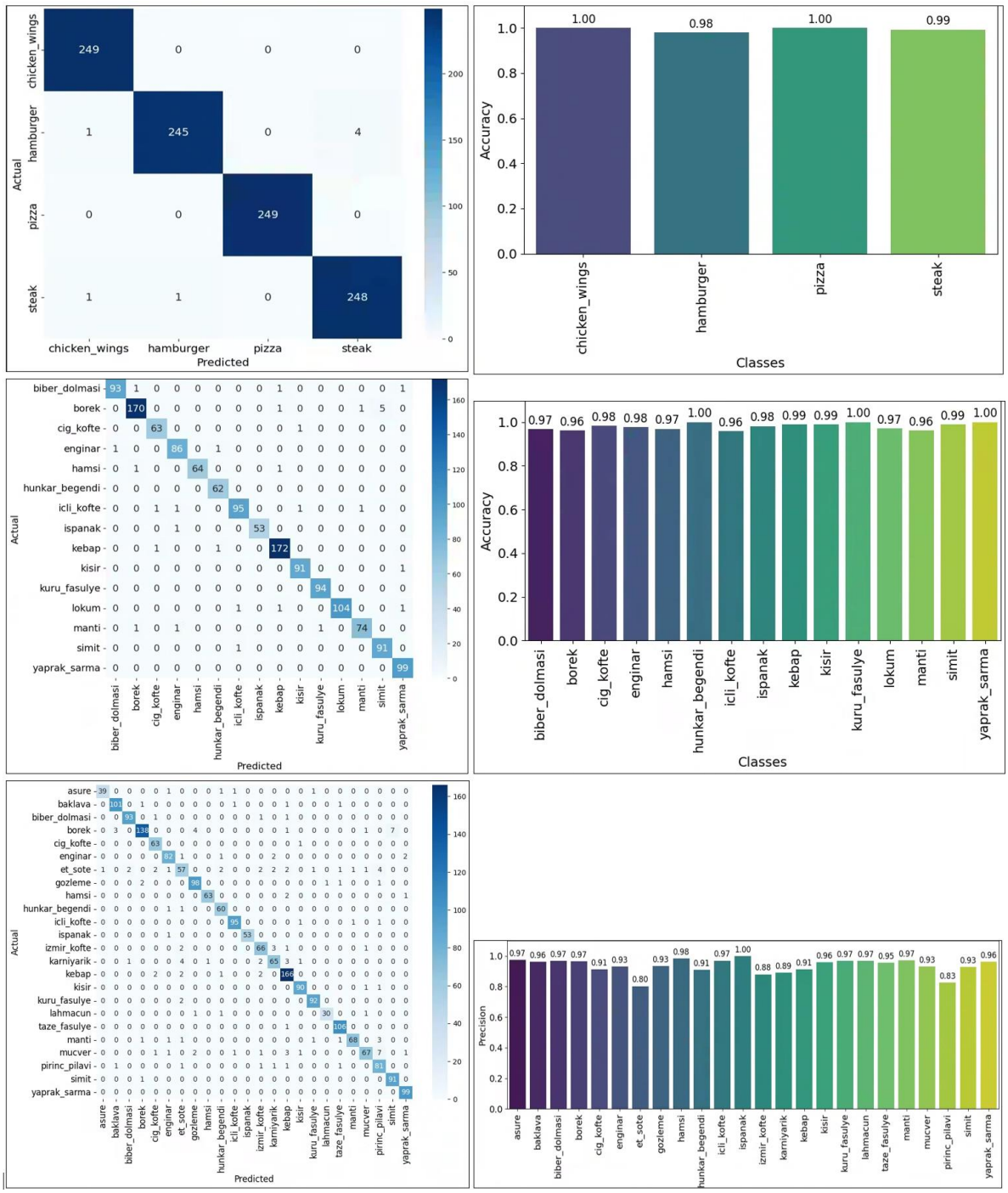


Figure 14. Confusion matrices and class-wise accuracy plots obtained from the corrected Food4, Food15, and Food24 datasets. The first row is for Food4, second, and third rows are for Food15 and Food24 datasets, respectively.

5. Results and discussion

This study aimed to comprehensively analyze the performance of transformer-based deep learning architectures in the classification of Turkish food images. Transformer-based approaches have produced promising results in food image classification tasks because of their ability to model long-distance correlations in visual data. The ViT, Swin_B_V1, Swin_B_V2, ConvNeXt, BEiT, and DEiT models were tested on four different datasets (Food4, Food15, Food24, Turkish Food-102). The results show that ConvNeXt, Swin_B_V1, and Swin_B_V2 outperform the other methods in terms of both accuracy and training stability. ConvNeXt exhibited the most stable and high performance on all datasets. A comparison of the results obtained in this model with those of other studies in the literature using the same datasets is presented in Table 3. As shown in the table, the accuracy values are more than 5% better for all datasets.

Table 3. Comparison with similar studies using Turkish cuisine food images

Dataset	Study	Model	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
Food4	**Our Study**	ConvNeXt	0,989	0,989	0,989	**0.989**
Food15	Alp (2024)	EfNetV2M	0.870	0.870	0.870	
Food15	Alp (2024)	ResNet101	0.860	0.850	0.850	
Food15	Alp (2024)	VGG16	0.760	0.740	0.750	
Food15	Alp (2024)	ViT	0.900	0.890	0.890	
Food15	Kayikçi vd. (2019)	InceptionV3 + SGD				0.930
Food15	Güngör vd. (2017)	InceptionV3				0.682
Food15	**Our Study**	ConvNeXt	**0,960**	**0,960**	**0,960**	**0.960**
Food24	Kayikçi vd. (2019)	ResNet50				0.710
Food24	Kayikçi vd. (2019)	InceptionV3				0.880
Food24	Kayikçi vd. (2019)	Xception				0.830
Food24	Kayikçi vd. (2019)	InceptionResNetV2				0.850
Food24	**Our Study**	ConvNeXt	0,915	0,911	0,912	**0.912**
Turkish Food-102	Şahin vd. (2021)	TurkishFoodNet_L11				0.840
Turkish Food-102	**Our Study**	ConvNeXt	0,902	0,897	0,898	**0.899**

The study also showed that removing mislabeled images significantly improved the model performance. The mislabeled images in the datasets were cleaned using the previous model results, and the corrected datasets showed an accuracy improvement of 2-4% (Food4:99.3%, Food15:98.0%, Food24:93.5%). This demonstrates the importance of data quality for problems with high visual variation, such as in food image classification.

The study's findings suggest that in the existing literature, transformer-based approaches (Gao et al., 2024; Nijhawan et al., 2024) are in line with the general trend that CNNs offer higher accuracy than CNNs. However, the high parameter and memory requirements (Alp, 2024) of these models render them prone to overlearning from small datasets. The superior performance of ConvNeXt supports the hypothesis of the "strengths of CNN-transformer hybrid models," which was also emphasized by Liu et al. (2022). In the case of Turkish cuisine, accuracy rates above 90% compared to previous studies show that this study makes a significant contribution to the literature.

An unexpected result was that pure transformer-based models, such as ViT and BEiT, produced unstable accuracy and high loss values compared to other models on smaller datasets. This can be explained by the fact that these models have higher data requirements and hyperparameter sensitivity during the training process. Furthermore, labeling errors, especially in the "Turkish delight" class, were found to be derived from cultural contextual semantic ambiguity, suggesting that sociocultural semantics are directly influential in food classification.

One of the major strengths of this study is the systematic testing of different models on multiple datasets and a detailed comparison of the performance of each model. Furthermore, the improvement of the data by eliminating mislabeled images shows that this study offers a holistic approach not only in terms of algorithms but also in terms of data quality. However, the study has limitations, such as cultural meaning shifts or out-of-context labeling of objects, because the datasets were collected online and automatically labeled. Furthermore, the models were trained with only fixed hyperparameters and 20 epochs, which may not fully reflect the potential performance of some models.
The findings are directly applicable to smart restaurant recommendation systems specific to Turkish cuisine, nutrition-tracking applications, and cultural heritage digitization projects. The high accuracy and computational efficiency of the ConvNeXt model also offers significant advantages for its integration into mobile platforms.

In the future, visual-semantic integration methods (e.g., ontologies or multimodal ontologies) that enable richer contextual information integration in food classification tasks will be developed. ontologies or multimodal transformer architectures) could be explored. Furthermore, enriching culture-specific datasets with semantic integrity can improve classification performance. In this context, the application of semi-supervised learning strategies using user-tagged images on social media may offer new opportunities.

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.

Data and Code Availability

The dataset introduced and used in this study—comprising labeled images of Turkish foods—is publicly available on Kaggle. The dataset and code can be accessed via: https://www.kaggle.com/datasets/bingolo

References

Alp, S. (2024). Transfer Learning for Turkish Cuisine Classification. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(6), 49-50.

Ansari, M. Y., & Qaraqe, M. (2023). Mefood: A large-scale representative benchmark of quotidian foods for the middle east. *IEEE Access*, 11, 4589-4601.

Arslan, B., Memiş, S., Sönmez, E. B., & Batur, O. Z. (2021). Fine-grained food classification methods on the UEC food-100 database. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 3(2), 238-243.

Bao, H., Dong, L., Piao, S., & Wei, F. (2022). BEiT: BERT Pre-Training of Image Transformers, *arXiv preprint arXiv:2106.08254*.

Bossard, L., Guillaumin, M., & Van Gool, L. (2014). Food-101 – Mining Discriminative Components with Random Forests. ECCV 2014 (C. 8694, ss. 446-461). Springer International Publishing.

Boyd, L., Nnamoko, N., & Lopes, R. (2024). Fine-grained food image recognition: A study on optimising convolutional neural networks for improved performance. *Journal of Imaging*, 10(6), 126.

Chen, J., & Ngo, C. (2016). Deep-based Ingredient Recognition for Cooking Recipe Retrieval. Proceedings of the 24th ACM International Conference on Multimedia, 32-41.

Crystal, A. A., Valero, M., Nino, V., & Ingram, K. H. (2024). Empowering Diabetics: Advancements in Smartphone-Based Food Classification, Volume Measurement, and Nutritional Estimation. *Sensors*, 24(13), 4089.

Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., & Gelly, S. (2020). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*.

Ergün, Ö. Ö., & Özturk, B. (2018). Türk mutfağı için ontoloji tabanli semantik gösterim. 26th IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2018, 1-4.

Gao, X., Xiao, Z., & Deng, Z. (2024). High accuracy food image classification via vision transformer with data augmentation and feature augmentation. *Journal of Food Engineering*, 365, 111833.

Gokhale, A., Chavan, A., & Sonawane, S. (2023). Leveraging ML techniques for image-based freshness index prediction of fruits and vegetables. In 2023 IEEE International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (pp. 1-6).

Güngör, C., Baltacı, F., Erdem, A., & Erdem, E. (2017). Turkish cuisine: A benchmark dataset with Turkish meals for food recognition. 2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU 2017), 1-4.

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 770-778.

Huang, G., Liu, Z., van der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2017). Densely connected convolutional networks. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1(1), 2261-2269

Kagaya, H., Aizawa, K., & Ogawa, M. (2014). Food Detection and Recognition Using Convolutional Neural Network. Proceedings of the 22nd ACM International Conference on Multimedia, 1085-1088.

Kawano, Y., & Yanai, K. (2015). Automatic Expansion of a Food Image Dataset Leveraging Existing Categories with Domain Adaptation. Içinde L. Agapito, M. M. Bronstein, & C. Rother (Ed.), Computer Vision—ECCV 2014 Workshops (C. 8927, ss. 3-17). Springer International Publishing.

Kayıkçı, Ş., Başol, Y., & Dörter, E. (2019). Classification of turkish cuisine with deep learning on mobile platform. 2019 4th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), 1-5.

Liu, Z., Hu, H., Lin, Y., Yao, Z., Xie, Z., Wei, Y., Ning, J., Cao, Y., Zhang, Z., & Dong, L. (2022). Swin transformer v2: Scaling up capacity and resolution. Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 12009-12019.

Liu, Z., Lin, Y., Cao, Y., Hu, H., Wei, Y., Zhang, Z., Lin, S., & Guo, B. (2021). Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows. Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, 10012-10022.

Liu, Z., Mao, H., Wu, C.-Y., Feichtenhofer, C., Darrell, T., & Xie, S. (2022). A convnet for the 2020s. Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 11976-11986.

McAllister, P., Zheng, H., Bond, R., & Moorhead, A. (2018). Combining deep residual neural network features with supervised machine learning algorithms to classify diverse food image datasets. *Computers in biology and medicine*, 95, 217-233.

Memiş, S., Arslan, B., Batur, O. Z., & Sönmez, E. B. (2020). A comparative study of deep learning methods on food classification problem. 2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), 1-4.

Min, W., Liu, L., Wang, Z., Luo, Z., Wei, X., Wei, X., & Jiang, S. (2020). ISIA Food-500: A Dataset for Large-Scale Food Recognition via Stacked Global-Local Attention Network. Proceedings of the 28th ACM International Conference on Multimedia, 393-401.

Min, W., Wang, Z., Liu, Y., Luo, M., Kang, L., Wei, X., Wei, X., & Jiang, S. (2023). Large scale visual food recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 45(8), 9932-9949.

Nijhawan, R., Sinha, G., Batra, A., Kumar, M., & Sharma, H. (2024). VTnet+Handcrafted based approach for food cuisines classification. *Multimedia Tools and Applications*, 83(4), 10695-10715.

Nogay, H. S., Nogay, N. H., & Adeli, H. (2025). Image-based food groups and portion prediction by using deep learning. *Journal of Food Science*, 90(3).

Sahin, İ., Taşel, B., & Güvensan, M. A. (2021). Diet Application That Can Recognize Turkish Foods With Deep Learning. 2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU),

Shu, Z., Carrasco, R. A., Sánchez-Montañés, M., & García-Miguel, J. P. (2024). A Multi-Criteria Decision Support Model for Restaurant Selection Based on Users' Demand Level: The Case of Dianping. *Information Processing & Management*, 61(3), 103650.

Sood, S., & Singh, H. (2021). Computer Vision and Machine Learning based approaches for Food Security: A Review. *Multimedia Tools and Applications*, 80(18), 27973-27999.

Suddul, G., & Seguin, J. F. L. (2023). A comparative study of deep learning methods for food classification with images. *Food and Humanity*, 1, 800-808.

Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V., & Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 1-9).

Tan, M., & Le, Q. (2019). Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. International conference on machine learning, 6105-6114.

Touvron, H., Cord, M., Douze, M., Massa, F., Sablayrolles, A., & Jégou, H. (2021). Training data-efficient image transformers & distillation through attention. International conference on machine learning, 10347-10357.

Wang, H., Tian, H., Ju, R., Ma, L., Yang, L., Chen, J., & Liu, F. (2024). Nutritional composition analysis in food images: An innovative Swin Transformer approach. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1454466.

Wang, X., Kumar, D., Thome, N., Cord, M., & Precioso, F. (2015). Recipe recognition with large multimodal food dataset. 2015 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW), 1-6.

Zhang, X., Luo, H., Chen, B., & Guo, G. (2020). Multi-view visual Bayesian personalized ranking for restaurant recommendation. *Applied Intelligence*, 50(9), 2901-2915.

Zhao, Y., Zhu, P., Jiang, Y., & Xia, K. (2024). Visual nutrition analysis: Leveraging segmentation and regression for food nutrient estimation. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1469878.

Zhu, L., Spachos, P., Pensini, E., & Plataniotis, K. N. (2021). Deep learning and machine vision for food processing: A survey. *Current Research in Food Science*, 4, 233-249.

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 563-576 doi: 10.17714/gumusfenbil.1653072 Research Article

CBLTwitter: Twitter disaster detection analysis using CNN-BiLSTM deep learning methods

CBLTwitter: CNN-BiLSTM derin öğrenme yöntemlerini kullanarak Twitter felaket tespiti

Halit ÇETİNER*[1], Hakan YÜKSEL[1]

[1]*Isparta University of Applied Sciences, Vocational School of Technical Sciences, Department of Computer Technology, 32000, Isparta*

• Received: 07.03.2025 • Accepted: 15.05.2025

Abstract

Twitter, one of the social media platforms, is one of the reliable sources that allows everyone to express their thoughts and ideas online. In this article, we focus on analysing and analysing the text content of tweets on the Twitter platform in extraordinary situations such as possible disasters or disasters. As a result of real-time information from the Twitter platform, it is possible to help people in possible disaster situations and automatically direct emergency teams. In order to prepare the ground for the realization of these possible scenarios, it is necessary to perform high performance classification by identifying disaster-related content from thousands of raw text content. In this paper, we propose a CBLTwitter model that classifies disasters by increasing the weight scores of their significant values that can capture local patterns and contextual dependencies in raw tweet information. The proposed CBLTwitter model investigates the effectiveness of a contextual word embedder called Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) in predicting disasters from Twitter data. In addition, BERT results are compared with the results obtained from independent word embedding methods called Word2Vec and Global Vectors for Word Representation (GloVe). As a result, the proposed CBLTwitter model of the BERT word embedder in disaster prediction, which consists of an attention-layer Convolutional Neural Network (CNN) and Bidirectional Long Short Term Memory (BiLSTM) architectures, provided performance results competitive with the literature.

Keywords: Attention mechanism, BERT, BiLSTM, CNN, NLP, Twitter data

Öz

Sosyal medya platformlarından biri olan Twitter, herkesin düşünce ve fikirlerini çevrimiçi olarak dile getirmesini sağlayan güvenilir kaynaklardan biridir. Bu makalede, Twitter platformundaki tweet içeriklerindeki olası afet ya da felaket gibi olağanüstü durumlardaki metin içeriklerinin incelenmesi ve analizine odaklanılmıştır. Twitter platformundan alınan gerçek zamanlı bilgiler neticesinde olası felaket durumlarında insanlara yardımcı olmak ve acil durum ekiplerini otomatik olarak yönlendirme yapmak mümkündür. Belirtilen olası senaryoları gerçekleştirilmesine zemin hazırlayabilmek için binlerce ham metin içeriği içerisinden felaket ile ilgili içerikleri tespit ederek yüksek performans seviyesine sahip sınıflandırma gerçekleştirmek gerekmektedir. Bu makalede, felaketler hakkında karar verebilen ham tweet bilgileri içerisindeki yerel kalıpları ve bağlamsal bağımlılıkları yakalayabilen önemli değerlerinin ağırlık puanlarını artırarak sınıflandırma yapan CBLTwitter modeli önerilmiştir. Proposed CBLTwitter modeli, Twitter verilerinden felaket tahmin etmede Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) adlı bağlamsal kelime yerleştiricinin etkinliğini araştırmaktadır. Bunların yanısıra BERT sonuçlarının, Word2Vec ve Global Vectors for Word Representation (GloVe) adlı bağımsız kelime yerleştirme yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Sonuç olarak felaket tahmininde BERT kelime yerleştiricinin attention katmanlı Convolutional Neural Network (CNN) ve Bidirectional Long Short Term Memory (BiLSTM) mimarilerinden oluşan proposed CBLTwitter modeli literatür ile rekabet edebilir performans sonuçları sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: *Dikkat mekanizması, BERT, BiLSTM, CNN, NLP, Twitter verisi*

*Halit ÇETİNER; halitcetiner@isparta.edu.tr

1. Introduction

Social media, which has been used extensively in recent times, has enabled everyone to express their thoughts and opinions online. Through the thoughts and opinions of social media users, it is possible to understand what a company, a country or a customer thinks. In addition, social media analysis is used as an effective tool to understand public opinion on political issues (Vadivukarassi et al., 2018; Birjali et al., 2021). In order for text data obtained from social media to be used by deep learning approaches, the texts must be converted into digital vectors (Khan & Yairi, 2018). Word embeddings are an important part of NLP, supporting the process of extracting information from text data and grouping related document content in the process of converting texts into digital vectors (Semary et al., 2023). In many NLP problems, from multi-label text classification to sentiment analysis, the word embedding layer can make a dramatic difference (Çetiner, 2022). Although word embeddings cannot capture contextual information in text analysis, they can change its meaning (Semary et al., 2023). Word embeddings such as ROBERTa and BERT are approaches developed to provide a solution to the mentioned problem. It is important that these approaches automatically perform sentiment analysis on thousands of tweet content obtained from social media in order to provide meaningful insights (Tan et al., 2022). Performing sentiment analysis in terms of long distance dependencies is a difficult problem given the lexical diversity of texts (Tan et al., 2022). There is a need to study whether array models or transformer-based models are better at processing texts with long-distance dependencies. To address this gap, they have constructed models that combine both array models and transformer-based models (Vaswani, 2017; Tam et al., 2021; Tan et al., 2022). RoBERTa models are structures that perform word and sub-word tokenization and word embedding tasks in word embedding. These models are based on the optimized BERT approach from the transformer family.

Many social media platforms such as Facebook, Instagram, blogs, reviews, Twitter, news sites, shopping sites, etc. have to give space to people's social, political or commercial opinions and reviews. The infrastructures of such structures are based on people communicating, interacting or influencing. In the case of Twitter, the number of users of the Twitter platform increased by 190 million from 2012 to 2020 (Tam et al., 2021). On the Twitter platform, there are 145 million users who tweet on a daily basis for all people in the world to see. In order to extract meaningful data from these tweets, it is necessary to discover hidden meaningful values that will determine contextual polarity (Alami & Elbeqqali, 2015; Zhao et al., 2016). In order to determine contextual polarity, word clues extracted from the sentence context need to be analysed and processed in detail (Shaik et al., 2023). From companies in the business world to political party executives, there is a need for people's feedback on many issues such as products and services. On the Twitter platform, it is possible to measure public reaction to political events through policy analysis. Considering the number of tweets, it is not possible to analyse each of them manually and reach a decision. For the reasons mentioned above, there is a need for new methods to automatically analyse ready-made datasets consisting of thousands of tweet content.

Although statistical-based machine learning-based methods have been developed for extracting meaningful data from raw texts and automatic analysis of related texts, it is reported that the desired performance cannot be achieved and these methods fail in complex text classification problems (Neethu & Rajasree, 2013; Huang et al., 2017). There are Long Short Term Memory (LSTM) based deep learning models that can produce meaningful results in complex texts as well as in textual content with high semantic length. Algorithms developed in different architectures based on renewal neural networks, especially LSTM, enable remarkable results in NLP. These architectural models are recommended for their ability to represent textual data in multiple and consecutive layers (Tam et al., 2021). Deep learning based methods provide good performances in classification processes with layered representation of data without the need for more time and resource consuming feature extraction methods (Çetiner, 2024). There are researches that use Convolutional Neural Network (CNN) based architectural models instead of recurrent neural networks for feature extraction and measurement of response from temporal and spatial data (Yeboah & Baz Musah, 2022; Sitaula & Shahi, 2024; Yang & Li, 2024). Integrating BiLSTM architecture and CNN models, which are very successful in capturing the contextual power of texts, can provide effective results in analysing Twitter texts. In this approach, we aim to improve the analysis performance of Twitter texts by using transformer-based BERT and GloVe and Word2Vec word embedding layers of BiLSTM and CNN architectures.

The stated aims and objectives of this article and its main contributions to the literature are presented below.

- In order to numerically represent the tweet texts after certain pre-processing methods, the word embedding techniques BERT, GloVe, Word2Vec are used separately. These models are unsupervised word vectors

that are effective in capturing word semantics since they are built with a large pre-trained word dataset. BERT, GloVe, and Word2Vec word embedding models are applied to verify the effectiveness of the proposed CBLTwitter model.
- With the integration of CNN architectures and BiLSTM architecture from renewal neural networks, it is possible to capture long distance dependencies by obtaining local features.
- The proposed CBLTwitter model was compared with the studies in the literature with the dataset used in this paper. The accuracy of the Proposed CBLTwitter model is 6% better than other studies in the literature.

The following organization of the paper consists of 4 sections. Section 2 presents the theoretical background of previous work that analyses Twitter text content. Section 3 presents the dataset used in the paper and a detailed description of the proposed CBLTwitter model. Section 4 presents a comparison of the proposed CLTwitter model with the performance results obtained from classical CNN and BiLSTM architectures. Section 5 concludes the paper by presenting recommendations for further improvement of the results obtained in this paper.

2. Related works

In text processing, multilayer perceptron structures can perform complex classification operations involving the classification of texts. CNN architectures can be used in computer vision problems such as image processing, voice recognition, speech recognition or retinal recognition, and can be used to find solutions to NLP problems (Kowsher et al., 2021; Çetiner, 2023; Kishwar & Zafar, 2023; Priya & Deepalakshmi, 2023). Feng et al. conducted a study analysing Weibo short texts containing short text information to analyse the changing emotions depending on the specific event and time (Feng et al., 2024). In their work, it is seen that CNN and BiLSTM architectures are used together with attention mechanisms. In the study where the attention mechanism was used to focus on important words in the text, it was determined that the focus was on obtaining semantic and temporal information of the data. Kim and Lee developed an approach combining BiLSTM and CNN structures with transformer structure on two different audio datasets, Emo-DB and Ravdess, to perform sentiment analysis from speech (Kim & Lee, 2023). In their work, CNN captures the spatial details of the sounds, while the BiLSTM transformer structure captures the speech patterns. Wankhade et al. developed a new approach based on CNN and BiLSTM by combining local and global context dependencies with text pre-processing (Wankhade et al., 2024). It is seen that multiple attention mechanism is used to benefit from the synergistic power of CNN and BiLSTM architectures. They tried to capture the emotions in the texts with the attention mechanism. They focused on capturing local patterns with CNN and contextual dependencies with BiLSTM. Sadr and Soleimandarabi have developed a work that tries to overcome the disadvantages of CNN architectures that require a large amount of training data to determine the polarity of a sentence and depend too much on hyperparameters (Sadr & Nazari Soleimandarabi, 2022). In trying to improve the disadvantages of the CNN architecture, word embedding approaches are used to better represent the words as vectors.

When the studies conducted in text analysis in recent years are examined, it is seen that there are studies based on the attention mechanism. These studies try to capture the contextual information of important characters in texts. In this study, inspired by the aforementioned studies, the effects of three different word embedding approaches in a model with correctly realized pre-processing methods on an approach with CNN and BiLSTM architecture are determined. At the same time, as a result of experimental studies, the location of the attention layer that weights the words according to their importance weights was determined. As a result of 18 layers of deep learning layers, an approach that can compete with the studies in the literature is proposed.

3. Material and methods

Word2Vec, GloVe and BERT methods were used separately for word representation to provide a better representation of sentence semantics obtained from Twitter text analysis. The proposed CBLTwitter model was kept the same on the target task and the effect of the differences in word embedding methods was interpreted. While Word2Vec and GloVe word embedding methods have been used in different NLP methods in vector representation, the BERT method has been used in much less research in the literature (Khatua et al., 2019; Biswas & De, 2022; Dharma et al., 2022; Al-Aidaroos & Bamzahem, 2023; Sitender et al., 2023; Rakshit & Sarkar, 2025). It is thought that the effects of the BERT method in Twitter text analysis, which is potentially suitable for research, will provide support as an important contribution to the literature.

3.1. Material

In this study, we used a dataset containing important information about disasters, such as ID, keyword, location and actual tweet (Addison Howard et al., 2019). It also has tags in the tweet information of the corresponding dataset that identify whether the tweet contains information related to a disaster (Balakrishnan et al., 2022). The dataset contains 7613 training data, 3271 disaster tweets, 21940 unique words, 12.5 average tweet length, 29 maximum tweet length, and 1 minimum tweet length (Deb & Chanda, 2022). At the same time, the dataset consists of 7613 training data and 3263 test training data. The labelling in the dataset is reported to be manually labeled as 1 if it is a catastrophic dataset and 0 otherwise (Deb & Chanda, 2022). The dataset used in the article was obtained without changing the name of the Twitter platform and is a large-scale dataset used in Kaggle competitions.

In the study, after reading the dataset, some basic pre-processing steps were applied to bring the texts to the same standard and to achieve high performance. These steps are presented below, respectively.

- Stop words in the intended texts have been removed.
- Additional spaces, non-alphanumeric characters, internet links, symbols like @, and numeric characters that have no effect on sentiment analysis have been removed.
- Abbreviations were identified and converted to their original formats.
- After performing all the above steps, all normalized texts are converted to lower case.

3.2. BERT

A neural network model that produces different vectors for the same word is called BERT (Devlin, 2018). The BERT model is a contextual model that generates a representation for each word depending on the other words in the processed text (Deb & Chanda, 2022). It is a transformer-based model with multiple attention mechanisms and encoders. BERT architectures are similar to original transformer models in that they can learn contextual embeddings (Vaswani, 2017). Since the BERT model is transformer-based, it has encoder and decoder blocks with softmax activation function to normalize the output probabilities. The words given as input to the model are passed through a spatial encoder that assigns vectors according to their positions. As a result, it is aimed to obtain the contextual meaning of the texts given as input. It also includes multi-head attention mechanisms to determine the relationship of each word with other words in the input texts. The output from the attention vectors is transferred from the network to the decoder block. The decoders have a spatial encoder and multiheaded attention mechanisms. BERT is a computationally expensive model with monolingual classification, requiring limitations on input sentence lengths (Acheampong et al., 2021).

3.3. GloVe

GloVe is a word embedding method that combines two different words: vector and global. GloVe is also a regression model that combines the advantages of windowing models that can capture local context features and global factorization of text (Lin & Pomerleano, 2011; Cho et al., 2013). GloVe obtains a vector space with meaningful information by training on non-zero cells to obtain contextual information on the matrices obtained after digitizing the texts. GloVe is an unsupervised counting-based learning model that obtains embedding vectors by collecting word occurrence statistics (Pennington et al., 2014). In the first step, it separates the words in the text and creates word pairs. GloVE transforms the text collection that is next to each other in a certain order into a feature matrix. This transformation is done with stochastic gradient descent.

$$R = P * Q \approx R' \tag{1}$$

R in Equation 1 represents the community matrix in a certain order. The P and Q parameters consist of random values. The R' value is obtained by multiplying the P and Q values. It is important to minimize the difference between the R' matrix and the R value. It is necessary to determine what P and Q values will minimize the specified difference. The point obtained after convergence of the error with stochastic gradient descent after many iterations is called GloVe word embedding (Mikolov et al., 2013). As a result, it activates the attention mechanism by de-emphasizing rare word pairs (Pennington et al., 2014).

3.4. Word2Vec

Word2Vec is one of the word embedding methods that allows the words in the text to be digitized and represented by vectors (Mikolov et al., 2013). This method includes a single input and hidden and output layers. Different models, namely CBOW and Skip Gram, are used in literature as publications. With CBOW, the central word is predicted from the words around the center. In the Skip Gram technique, the exact opposite of the CBOW method is to predict the words around the central word from the central word. Since the Word2Vec word embedding technique can process trillions of words, it can be used in many tasks in text analysis. Word2Vec can reduce the effect of high-frequency and important words by processing rare words (Rakshit & Sarkar, 2025).

3.5. CNN

CNN architecture is used in NLP problems because of its ability to meaningfully capture local information from a word in the text. In CNN, convolution layers can be used in different numbers, different sizes or kernel values to obtain local features. Feature maps can be obtained by using different number of filters on the input text values. The resulting feature maps have various information extracted from a sentence. In the proposed CBLTwitter model, pre-processed texts are digitized with word embedding methods and then their features are obtained with convolution layers. These features are then structured by pooling layers to select the ones with high discriminative power.

3.6. BiLSTM

The LSTM model has the ability to remember more important information than classical recurrent neural network models. It solves the problem of vanishing gradients in classical recurrent neural networks thanks to the gating mechanism. Input, output and forget gates help to retain contextual information in texts for a long time. These gates consist of sigmoid layers that decide how long each input of information from the texts should pass through a gate. As the sentence lengths in texts increase, LSTM layers are insufficient to protect information (Rajesh & Hiwarkar, 2023). Since normal LSTM only allows forward propagation of information, BiLSTM architecture is proposed to extract contextual information before and after a sentence.

$$i_t = \sigma(W_i.[h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (2)$$

$$e_t = \tau(W_c.[h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (3)$$

$$c_t = f_t.e_{t-1} + i_t.e_t \quad (4)$$

$$o_t = \sigma(W_o.[h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (5)$$

$$h_t = o_t.\tau(c_t) \quad (6)$$

$$f_t = \sigma\left(W_f.[h_{t-1}, x_t] + b_f\right) \quad (7)$$

$$i_t = \sigma(W_i.[h_{t+1}, x_t] + b_i) \quad (8)$$

$$e_t = \tau(W_c.[h_{t+1}, x_t] + b_c) \quad (9)$$

$$c_t = f_t.e_{t+1} + i_t.e_t \quad (10)$$

$$o_t = \sigma(W_o.[h_{t+1}, x_t] + b_o) \quad (11)$$

$$h_t = o_t.\tau(c_t) \quad (12)$$

$$f_t = \sigma\left(W_f.[h_{t+1}, x_t] + b_f\right) \quad (13)$$

Equations 2 through 13 represent the forward and backward movement of the BiLSTM architecture. In the relevant equations i, f, o denote input, forget and output gates respectively. x_t, h_t, c_t, b, W denote the input state, hidden state, current state, bias value, and weight matrix at time t, respectively.

3.7. Attention layer

In text processing, not every word has the same impact on the sentence meaning. Therefore, it is predicted that emphasizing the words with high disaster content with the attention layer can improve the classification performance. In the proposed CBLTwitter model, the outputs from the BiLSTM model are passed through the attention layer to assign a score to them. The outputs from the BiLSTM model are multiplied by the latent state weight values of the attention layer and given as input to the batch normalization layer where inter-layer normalization is performed. The outputs from the BiLSTM model are assigned a weight to extract the important parts of the relevant sentence. The attention layer of Sadr and Soleimandarabi (Sadr & Nazari, 2022) was implemented with modifications.

$$U_i = tanh(X_i W + b) \tag{14}$$

$$a_i = softmax(U_i u) \tag{15}$$

$$\bar{X}_i = a_i \circ X_i \tag{16}$$

U_i in Equation 14 is a context vector. With the input $u \in R^{n-h_i+1x1}$ and U_i in Equation 15, the output $a_i \in R^{n-h_i+1x1}$ is obtained from the softmax activation function. The value u in Equation 15 is the symbol defined to highlight disaster words in the texts (Sermanet et al., 2013; Sukhbaatar et al., 2015). A different representation of X_i in Equation 16 yields $\bar{X}_i$.

3.8. Proposed CBLTwitter

The model proposed in this paper is presented in Figure 1. The proposed model starts its operations by processing the raw data it receives as input. Before passing the raw input data set through the proposed CBLTwitter model, the data is pre-processed, cleaned, emojis are removed, lowercase and uppercase letters are brought to the same standardization. After these processes, an adjustment was made by using the tokenizer class to take up to 5000 words in the texts. Afterwards, the texts were converted into sequences. This step represents the first layer of the proposed CBLTwitter model. After conversion into sequences, GloVe, Word2Vec and BERT methods were used in separate experimental studies.

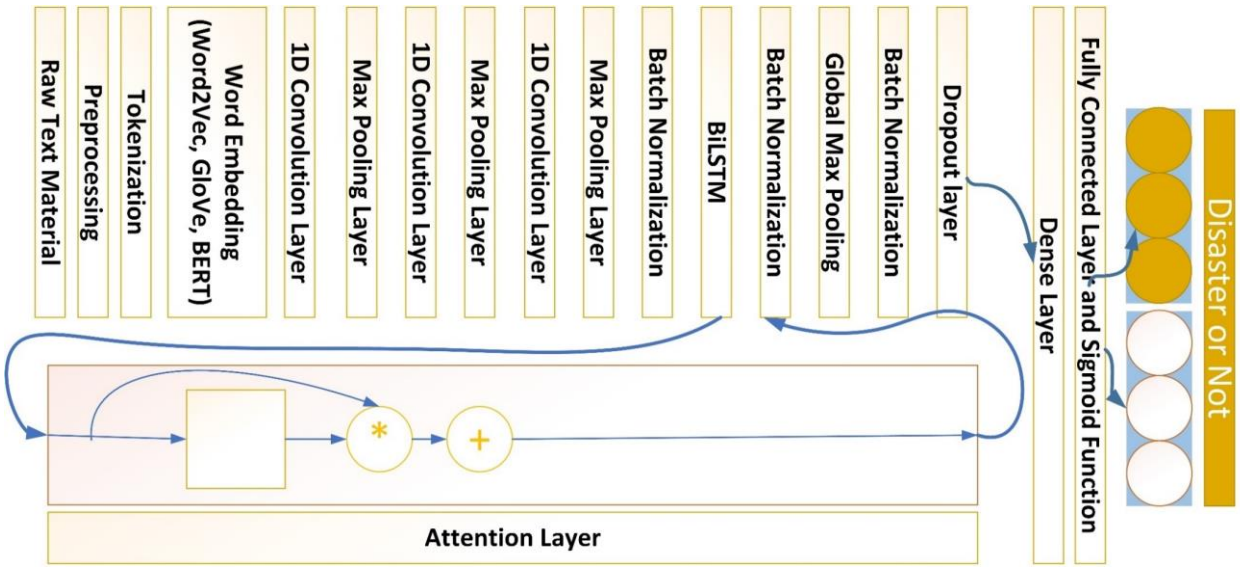


Figure 1. Proposed CBLTwitter model for analysis of disaster tweets

In the second layer of the proposed CBLTwitter model, GloVe, Word2Vec and BERT models are presented separately as input. In the third layer, a 1D convolution layer with ReLU activation function is defined as 4 kernel sizes with 128 filters. In the fourth layer, a max pooling layer with 3x3 windows is applied. In the fifth layer, a 1D convolution layer with the properties defined in the third layer is defined. In the sixth layer, max pooling is applied with the same properties as in the fourth layer. In the seventh layer, similar to the fifth layer, feature assignment was made. In the eighth layer, a max pooling layer is defined similar to the sixth layer. In the ninth layer, Batch Normalization layer is applied which performs normalization between layers. In the tenth layer, a 128-cell BiLSTM layer with high memory that can navigate between forward and backward features is defined. In the eleventh layer, attention layer is defined which assigns weights to the importance value of the input values coming from the BiLSTM layer. In the twelfth layer, Batch Normalization is defined which has the features of the ninth layer. In the thirteenth layer, the global max pooling layer is applied. In the fourteenth layer, Batch Normalization similar to the twelfth layer was added. In the fifteenth layer, a dropout layer with a dropout rate of 0.6 neurons was added to prevent the model from memorizing. In the sixteenth layer, a dense layer with 100 cells was added. The seventeenth layer is a fully connected layer that transfers the features from the previous layers to the classification layer. In the last layer, a layer with a sigmoid activation function was applied due to the two-class nature of the dataset.

The proposed model has 0.42 million parameters, while the computational complexity is 0.40 Floating Point Operations (FLOPs). When GloVe and Word2Vec methods are used, the proposed model reaches approximately 15.42 million parameters. In terms of computational complexity, the proposed model approaches approximately 0.40 million FLOPs when the GloVe and Word2Vec methods are used in order. The BERT model is quite complex compared to both other word embedding methods and the model.

$$O(BERT) = Layer\ count.\ [O(n^2.d) + O(n.d^2)] \quad (17)$$

The complexity of BERT is calculated according to Equation 17. The 12-layered version is used in the BERT word embedding method. In Equation 17, n indicates the length of the input sequence, while d indicates the hidden size. The d value is 768 in BERT base operations. n is taken as 500 in this study. In this case, it will have over a million parameters obtained using BERT. In the BERT base method, approximately 110 million parameters and approximately 1.86 Giga Floating Point Operations (GFLOPs) value is reached in terms of computational complexity.

4. Results and discussion

A proposed CBLTwitter model is presented to create a high performance system that focuses on important words after preprocessing Disaster texts using NLP techniques. Experimental studies were carried out separately with each of the proposed CBLTwitter model, GloVe, Word2Vec and BERT models. The experimental studies were carried out on a computer with NVIDIA GeForce RTX 3060 graphics card and AMD Ryzen 7 5800H processor. Spyder development environment was preferred as the working environment. Although there are experimental environments such as Google Colab, the Spyder environment is less costly and more useful for processes that require long training times such as BERT. For the reasons mentioned above, the algorithm was developed on a local computer environment.

In the experimental studies, the proposed CBLTwitter model was trained based on the parameters presented in Table 1. The parameters were determined based on the reference articles used in the creation of the article. When the studies in the literature were analysed in detail, the parameters in Table 1 were assigned as these parameters were predicted to give superior performance results. The main reason for using these metrics is to make comparisons with recent studies in the literature.

Table 1. Proposed CBLTwitter hyperparameter values according to word embedding methods

Number	Word embedding types	Hyper parameters	Values
1	BERT, Glove and Word2Vec	Optimizer	Adam
2	Glove and Word2Vec	Learning rate	0.001
3	Glove and Word2Vec	Number of epochs	30
4	Glove and Word2Vec	Loss functions	Binary cross entropy

Looking at the results given in Table 2, the BERT transformer word embedding method outperformed other word embedders by contributing positively to the proposed CBLTwitter model, which is composed of the right preprocessing and the right combination of layers. One of the underlying reasons behind the competitive results of the proposed CBLTwitter model with the studies in the literature lies in the correct analysis of the studies in the literature before the study and the combination of important methods in the correct order. Precision, Recall, F1 score and Accuracy formulas were calculated using common formulas from the study in (Çetiner, 2022).

Table 2. Performance result of the proposed CBLTwitter model on different word embeddings

Word embedding	Type	Precision	Recall	F1 score	Accuracy
GloVe	Train	0.92	0.93	0.92	0.93
GloVe	Validation	0.91	0.92	0.91	0.92
Word2Vec	Train	0.94	0.93	0.93	0.94
Word2Vec	Validation	0.93	0.92	0.92	0.93
BERT	Train	**0.98**	**0.97**	**0.98**	**0.97**
BERT	Validation	**0.98**	0.95	0.96	0.96

Among the performance results given in Table 2, the highest results were obtained with the BERT word embedder. The training and validation results obtained with BERT are presented in Figures. 2-5. According to the accuracy performance results given in Figure 2, the training accuracy is 0.97 while the validation performance result is 0.96. Figure 3 shows the precision performance results of the proposed CBLTwitter model by changing only the word embedder while keeping everything else the same. According to the obtained precision results, the training and validation precision value reached 0.98. Figure 4 shows the recall performance results obtained with the same conditions as in the previous two figures. According to the recall results, the training and validation precision values are 0.97 and 0.95 respectively.

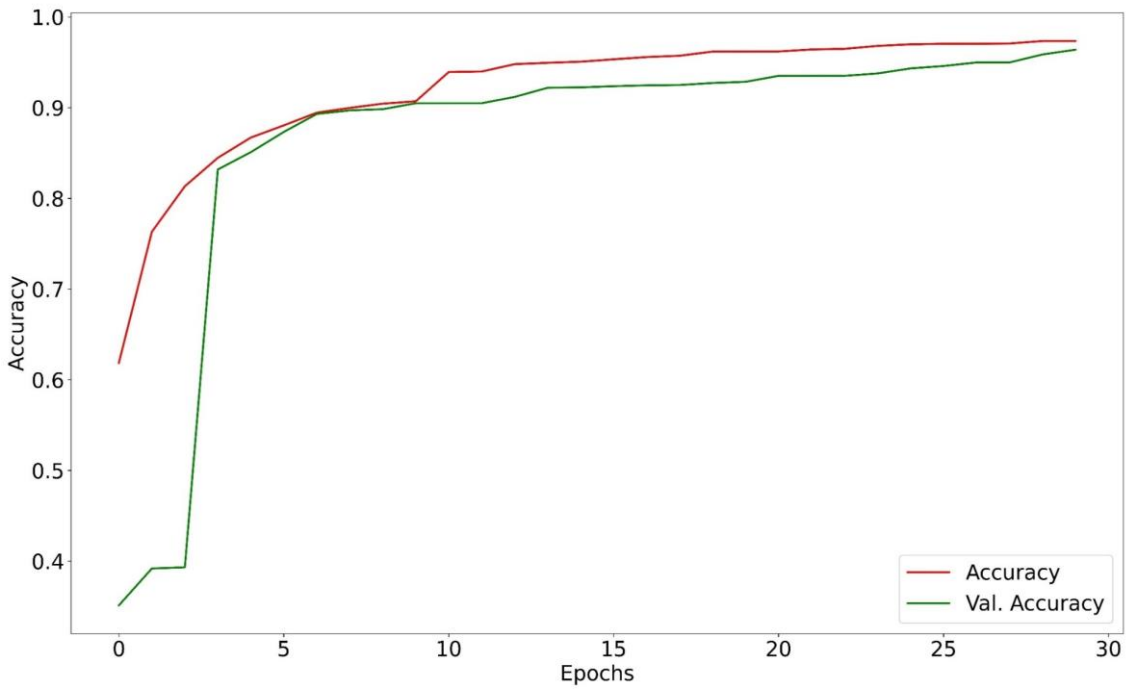


Figure 2. Accuracy performance result of the proposed CBLTwitter model using BERT word embedder

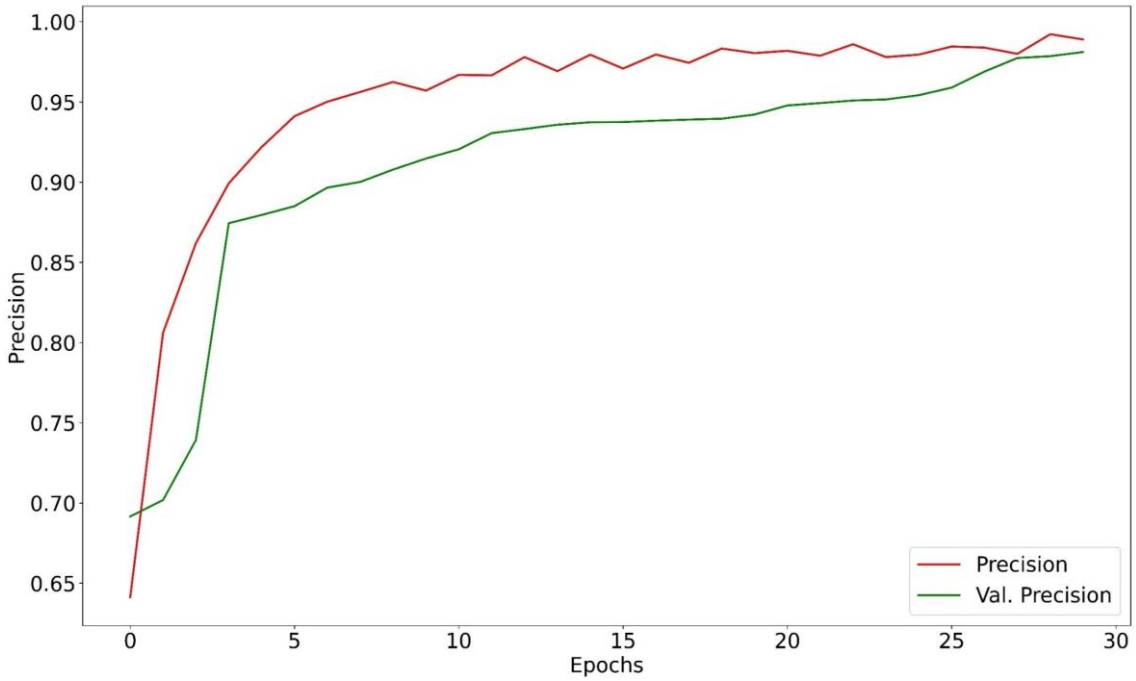


Figure 3. Precision performance result of the proposed CBLTwitter model using BERT word embedder

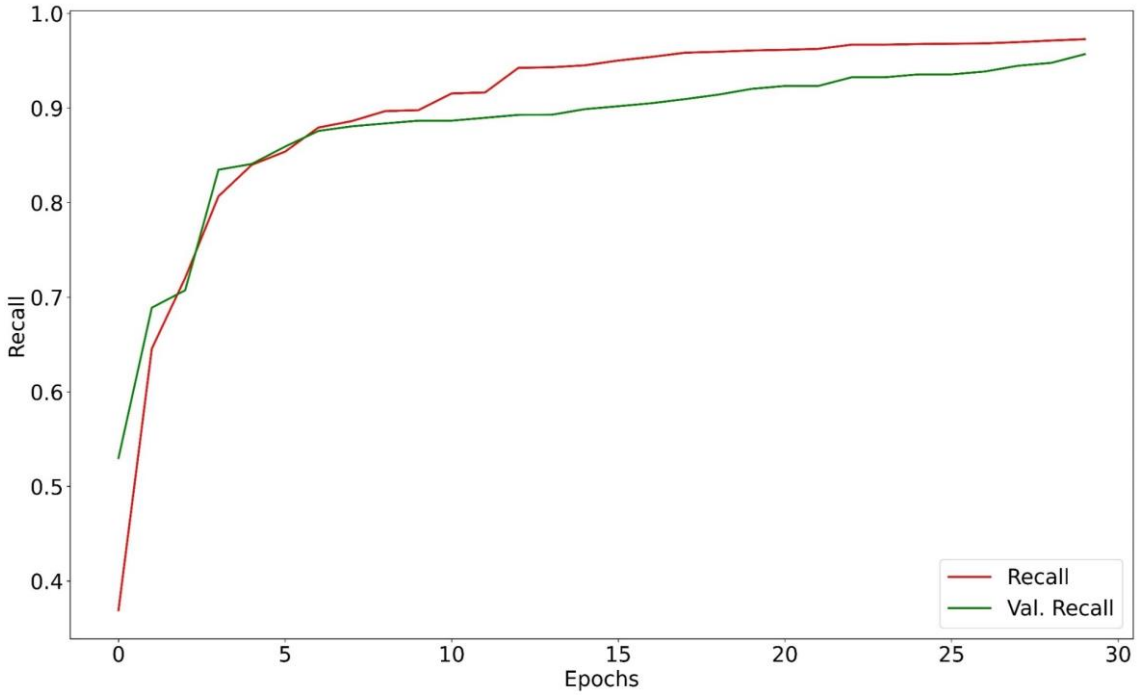


Figure 4. Recall performance result of the proposed CBLTwitter model using BERT word embedder

The visual results given in Figure 5 provide a clearer representation of the numerical figures given in Table 2. In Figure 5, the F1 score training and validation performance result of the proposed CBLTwitter model using the BERT word embedder with the same conditions as in Figure 2, Figure 3 and Figure 4 reaches 0.98 and 0.96 respectively.

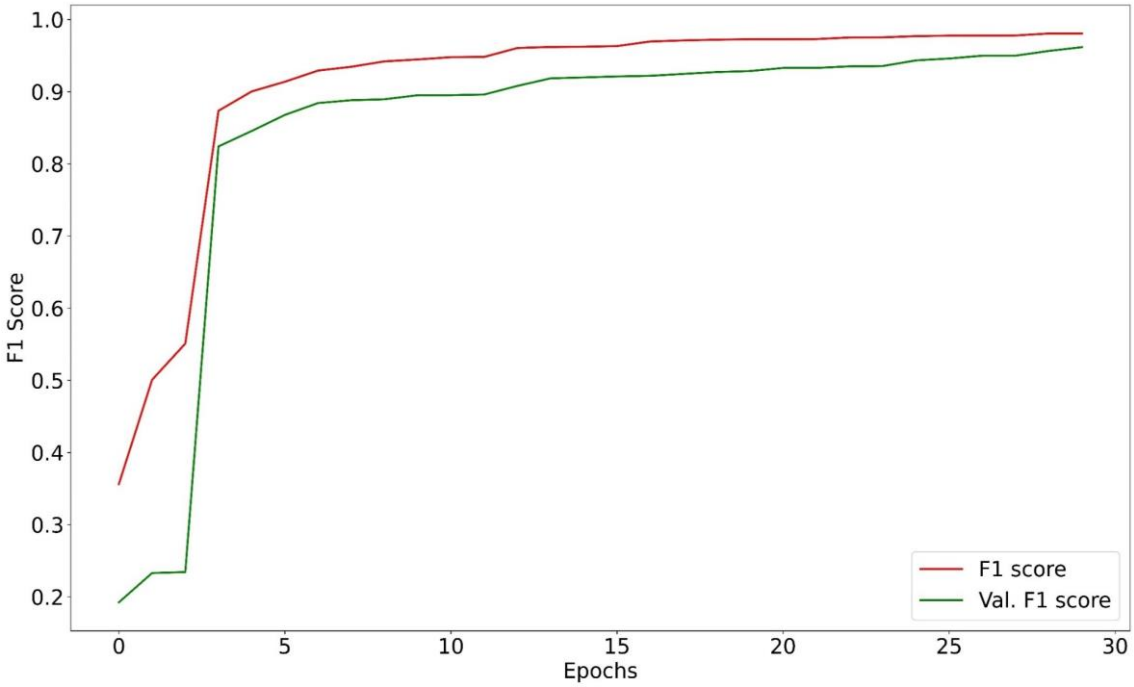


Figure 5. F1 score performance result of the proposed CBLTwitter model using BERT word embedder

By looking at the performance results given in Figures 2, 3, 4 and 5, it is possible to draw a conclusion about the proposed CBLTwitter model. However, in order to provide a more reliable result, a comparison of the proposed CBLTwitter model with state-of-art (SOTA) studies that have been conducted in recent years has been performed. The proposed CBLTwitter model is competitive with studies in the literature using the same dataset. The studies (Sukhbaatar et al., 2015), (Song & Huang, 2021), (Manthena, 2023), (R. et al., 2023), and (Mahajan et al., 2024) in the literature are the studies prepared using the dataset used in this paper. A comparison was made with these studies, each of which is more valuable than the other, and a conclusion was reached. Table 3 shows the performance results obtained with machine learning techniques as well as the performance results obtained with recurrent neural networks. There are also results obtained with convolutional-based deep learning networks.

Table 3. State-of-art (SOTA) performance comparisons on the same dataset

Model & ref.	Precision	Recall	F1 score	Accuracy
BERT-LSTM (Sukhbaatar et al., 2015)	0.85	0.84	0.84	0.87
Logistic Regression (R. et al., 2023)	-	-	-	0.50
BernoulliNB (R. et al., 2023)	-	-	-	0.80
SGD (R. et al., 2023)	-	-	-	0.78
XGB (R. et al., 2023)	-	-	-	0.80
Random Forest (R. et al., 2023)	-	-	-	0.78
BERT (Mahajan et al., 2024)	0.89	0.90	0.90	0.90
TF-IDF (Mahajan et al., 2024)	0.85	0.64	0.73	0.80
BiLSTM-GloVe (Manthena, 2023)	0.80	0.71	0.75	0.80
LSTM-GloVe (Manthena, 2023)	0.75	0.68	0.72	0.77
Word2Vec-BiLSTM-CNN (Song & Huang, 2021)	0.88	0.87	0.87	-
BiLSTM (Song & Huang, 2021)	0.85	0.84	0.84	-
BiLSTM-CNN (Song & Huang, 2021)	0.86	0.85	0.85	-
Proposed CBLTwitter with BERT	**0.98**	**0.95**	**0.96**	**0.96**
Proposed CBLTwitter with Word2Vec	0.93	0.92	0.92	0.93
Proposed CBLTwitter with GloVe	0.91	0.92	0.91	0.92

When all the studies in Table 3 are examined in detail, it can be seen that preprocessing algorithms are important in natural language processing problems. In addition, it can be said that layers and connections between layers are also very important.

What makes this study superior to other studies in the literature is the robustness of the algorithm. The strengthening of the architectures that provide local and global features in the algorithm with the attention mechanism that gives more weight to important words has increased the effectiveness of the proposed CBLTwitter model. The test accuracy results of the models proposed in the study, namely proposed CBLTwitter with BERT, proposed CBLTwitter with Word2Vec, and proposed CBLTwitter with GloVe, are 96.71%, 93.58%, and 92.48%, respectively.

The performance results obtained using the attention layer of the proposed CBLTwitter model are given in Table 3. A serious performance loss was experienced in the ablation experiments conducted to determine the effect of the attention layer, which is one of the layers of the model. By using BERT word embedding method, precision, recall, F1 score and accuracy performance values decrease to 0.92, 0.89, 0.90, 0.90 respectively. In ablation tests obtained by using Word2Vec word embedding method without attention layer, precision, recall, F1 score and accuracy performance values decrease to 0.85, 0.86, 0.86, 0.87 respectively. Finally, in the ablation tests performed with the GloVe word embedding layer without the attention layer, the precision, recall, F1 score and accuracy performance values decrease to 0.86, 0.85, 0.86 and 0.87, respectively. When the performance results obtained are evaluated collectively, a serious decrease is observed in all performance criteria. In this case, since it is not possible to compete with some studies in the literature, it can be said that the attention layer increases the classification performance by highlighting the words containing high disaster.

Table 4. State-of-art (SOTA) performance comparisons on the different datasets

Model & ref.	Precision	Recall	F1 score	Accuracy	Dataset
Proposed CBLTwitter with BERT	**0.95**	**0.96**	**0.95**	**0.97**	Tweets Airline (Eight, 2019)
Proposed CBLTwitter with Word2Vec	0.94	0.95	0.95	0.96	Tweets Airline (Eight, 2019)
Proposed CBLTwitter with GloVe	0.95	0.96	0.95	0.95	Tweets Airline (Eight, 2019)
Proposed CBLTwitter with BERT	**0.96**	**0.96**	**0.96**	**0.97**	Twitter SemEval (Rosenthal et al., 2017)
Proposed CBLTwitter with Word2Vec	0.93	0.92	0.92	0.93	Twitter SemEval (Rosenthal et al., 2017)
Proposed CBLTwitter with GloVe	0.91	0.92	0.91	0.92	Twitter SemEval (Rosenthal et al., 2017)

In order to improve the reliability of the study, the proposed model was tested on two different datasets at this stage. Table 4 shares the performance results obtained on two different datasets used for benchmarking purposes in the literature. The names of the datasets used to test the reliability of the study are Tweets Airline and Twitter SemEval datasets. One of these datasets, Tweets Airline, is a dataset with 14,460 user opinions obtained as a result of collecting data from six different airlines (Eight, 2019). The other dataset, Tweets SemEval, is a dataset prepared to support sentiment analysis studies on Twitter data (Rosenthal et al., 2017). Although there are different types of SemEval dataset, a structure consisting of 17,750 tweets was used in the tests conducted to test the reliability of the proposed model in the study. The performance results obtained are presented in Table 4. When the shared performance results are examined, it is seen that the proposed CBLTwitter model achieves results at a level that can compete with the studies in the literature in different datasets.

5. Conclusions

In training the data used in this study, BERT, a transformer-based neural network model, consumed a significant amount of memory. Training a dataset with a large amount of tweet data with a BERT model, which requires high computational cost and cloud storage capacity, also requires a lot of time. In addition to the performance results obtained with BERT, performance results were obtained with GloVe and Word2Vec methods by changing the word embedder in the proposed CBLTwitter model. Considering the performance results obtained, it can be said that all three results are competitive with the studies in the literature using the same dataset. Although BERT, which is one of the state-of-the-art structures, has been used in many NLP problems, it is difficult to adapt to every problem without awareness because it is pre-trained. Considering that the dataset used in the study is a large dataset, it may seem normal that the training time is long. However, when the training times of GloVe and Word2Vec word embedding methods other than BERT are compared on the same dataset, it is seen that the BERT model has a very high training time. The training time of the model with 30 epochs of iteration on the same dataset is six and five minutes for GloVe and Word2Vec word embedding algorithms, respectively. However, the training time of the BERT model with 30 epochs of iteration on the same dataset takes approximately thirty-six hours. Since the training times specified are highly dependent on hardware resources, they have not been evaluated much. However, it can be stated that word

embedding methods are important in terms of their effects on the training time of the proposed CBLTwitter model. In addition, considering the closeness of the performance of GloVe and Word2Vec methods to the BERT model, GloVe and Word2Vec methods can be preferred instead of BERT in terms of speed and performance.

Considering the aforementioned situation, the BERT model is one of the models with a very long training time in natural language processing problems. In future studies, it is aimed to develop word embedding methods that provide high performance results with less computational cost despite the encoder and decoder structure.

Author contribution

The corresponding author carried out the coding, writing and editing of the experimental studies. The other author carried out the literature review.

Declaration of ethical code

The authors declare that this study does not require ethical committee approval or any legal permission.

Conflicts of interest

The authors declare no competing interests.

References

Acheampong, F. A., Nunoo-Mensah, H., & Chen, W. (2021). Transformer models for text-based emotion detection: a review of BERT-based approaches. *Artificial Intelligence Review*, *54*(8), 5789–5829.

Addison Howard, devrishi, Phil Culliton, Y. G. (2019, December 20). *Natural language processing with disaster tweets*. https://kaggle.com/competitions/nlp-getting-started/data.

Al-Aidaroos, A. S., & Bamzahem, S. (2023). The impact of GloVe and Word2Vec word-embedding technologies on bug localization with convolutional neural network. *International Journal of Science and Engineering Applications,12*(1), 108-111.

Alami, S., & Elbeqqali, O. (2015). Cybercrime profiling: text mining techniques to detect and predict criminal activities in microblog posts. *2015 10th International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications (SITA)* (pp. 1–5), Rabat.

Balakrishnan, V., Shi, Z., Law, C. L., Lim, R., Teh, L. L., Fan, Y., & Periasamy, J. (2022). A comprehensive analysis of transformer-deep neural network models in twitter disaster detection. In *Mathematics, 10*(24), 4664.

Birjali, M., Kasri, M., & Beni-Hssane, A. (2021). A comprehensive survey on sentiment analysis: approaches, challenges and trends. *Knowledge-Based Systems*, *226*, 107134.

Biswas, R., & De, S. (2022). A comparative study on improving word embeddings beyond Word2Vec and GloVe. *2022 Seventh International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*, (pp. 113–118), Solan.

Çetiner, H. (2022). Multi-label text analysis with a CNN and LSTM based hybrid deep learning model. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *9*(17), 447-457.

Çetiner, H. (2023). Cataract disease classification from fundus images with transfer learning based deep learning model on two ocular disease datasets. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *13*(2), 258-269.

Çetiner, H. (2024). Fake news detection and classification with recurrent neural network based deep learning approaches. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *7*(3), 973–993.

Çetiner, M. (2022). *Sürdürülebilir moda ürünlerinin derin öğrenme yaklaşımı kullanarak analizi* [Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü].

Cho, H. C., Okazaki, N., & Inui, K. (2013). Inducing context gazetteers from encyclopedic databases for named entity

recognition. In *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining: 17th Pacific-Asia Conference, PAKDD 2013, Gold Coast, Australia, April 14-17, 2013, Proceedings, Part I 17* (pp. 378-389). Springer.

Deb, S., & Chanda, A. K. (2022). Comparative analysis of contextual and context-free embeddings in disaster prediction from Twitter data. *Machine Learning with Applications, 7*, 100253.

Devlin, J. (2018). Bert: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *ArXiv Preprint ArXiv:1810.04805*.

Dharma, E. M., Gaol, F. L., Warnars, H., & Soewito, B. (2022). The accuracy comparison among word2vec, glove, and fasttext towards convolution neural network (CNN) text classification. *J Theor Appl Inf Technol*, *100*(2), 31.

Eight, F. (2019, February 21). *Twitter Airline Sentiment*. https://www.kaggle.com/datasets/crowdflower/twitter-airline-sentiment.

Feng, X., Angkawisittpan, N., & Yang, X. (2024). A CNN-BiLSTM algorithm for weibo emotion classification with attention mechanism. *Mathematical Models in Engineering*, *10*(2), 87-97.

Huang, Q., Chen, R., Zheng, X., & Dong, Z. (2017). Deep sentiment representation based on CNN and LSTM. *2017 International Conference on Green Informatics (ICGI)* (pp. 30–33), Fuzhou.

Khan, S., & Yairi, T. (2018). A review on the application of deep learning in system health management. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *107*, 241–265.

Khatua, A., Khatua, A., & Cambria, E. (2019). A tale of two epidemics: contextual Word2Vec for classifying twitter streams during outbreaks. *Information Processing & Management*, *56*(1), 247–257.

Kim, S., & Lee, S. P. (2023). A BiLSTM–transformer and 2D CNN architecture for emotion recognition from speech. *Electronics, 12*(19), 4034.

Kishwar, A., & Zafar, A. (2023). Fake news detection on Pakistani news using machine learning and deep learning. *Expert Systems with Applications*, *211*, 118558.

Kowsher, M., Tahabilder, A., Islam Sanjid, M. Z., Prottasha, N. J., Uddin, M. S., Hossain, M. A., & Kader Jilani, M. A. (2021). LSTM-ANN & BiLSTM-ANN: Hybrid deep learning models for enhanced classification accuracy. *Procedia Computer Science*, *193*, 131–140.

Lin, K., & Pomerleano, D. (2011). Global matrix factorizations. *Mathematical Research Letters*, *20*.

Mahajan, P., Raghuwanshi, P., Setia, H., & Randhawa, P. (2024). A multi-model approach for disaster-related tweets: a comparative study of machine learning and neural network models. *Journal of Computers, Mechanical and Management*, *3*(2), 19-24.

Manthena, S. P. (2023). *Leveraging tweets for rapid disaster response using BERT-BiLSTM-CNN model* [Master of Science, San Jose State University Department of Computer Science].

Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Efficient estimation of word representations in vector space. *arXiv preprint arXiv:1301.3781*.

Neethu, M. S., & Rajasree, R. (2013). Sentiment analysis in twitter using machine learning techniques. *2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)* (pp. 1–5), Tiruchengode.

Pennington, J., Socher, R., & Manning, C. D. (2014, October). Glove: global vectors for word representation. In *Proceedings of the 2014 conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP)* (pp. 1532-1543), Doha.

Priya, C. S. R., & Deepalakshmi, P. (2023). Sentiment analysis from unstructured hotel reviews data in social network using deep learning techniques. *International Journal of Information Technology*, *15*(7), 3563–3574.

R., M., S., M., OS, N., & E., T. (2023). An enhanced framework for disaster-related tweet classification using machine learning techniques. *2023 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)* (pp. 108–111), Nepal.

Rajesh, A., & Hiwarkar, T. (2023). Sentiment analysis from textual data using multiple channels deep learning models. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, *10*(1), 56.

Rakshit, P., & Sarkar, A. (2025). A supervised deep learning-based sentiment analysis by the implementation of Word2Vec and GloVe embedding techniques. *Multimedia Tools and Applications*, *84*, 979-1012.

Rosenthal, S., Farra, N., & Nakov, P. (2017). SemEval-2017 task 4: Sentiment analysis in twitter. In S. Bethard, M. Carpuat, M. Apidianaki, S. M. Mohammad, D. Cer, D. Jurgens (eds.), *Proceedings of the 11th international workshop on semantic evaluation (SemEval-2017)* (pp. 502–518). Vancouver: Association for Computational Linguistics.

Sadr, H., & Nazari Soleimandarabi, M. (2022). A CNN-TL: attention-based convolutional neural network coupling with transfer learning and contextualized word representation for enhancing the performance of sentiment classification. *The Journal of Supercomputing*, *78*(7), 10149–10175.

Semary, N. A., Ahmed, W., Amin, K., Pławiak, P., & Hammad, M. (2023). Improving sentiment classification using a RoBERTa-based hybrid model. *Frontiers in Human Neuroscience*, *17*.

Sermanet, P., Eigen, D., Zhang, X., Mathieu, M., Fergus, R., & LeCun, Y. (2013). Overfeat: integrated recognition, localization and detection using convolutional networks. *ArXiv Preprint ArXiv:1312.6229*.

Shaik, T., Tao, X., Dann, C., Xie, H., Li, Y., & Galligan, L. (2023). Sentiment analysis and opinion mining on educational data: a survey. *Natural Language Processing Journal*, *2*, 100003.

Sitaula, C., & Shahi, T. B. (2024). Multi-channel CNN to classify nepali COVID-19 related tweets using hybrid features. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, *15*(3), 2047–2056.

Sitender, Sangeeta, Sushma, N. S., & Sharma, S. K. (2023). Effect of GloVe, Word2Vec and FastText embedding on english and hindi neural machine translation systems. In *Proceedings of Data Analytics and Management: ICDAM 2022* (pp. 433-447). Singapore: Springer Nature Singapore.

Song, G., & Huang, D. (2021). A sentiment-aware contextual model for real-time disaster prediction using twitter data. *Future Internet*, *13*(7), 163.

Sukhbaatar, S., Weston, J., & Fergus, R. (2015). End-to-end memory networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *28*.

Tam, S., Said, R. Ben, & Tanriöver, Ö. Ö. (2021). A ConvBiLSTM deep learning model-based approach for twitter sentiment classification. *IEEE Access*, *9*, 41283–41293.

Tan, K. L., Lee, C. P., Anbananthen, K. S. M., & Lim, K. M. (2022). RoBERTa-LSTM: a hybrid model for sentiment analysis with transformer and recurrent neural network. *IEEE Access*, *10*, 21517–21525.

Vadivukarassi, M., Puviarasan, N., & Aruna, P. (2018). An exploration of airline sentimental tweets with different classification model. *International Journal for Research in Engineering Application & Management*, *4*(2).

Vaswani, A. (2017). Attention is all you need. *ArXiv Preprint ArXiv:1706.03762*.

Wankhade, M., Annavarapu, C. S. R., & Abraham, A. (2024). CBMAFM: CNN-BiLSTM multi-attention fusion mechanism for sentiment classification. *Multimedia Tools and Applications*, *83*(17), 51755–51786.

Yang, Y., & Li, S. (2024). Entity overlapping relation extracting algorithm based on CNN and BERT. *IEEE Access*, 1.

Yeboah, P. N., & Baz Musah, H. B. (2022). NLP technique for malware detection using 1D CNN fusion model. *Security and Communication Networks*, *2022*(1), 2957203.

Zhao, J., Liu, K., & Xu, L. (2016). *Sentiment analysis: mining opinions, sentiments, and emotions*. Cambridge University Press.

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 577-589 doi: 10.17714/gumusfenbil.1582904 Research Article

Energy efficiency and green transformation: a VFD case study in an industrial facility

Enerji verimliliği ve yeşil dönüşüm: bir sanayi tesisi VFD örneği

Mustafa GENÇAY[1], Altuğ BOZKURT*[1], Erşan Ömer YÜZER[2]

[1]*Faculty of Electrical and Electronics, Department of Electrical Engineering, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey*

[2]*Çölemerik V.H.S., Department of Electricity and Energy, Hakkari University, Hakkari, Turkey*

• Received: 11.11.2024 • Accepted: 15.05.2025

Abstract

In today's world, where competition and change are aggressive and rapid, managing and reducing fixed input costs has become critically important for both the private sector and public institutions. Among these fixed input costs, energy expenses stand out as the most significant and controllable factor. A major portion of energy consumed is attributed to the use of electric motors. These motors, particularly those with high energy consumption, are typically designed to operate at constant speeds and deliver constant output. However, with modern production techniques and practices, many applications now require motors to operate at variable speeds using advanced technological control methods. In this context, Variable Frequency Drives (VFDs), based on power electronics, are used to control motor speed and ensure efficient and economical use of energy and energy resources. By enabling motors to operate more efficiently, VFDs contribute significantly to green transformation in the industrial sector. In addition, they offer several benefits such as extending the service life of motors and electrical cables. However, due to the power electronics components used in their structure, VFDs can cause harmonic distortion. This study aims to demonstrate energy management practices to improve the energy efficiency of induction motors commonly operated with Y-Δ starters in industrial settings and to analyze the effects of harmonic distortion on the power grid. In this context, power consumption, cost analysis and harmonic analysis of different starting methods have been carried out. Furthermore, the energy savings and the level of harmonic distortion resulting from VFD usage have been evaluated and compared with the conventional Y-Δ method. As a result of the study, the payback period was found to be approximately 1.04 years, depending on the motor's operating frequency and duration, and the total harmonic distortion (THD) was observed to increase from an average of around 13% to 30%.

Keywords: Analysis, Energy efficiency, Industrial facility, VFD, Y-Δ Starting method

Öz

Dünya üzerinde rekabetin ve değişimin agresif ve bu denli hızlı olduğu günümüzde, sabit girdi maliyetlerinin yönetilmesi ve düşürülmesi gerek özel sektör gerekse kamu kurumları için hayati öneme sahiptir. Bu sabit girdi maliyetlerinden en yüksek değere sahip ve kontrol edilebilir olanı enerji maliyetidir. Tüketilen enerjinin en büyük kısmı elektrik motoru kullanımından kaynaklanmaktadır. Büyük tüketim değerlerine sahip motorlar sabit bir hızda çalışacak ve sabit bir çıktı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak modern üretim teknikleri ve uygulamalarıyla birlikte teknolojik kontrol yöntemleri de kullanılan elektrik motorları birçok uygulamada farklı hızlar gerektirir. Bu bağlamda, enerji kaynaklarının ve enerjinin verimli ve tasarruflu kullanılmasını sağlamak üzere, güç elektroniği tabanlı değişken frekanslı sürücüler (VFD), motorların hız kontrolünü sağlamak için kullanılır. VFD'ler yardımıyla motorlar enerjiyi tasarruflu ve verimli kullandığı için sanayide yeşil dönüşüme büyük katkı sağlar. Bunun yanında, motor ve elektrik kabloları kullanım ömrü gibi birçok faydası bulunmaktadır. Ancak yapısında kullanılan güç elektroniği ekipmanları sebebiyle harmonik bozunmaya sebebiyet vermektedir. Bu çalışmada, sanayide yaygın olarak kullanılan yıldız-üçgen (Y-Δ) yol verme ile çalışan asenkron motorların enerji verimliliğini artırmaya yönelik enerji yönetimi uygulamalarını göstermek ve şebeke üzerindeki harmonik bozunmanın etkilerinin analizi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında yol verme yöntemlerinin güç tüketimleri, maliyet analizi ve harmonik analizi yapılmıştır. Ayrıca Y-Δ yol verme metodu ile karşılaştırıldığında VFD kullanımında ne kadar tasarruf elde edilebileceği ve harmonik bozulmanın ne seviyede olacağı ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, motorun çalışma frekansına ve süresine bağlı amortisman süresi yaklaşık 1,04 yıl bulunmuş ve toplam harmonik bozunumun (THD) ise ortalama %13' lerden % 30' lara çıktığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: *Analiz, Enerji verimliliği, Sanayi tesisi, VFD, Y-Δ yol verme*

*Altuğ BOZKURT; abozkurt@yildiz.edu.tr

1. Introduction

The global population is increasing day by day and consequently, energy consumption is also rising. In parallel, as the industrial sector has expanded, humanity has shifted from a minimal consumption mindset to a consumption-oriented approach. This shift underscores the growing importance of energy savings and controllability. Global energy consumption is projected to increase by 33% from 2010 to 2030. Figure 1 illustrates the trend in worldwide marketed energy consumption from 1980 to 2030 (Beaulac et al., 2021).

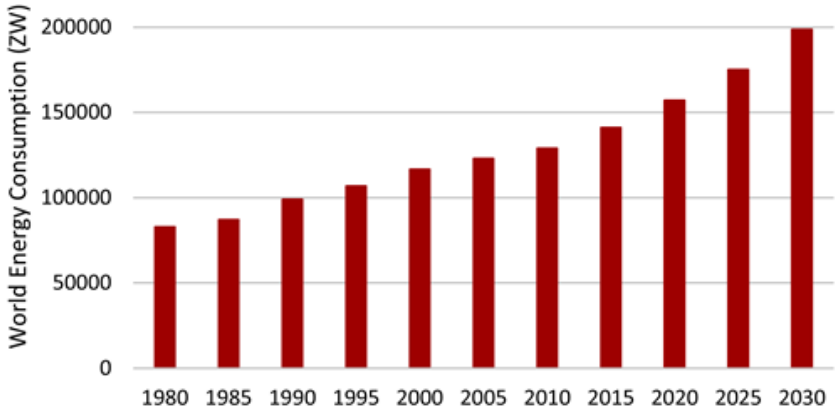


Figure 1. Trends in worldwide marketed energy consumption

As shown in Figure 1, total global energy consumption rose from 82.919 ZW in 1980 to 116.614 ZW in 2000 and it is projected to reach 198,654 ZW by 2030 (Beaulac et al., 2021). Meanwhile, many countries worldwide are striving to reduce carbon emissions, setting continuous new targets. The long-term goal of the European Union (EU) is to achieve zero emissions by 2050 (Almeida et al., 2017). Although new technologies and high-efficiency machines are increasingly used in industry today, they require substantial investment and financial resources.

The Asynchronous Motor is a widely used electrical machine due to its reliability, efficiency, economic structure and adaptable response. However, many factories in the industrial sector operate with machines that have diminished efficiency. By implementing low-cost retrofits, these machines can be converted into processes that allow for years of continued use, achieving performance close to that of new machines. In industrial automation, electric vehicle technology, or any electromechanical system, the use of motors operating at a fixed power frequency often results in significant energy losses. To obtain the desired torque-speed response Variable Speed Drives (VSDs) are required (Harsha et al., 2020). Variable Frequency Drives (VFDs) are a type of drive that uses power electronics components to control motor speed by adjusting the frequency of the motor's input power.

Compared to other speed control methods such as VSDs and adjustable speed drives, VFDs extend equipment lifespan by adjusting motor speed to meet load requirements (Saidur et al., 2012). However, due to the power electronics components in their structure, VFDs introduce harmonic currents, which are considered unwanted distortions that negatively affect power system infrastructure and loads. These harmonics can lead to heat buildup, reduced equipment lifespan and equipment failures (Wallace, 2021). Eslami et al. have noted that in sectors such as renewable energy and others that increasingly use VFDs due to advancements in power electronics, it may be beneficial to employ artificial intelligence, widely used in recent years, to predict harmonic levels based on harmonic measurement data. Additionally, active filters could be used to minimize harmonics effectively (Eslami et al., 2022).

In this study, numerous literature sources that model and examine the effects of energy savings and harmonics with VFD usage in various machines have been reviewed. For example, Schibuola et al. monitored the climate control system of a historic library in Venice over a one-year period. They observed that the Heating Ventilating and Air Conditioning (HVAC) system controlled by a VFD achieved 38.9% annual savings compared to fixed pump flow and fan coil operation. This study highlighted the advantages of using VFDs in historic buildings with limited physical intervention (Schibuola et al., 2018). In a study by Akhan, fan and pump circuits in an energy efficiency laboratory were tested with two different VFDs and evaluations were

made regarding energy efficiency. By using variable speeds, it was found that efficiency levels could reach up to 60% for fans and pumps (Akhan, 2022). De Almeida et al. investigated the efficiency impact of VFD technology in the transition process of inefficient electric motors to new high-efficiency motors to meet the zero-carbon target for the electric motor market by 2050, as outlined in the Paris Climate Agreement. It was projected that if a global shift to high-efficiency motors is achieved and motor speeds are controlled with new technologies, over 1.000 TWh of energy savings could be realized annually (Almeida et al., 2023). Wibowo et al. developed a VFD simulation circuit using Matlab Simulink to enhance the efficiency of an inefficient fan system in a power plant in Indonesia. Results obtained from the simulation indicated that the investment could achieve payback within approximately 6.5 months (Wibowo et al., 2021). In a study conducted by Riungu and Moses in Kenya, it was determined that replacing the Y-Δ start method with a VFD in 75 kW fan motors reduced the payback period to less than 3 months (Riungu & Moses, 2022). In the study conducted by Kapp et al. in the United States, an inductive analysis was carried out based on the operating data of industrial motors with VFDs used for various purposes. The study focused on the economic, environmental, and engineering aspects of VFD usage (Kapp et al., 2024).

Öztürk et al. demonstrated that by adjusting the speeds of 36 fan motors used in the HVAC system of a textile factory with VFDs, approximately 50% energy savings could be achieved (Ozturk et al., 2020). Sadek et al. showed that in a petroleum processing facility in Egypt, the payback period for VFD implementation on variable-speed fan and pump motors was less than one year, while for a compressor motor operating at a fixed frequency, the payback period was calculated to be 6.2 years. Their study indicated that after applying VFDs to all equipment, an annual energy saving of 7.204 MWh was realized, but in some cases, the cost could not be recovered within a short time frame (Sadek et al., 2023). Fauzi et al. monitored a fan motor connected to a steam boiler for 341 days using a VFD. It was found that when the boiler operated at 30%, 50%, and 80% capacities, energy savings of 90%, 61.10%, and 42.64%, respectively, were achieved. The study emphasized that the application of VFDs in similar operational contexts not only provides significant energy savings but also reduces wear and mechanical stress on the system. (Fauzi et al., 2024). Mokhtar and Nasooti designed a holistic program considering cement production facilities in various regions of Iran, demonstrating that investments in efficient fans equipped with VFDs could be recouped in approximately 2.5 years across the entire facility. The study also examined harmonic distortions caused by VFDs (Mokhtar & Nasooti, 2020). Wallace's research investigated the harmonics generated by VFD usage in ventilation, fan and pump applications, along with filtering methods, providing various solutions. They noted that there is no single solution method for harmonics, but that the correct solution can be determined after a thorough examination of the system (Wallace, 2021). In a study by Turinno and Facta conducted in the steel industry in Indonesia, the power quality was monitored after VFD conversion in a dust collection unit. It was observed that when the VFD operated at low frequency, the current harmonic increased to 45% and exceeded the 12% limit; however, when the machine operated near the fundamental frequency, the current harmonic fell below the threshold and did not pose a problem, while the voltage harmonic remained below the 5% limit in both cases (Turinno & Facta, 2024). Krishnasamy and Ashok investigated the reduction of harmonic distortion in induction motors driven by VFDs in a wheat flour mill using an artificial neural network (ANN) based hybrid power filter. The results demonstrated that the proposed filter reduced total harmonic distortion (THD) to 1.4% and contributed to energy savings (Krishnasamy & Ashok, 2022).

With the widespread understanding of energy efficiency and the continuous search for efficiency points by technical teams, methods have been sought to achieve the same level of productivity without compromising quality in production processes. In this context, VFDs technology has emerged as a significant innovation, especially in industrial applications. VFDs allow for optimization of energy consumption by controlling motor speed, which provides a significant advantage in improving energy efficiency (URL-1; URL-2).

In earlier times, VFDs were not as advanced and expensive, which led to the preference for Y-Δ starting methods in many production lines. The Y-Δ starting method, commonly used in large motors, helps reduce the high inrush currents at startup, but it has limitations in terms of energy efficiency. Over time, as technology advanced, VFDs became more affordable and efficient. As a result, retrofitting older machines with VFDs is now possible. With this transformation, machines can operate more efficiently, reducing the kWh per produced unit. However, it is important to recognize that harmonic effects on the electrical grid will occur once this transformation is implemented, and thus, harmonic filtering measures should be considered (URL-1; URL-2).

The importance of VFD technology lies not only in its ability to improve energy efficiency and reduce energy consumption but also in the precise control it offers over systems. Particularly in industrial applications that require speed control, VFDs enable machines to operate more efficiently, reducing operational costs and minimizing environmental impact. This technology supports the long-term sustainability of industrial systems and allows for better management of energy consumption (URL-1).

The scientific aim of this study is to investigate the effects of VFD implementation on energy efficiency, power quality, and economic performance in an industrial fan motor system under real operating conditions. The core subject of the research is to conduct comparative measurements between the conventional star-delta (Y-Δ) starting method and a VFD-controlled system in terms of key parameters such as active and reactive power consumption, THD and payback period. This study expands the existing research in the field of industrial energy management through a field application conducted in an electrostatic powder coating facility. Going beyond the simulation-based analyses commonly found in the literature, it provides practical contributions based on real production data. Additionally, by considering the trade-off between energy savings and harmonic distortion, the study identifies the technical and economic conditions under which VFD retrofitting can be effectively implemented. The main contributions of this study can be summarized as follows:

- A practical implementation and verification of a well-known phenomenon related to [topic, e.g., energy efficiency with VFDs] has been conducted under real industrial conditions.
- Unlike many theoretical studies, this work provides experimental validation and field data from an actual industrial setup.
- The study demonstrates measurable energy savings and operational improvements, contributing to the growing body of research on sustainable industrial practices.

The organization of the paper is as follows: In Section 2, the materials and methods related to the transition from Y-Δ starting to VFD in a factory engaged in electrostatic powder coating production are discussed. Section 3 presents the power analysis, harmonic analysis and economic analysis conducted based on the data obtained from the experimental study. Finally, the planned projects for future periods are discussed.

2. Materials and methods

2.1. Asynchronous motor

Walter Bailey's invention in 1879 is considered the first primitive induction motor. The first practical motors designed using rotating magnetic fields were invented by Nikola Tesla and Galileo Ferraris through two separate works (Aydın, 2014). Asynchronous motors are used at points requiring motion in industrial systems and in the majority of electrical household appliances. Numerous auxiliary equipment, such as condensation pumps, circulation pumps, induced draft fans, forced draft fans, primary air fans and secondary air fans, are driven by high-voltage induction motors, meaning they are motor systems (Shuping et al., 2012). Figure 2 illustrates the structure of the asynchronous motor in detail (D'Urso et al., 2021).

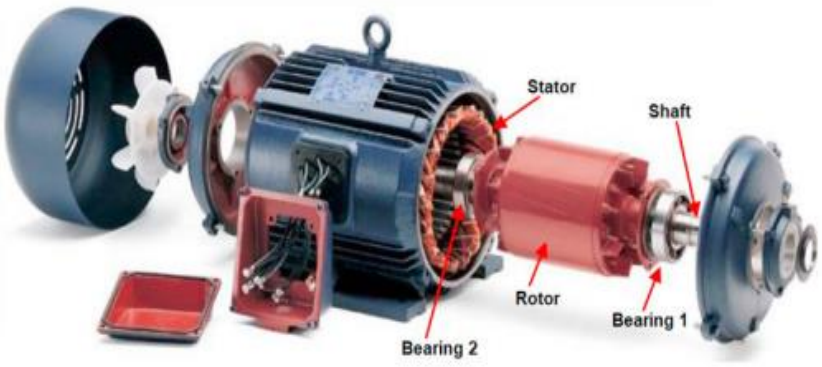


Figure 2. Structure of the Asynchronous Motor

Asynchronous motors are widely used due to their simple structure, reliability, high efficiency, low cost and ease of maintenance (Hannan et al., 2018). However, asynchronous motors consume excessive currents at the

moment of startup due to their inertia. Consequently, various motor starting methods have been developed and implemented over time to meet different operational needs. Some of these methods are listed below.

- Direct-on-line (DOL) starting can be used. In this case, speed adjustment is not possible.
- Y-Δ starting or soft starting methods can be used, which are suitable for limiting the starting current.
- It can be powered by a VFD for speed control, suitable for both scalar and vector control. With this method, the motor can be operated in a frequency range of 0-60 Hz on a 50 Hz grid.

2.2. Experimental study

The high current drawn by asynchronous motors at startup can lead to many adverse effects, especially in high-power motors. To minimize these effects, it is essential to start the motor with low voltage and Y-Δ starting is a method used for this purpose. In Y-Δ starting, the control circuit prepared with contactors applies phase-neutral voltage to the motor terminals until the inertia moment is exceeded. After the motor starts, phase-phase voltage is applied to the terminals, allowing the motor to operate without being exposed to excessive currents. The aim of this study is to investigate the energy efficiency and energy quality of the starting method used for fans in a powder coating production facility. In this context, energy savings and energy quality were evaluated when a 37 kW fan motor driven by Y-Δ starting was operated using a VFD in an electrostatic powder coating production facility located in the organized industrial zone. The technical specifications of the 37 kW three-phase fan motor used in the study are provided in Table 1. Upon examining Table 1, it can be observed that there are significant current differences between the Y and Δ conditions for a fixed power value at different voltage levels.

Table 1. Technical specifications of the 37 kW three-phase fan motor

Voltage (V)	**Frequency** (Hz)	**Power** (kW)	**RPM** (rpm/minute)	**Current** (A)	**Power Factor** (cos φ)
690 Y	50	37	2950	37.31	0.90
400 Δ	50	37	2950	64.36	0.90
660 Y	50	37	2945	38.79	0.91
380 Δ	50	37	2945	67.37	0.91
415 Δ	50	37	2960	62.66	0.89

The selected VFD for use in this study is a product designed for industrial systems, used in various machine sections of our factory with different kW ratings and has a low failure rate. Considering the operating costs, the chosen VFD should have a minimum failure rate and a wide service network. The technical specifications of the VFD used for starting the motor are also provided in Table 2.

Table 2. VFD technical specifications

Voltage	**Phase**	**Power**	**Brake – Safe Stop**	**RFI Filter**
380 - 480 VAC	Three phase	45 kW / 60 HP	No brake cutter	RFI Class A1/B (C1)

In this study, a 37 kW three-phase fan motor was driven by a 45 kW heavy-duty inverter, taking into account heavy operating conditions. Raw data were collected firsthand using a Chauvin Arnoux C.A.8331 power analyzer. Both driving methods of the installed fan in the facility were measured with the same analyzer to minimize the possibility of measurement error. Secondary data were obtained through literature review and engineering expertise. All data obtained from the study were evaluated using qualitative and quantitative data analysis methods. Qualitative analysis helps to understand the reasons and processes behind decision-making, while quantitative analysis facilitates the scientific investigation of quantitative characteristics, measurements and their relationships. The measurements taken using the power analyzer are visually represented in Figure 3.

Figure 3. Measurement conducted with a power analyzer

The existing Y-Δ circuit, consisting of three contactors as seen in Figure 3, operates the 37 kW fan motor on a 6 days 24 hours production basis. The factory has five different production lines where these fans are utilized. During production, the machine parts need to be cleaned during color changes. Having the ability to adjust the fan speed during this cleaning process provides numerous advantages to the operator. The ability to vary the fan speed allows the operator to achieve different particle sizes according to the product type, offering a comfortable working range. Additionally, variable frequency operation enables energy savings as well. Considering all these advantages, this experimental study was conducted to quantitatively determine the savings achieved through an engineering approach.

2.3. Application circuit

Electrostatic powder paint is produced from raw materials that have undergone two processes (extruder and micronizer) and is ready for use. The fan component relevant to our application is located in the micronizer process. In this study, the Y-Δ circuit controlling the fan motor within the micronizer's control panel has been removed. Since the VFD occupies more space than the Y-Δ circuit, a new panel has been prepared outside to accommodate it. Figure 4 illustrates the panel featuring the Y-Δ starting circuit (a) and the VFD circuit (b).

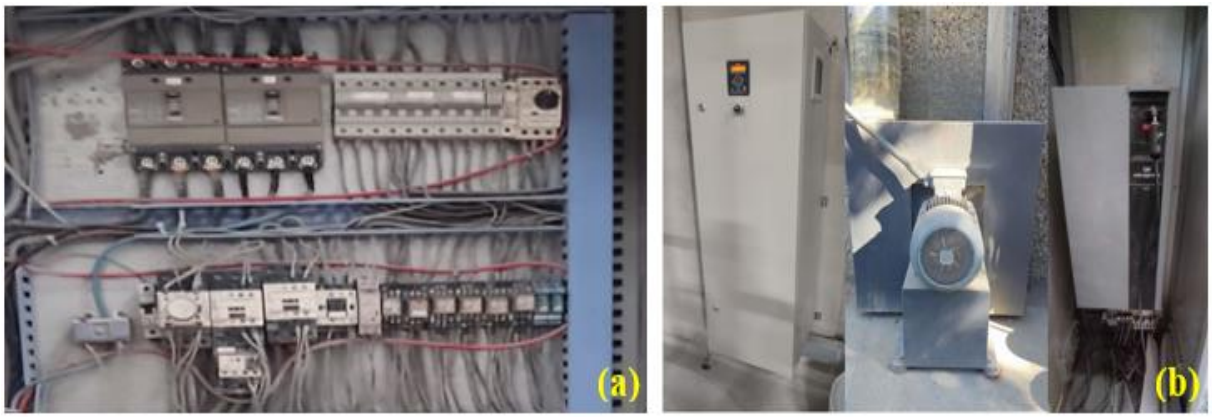


Figure 4. (a) Panel containing the Y-Δ starting circuit; (b) panel containing the VFD circuit

Measurements and monitoring were conducted for the 37 kW fan motor using two different starting methods. In the first method, the Y-Δ starting method currently used in the production line was examined, while in the second method, the fan's operation after being converted to a VFD was analyzed. The investigations were carried out during production, ensuring that there was no degradation in product quality. This approach allowed for the attainment of accurate data free from modeling errors. The results of the investigations highlighted both the advantages and disadvantages of each method through numerical data.

The Y-Δ operating condition depicted in Figure 4 (a), located in the micronizer panel, was recorded using an analyzer at one-minute intervals over a period of one week. Following this, the VFD panel shown in Figure 4

(b) was activated and the system's values were measured over another week at a frequency of 50 Hz. At this stage of the study, data for both starting methods were obtained at the same frequency. Subsequently, utilizing the capabilities provided by the driver, the fan motor was operated within a frequency range of 45-55 Hz on a 50 Hz grid and measurement data were recorded via the power analyzer. The objective of collecting data at different frequency ranges was to enable a better interpretation of energy consumption and harmonic analysis results.

3. Results and discussion

3.1. Power analysis

Power analysis is fundamentally conducted to compare the power consumption of different starting methods. In this study, various scenarios related to power analysis have been compared using the obtained data, leading to enlightening results. Currently, a 37 kW three-phase fan motor is operated using the Y-Δ starting method; this study aims to minimize energy consumption by controlling the motor speed through frequency modulation and to observe its effects on the grid. In this context, the analyzer was first connected to the machine operating under the Y-Δ method to examine the power consumption and harmonic levels of the motor currently in use. The evaluations of the findings obtained from this examination are discussed below.

3.1.1. Power analysis at base frequency (50 Hz)

At the base frequency (50 Hz), a power difference of approximately 0.44 kW is observed between the VFD and the Y-Δ starting method based on the active power values obtained. In the first case, the motor draws an average active power of 18.89 kW; however, in the second case, when operated in VFD mode, the average total motor power is observed to be 19.43 kW. The active powers are balanced with each other. The comparison of active power between Y-Δ starting and VFD at the base frequency is presented in Figure 5.

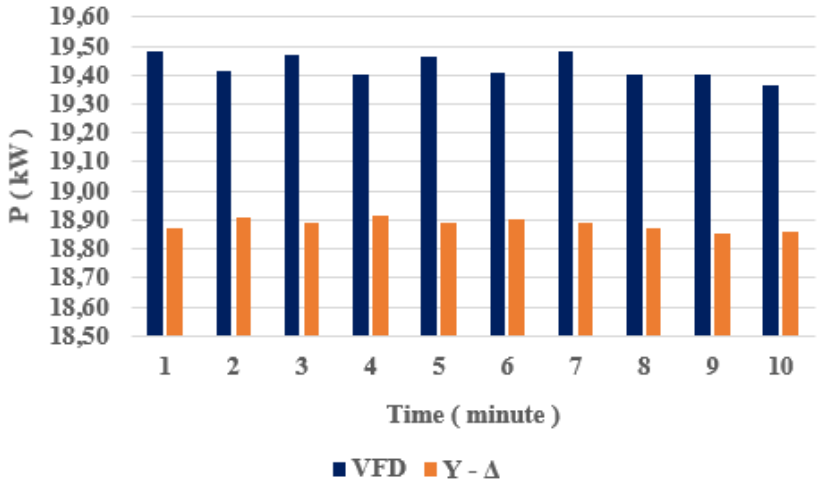


Figure 5. Graph comparing active power between Y-Δ starting and VFD at the base frequency

At the base frequency, there is a power difference of approximately 12.6 kVAR between VFD and Y-Δ starting based on the reactive power values obtained. In the first case, the motor draws an average of 13.84 kVAR of reactive power, while in the second case, when the motor is operated in VFD mode, the total motor power is observed to be an average of 1.24 kVAR. Thus, a significant difference in reactive power is noted between the first and second cases. The graph comparing reactive power between Y-Δ starting and VFD at the base frequency is shown in Figure 6.

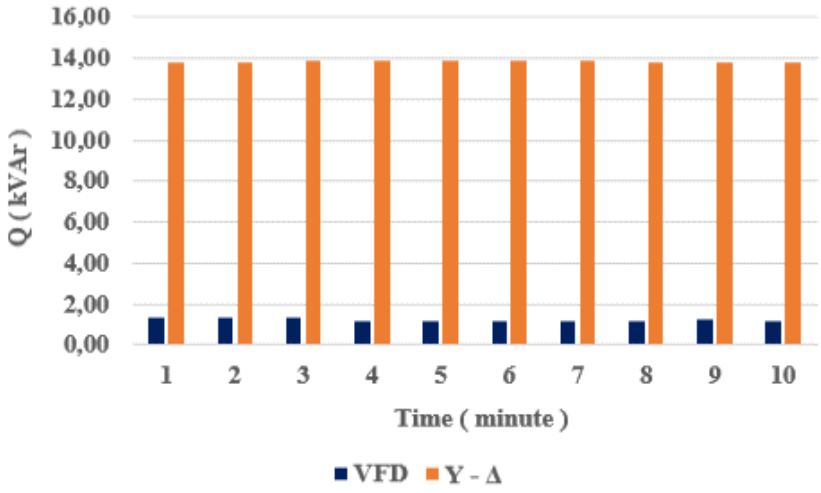


Figure 6. Graph comparing reactive power between Y-Δ starting and VFD at the base frequency

At the base frequency, there is a power difference of approximately 2.98 kVA between VFD and Y-Δ starting based on the apparent power values obtained. In the first case, the motor draws an average apparent power of 23.64 kVA, whereas in the second case, when the motor operates in VFD mode, the average total apparent power observed is 20.66 kVA. The graph comparing the apparent power between Y-Δ starting and VFD at the base frequency can be found in Figure 7.

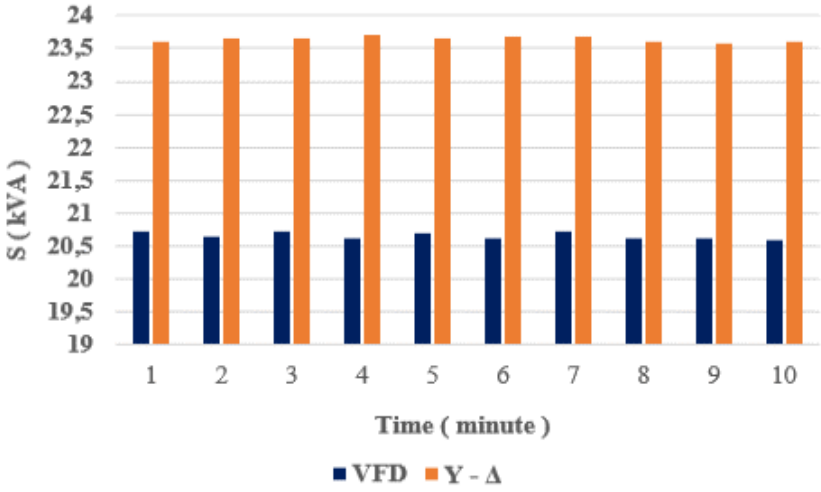


Figure 7. Comparison of apparent power between Y-Δ starting and VFD at the base frequency

When Figure 5, Figure 6 and Figure 7 are evaluated together, it is observed that as a result of the application of starting methods, the active powers are similar, there is a slight difference in apparent powers, but there are significant differences in reactive power.

3.1.2. Power analysis in vfd starting

In this section, the VFD's capability to operate at different frequencies has been utilized and power values have been obtained within a frequency range of ± 5 Hz around the fundamental frequency. Figure 8 illustrates the variation of active power values obtained in the VFD mode within the frequency range of 45-55 Hz. It has been observed that active power values increase steadily with frequency changes, reaching 15.1 kW at a frequency of 45 Hz and 25.3 kW at a frequency of 55 Hz. The average active power value measured at the fundamental frequency is approximately 19 kW. In general, it can be stated that for processes requiring variable speeds but operating continuously at the fundamental frequency, the VFD is highly efficient and practical.

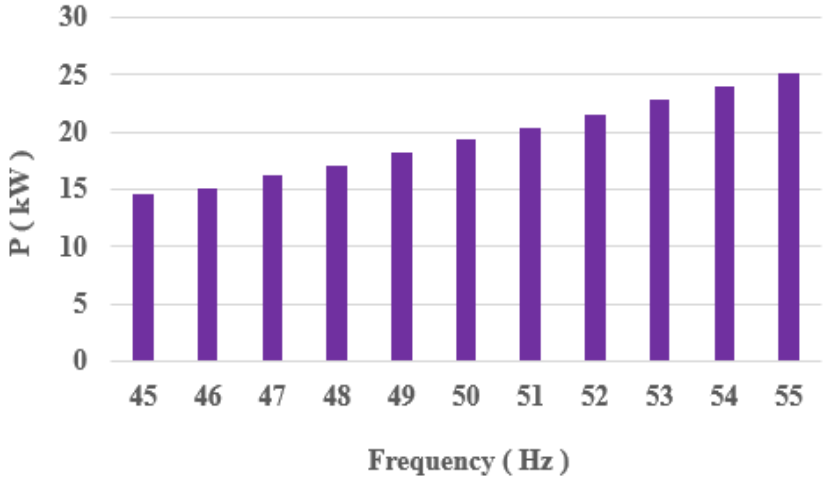


Figure 8. Active power comparison graph in VFD mode at 45-55 Hz

3.2. Harmonic analysis

In this study, current harmonics up to the 50th order have been examined. Since even harmonics do not have a significant impact, only odd harmonics have been considered. The data was recorded with a precision of one minute over a period of one week. The graphs showing the measured values of the harmonics generated during the operation of the Y-Δ starting method and the VFD are presented in Figures 9 and 10, respectively.

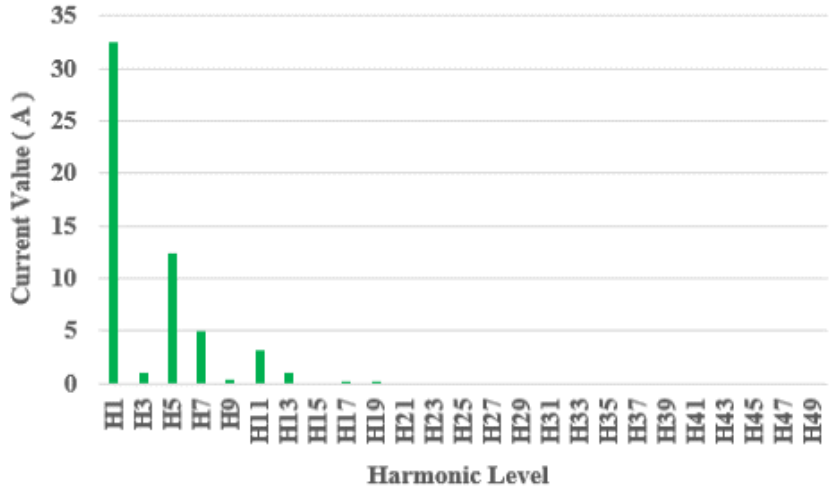


Figure 9. Harmonic current values generated during Y-Δ starting method

In the case of Y-Δ starting method, the following values were measured for the odd harmonics up to the 11th harmonic: 32.43 A, 1 A, 12.37 A, 5.02 A, 0.35 A, 3.07 A and 0.93 A respectively. It was observed that current levels at harmonic frequencies beyond these were either zero or close to zero. However, in cases where the fan motor was operated using a VFD, the current for the 3rd, 5th, 7th, 11th, 13th, 17th, 19th, 23rd, 25th and 29th harmonics was found to increase. In the case where the fan motor was driven by a VFD, the highest current value, similar to that observed during Y-Δ starting, was recorded as 24.94 A at the 5th harmonic. Additionally, it is notable that high current values were also present in other odd harmonics.

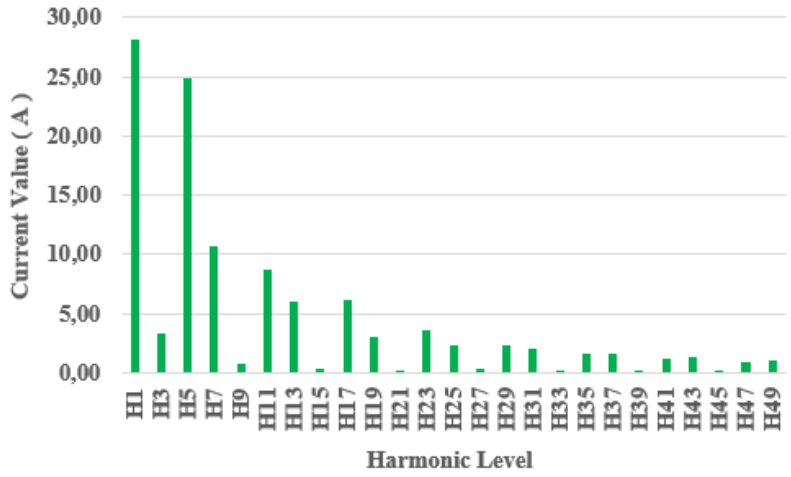


Figure 10. Harmonic current values generated during VFD operation

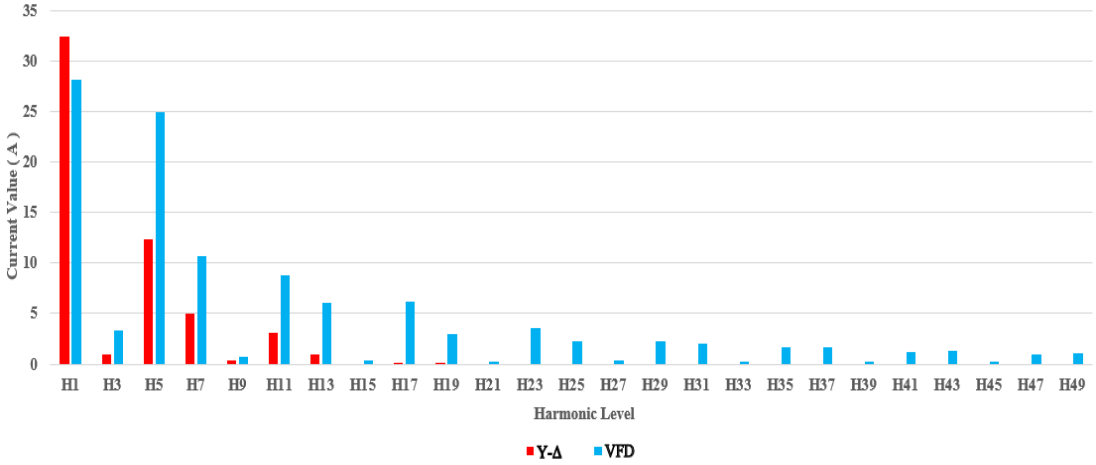


Figure 11. Comparison of harmonic current values in Y-Δ starting and VFD operation conditions

When comparing the current values generated during the VFD operation of the fan motor with those during the Y-Δ starting method, as shown in Figure 11, it can be observed that the harmonic currents in the VFD operation condition are higher for all odd harmonics except for H1. This situation arises due to the power electronics components present in the VFD structure.

3.3. Economic analysis

Based on the results obtained in this study, the economic analysis of operating a 37 kW three-phase fan motor in an electrostatic powder coating production facility using a VFD drive circuit has been evaluated. Since the payback period for such a system is very short, a simple economic analysis has been conducted without considering interest rates and inflation.

Annual Energy Savings (kWh) = Annual Motor Operating Percentage × (PY-Δ − PVFD) × 24 (hours/day) × Number of Working Days per Week × Number of Working Weeks per Year

Total Savings (TRY) = Annual Energy Savings (kWh) × Unit Energy Cost (₺/kWh)

Payback Period (Years) = Investment Cost (₺) / Total Savings (₺)

The payback period was calculated by multiplying the annual energy savings achieved through the use of VFD with the unit energy cost to determine the total savings, which was then divided by the investment cost.

The economic analysis results, taking into account different operating rates of the motor, are presented in Table 3.

Table 3. Economic Analysis

Annual Operating Rate (%)	Y-Δ / VFD (kWh)	Hour	Day	Week	Annual Energy Savings (kWh)	Project Cost (₺)	Unit Energy Cost (₺ /kWh)	Total Amount of Savings (₺)	Payback Period (Year)
70	18,9/15	24	6	52	20.442	56.676	2,66	54.375	1,04
80	18,9/15	24	6	52	23.362	56.677	2,66	62.142	0,91
90	18,9/15	24	6	52	26.282	56.677	2,66	69.910	0,81
100	18,9/15	24	6	52	29.203	56.677	2,66	77.7679	0,73

In the current situation, the energy consumption during the Y-Δ starting method has been calculated to be an average of 18.9 kWh. In contrast, when operating with a VFD, taking energy savings into account, it has been measured that production occurs at an adequate quality with an energy consumption of 15 kWh at a frequency of 45 Hz. In this context, the power consumption difference between Y-Δ and VFD operation has been determined to be 3.9 kWh. The facility operates six days a week, 24 hours a day throughout the year. The total production hours and the payback periods of the investment have been calculated based on occupancy rates ranging from 70% to 100%. The project cost has been realized at 56.677 ₺, excluding taxes, while the unit energy price at the time of operation is 2.66 kWh/₺, net of taxes. Considering that the fan motor operates at a 70% occupancy rate even under the worst conditions, the payback period for the investment has been calculated to be 1.04 years.

4. Discussion and conclusions

In this study, the analysis of data obtained from driving an asynchronous motor with frequency control revealed significant advantages for energy consumption optimization and process condition adjustments in systems operating at varying speed ranges. Calculations show that the Variable Frequency Drive (VFD) used for the fan motor can save 20.442 MWh of energy annually, even with a 30% loss time. Additionally, it is estimated that the system has prevented 10.57 tons of carbon emissions, which contributes to avoiding future carbon taxes and environmental damage. The investment is observed to pay for itself in just 1.04 years, even at the lowest efficiency. Compared to similar studies that report energy savings in the range of 10 to 30 percent, the results obtained in this study, which indicate savings exceeding 28 percent, align with the upper limit of this spectrum and confirm the practical applicability of VFD integration in industrial environments. From a theoretical perspective, the study contributes by validating energy efficiency models using real-world operational data. From a practical standpoint, it offers a useful reference for engineers and facility managers who are planning to implement energy-efficient motor control systems. However, it has been noted that the THD increased from 13.81% to 32.77% when the fan motor operates with VFD compared to the Y-Δ starting method. The increase in harmonic currents resulting from the use of VFDs should be considered not only for their immediate impact but also for their long-term implications. Elevated harmonic levels can lead to excessive heating, reduced efficiency, and premature aging of electrical components such as transformers, cables, and other infrastructure. These effects may compromise system reliability and result in increased maintenance requirements and operational costs. In this regard, the implementation of harmonic filters, whether passive or active, represents an effective solution to minimize harmonic distortion and ensure the stable and efficient operation of the electrical system.

The data used in this study were obtained under specific industrial conditions, which may not fully reflect all operational environments. Therefore, the applicability of the results may vary across different industries or system configurations. Although the proposed model has been shown to provide energy savings, factors such as the system's long-term performance, maintenance requirements, and component wear have not been examined in depth. Furthermore, the study was limited to a single motor type, and additional research is needed to evaluate the applicability of the model to other motor types or more complex systems.

Based on these results, it has been concluded that VFD conversion is not only suitable for fan motors but also for other types of motors, according to the benefit-cost analysis, thus potentially improving operational efficiency in industrial applications. Moreover, the methodologies proposed in this study provide a practical roadmap for future energy efficiency projects.

Future research could focus on applying similar VFD-based efficiency analyses to other types of motor-driven systems within the same facility or across different industries. In particular, motors operating under variable load conditions such as pumps or compressors can be prioritized. Additionally, the impact of harmonics on the power quality can be examined in greater detail, and advanced filtering technologies or multi-level inverter systems could be studied to reduce THD levels more effectively. Long-term performance monitoring and the integration of energy management systems may also offer new perspectives on sustainable industrial practices.

Author contribution

MG: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal Analysis, Investigation, Resources, Writing. EOY: Supervision, the preparation of the manuscript, interpretation of the results, and revised the draft. AB: Supervision, the preparation of the manuscript, interpretation of the results, and revised the draft.

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

Akhan, H. (2022). Sanayide enerji yönetimi: Pompa ve fan sistemlerinde verimlilik artırıcı uygulamalar. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *23*(1), 11-23.

Almeida, A. T., Fong, J., Falkner, H., & Bertoldi, P. (2017). Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *74*, 1275-1286.

Almeida, A. T., Ferreira, F. J., & Fong, J. (2023). Perspectives on Electric Motor Market Transformation for a Net Zero Carbon Economy. *Energies*, *16*(3), 1248.

Aydın, A. B., (2014). Asenkron Motorlar ve Sürücüleri. Kocaeli Üniversitesi.

Beaulac, P., Issa, M., Ilinca, A., Lepage, R., & Martini, F. (2021). Improving the energy efficiency of cyclone dust collectors for wood product factories. *Open Journal of Energy Efficiency*, *10*(3), 97-119.

D'Urso, D., Chiacchio, F., Borrometi, D., Costa, A., & Compagno, L. (2021). Dynamic failure rate model of an electric motor comparing the Military Standard and Svenska Kullagerfabriken (SKF) methods. Procedia Computer Science, 180, 456-465.

Eslami, A., Negnevitsky, M., Franklin, E., & Lyden, S. (2022). Review of AI applications in harmonic analysis in power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *154*, 111897.

Fauzi, M. F. B., Hussin, T. N. B. W., & Ismail, I. A. R. B. (2024, November). Force Draft Fan Energy Efficient and Carbon Emission Reduction Using Variable Speed Drive. In *2024 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)* (pp. 164-168). IEEE.

Hannan, M. A., Ali, J. A., Mohamed, A., & Hussain, A. (2018). Optimization techniques to enhance the performance of induction motor drives: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 1611-1626.

Harsha, A. R., Pranupa, S., Kumar, B. K., Rao, S. N., & Indira, M. S. (2020, October). Arduino based V/f drive for a three phase induction motor using single phase supply. In *2020 International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE)* (pp. 90-94). IEEE.

Kapp, S., Wang, C., McNelly, M., Romeiko, X., & Choi, J. K. (2024). A comprehensive analysis of the energy, economic, and environmental impacts of industrial variable frequency drives. *Journal of Cleaner Production*, *434*, 140474.

Krishnasamy, B., & Ashok, K. (2022). Assessment of harmonic mitigation in v/f drive of induction motor using an ann-based hybrid power filter for a wheat flour mill. *Processes*, *10*(6), 1191.

Mokhtar, A., & Nasooti, M. (2020). A decision support tool for cement industry to select energy efficiency measures. *Energy Strategy Reviews*, *28*, 100458.

Ozturk, E., Cinperi, N. C., & Kitis, M. (2020). Improving energy efficiency using the most appropriate techniques in an integrated woolen textile facility. *Journal of Cleaner Production*, *254*, 120145.

Riungu, E. K., & Moses, P. M. (2022, August). Economic analysis and energy savings of variable speed drives in fans application—A case study capwell milling factory. In *2022 IEEE PES/IAS PowerAfrica* (pp. 1-5). IEEE.

Sadek, M., El-Maghraby, R. M., & Fathy, M. (2023). Evaluation of variable speed drives to improve energy efficiency and reduce gas emissions: Case study. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, *29*(2), 111-118.

Saidur, R., Mekhilef, S., Ali, M. B., Safari, A., & Mohammed, H. A. (2012). Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings. *Renewable and sustainable energy reviews*, *16*(1), 543-550.

Schibuola, L., Scarpa, M., & Tambani, C. (2018). Variable speed drive (VSD) technology applied to HVAC systems for energy saving: an experimental investigation. *Energy Procedia*, *148*, 806-813.

Shuping, Wang, et al. "Energy efficiency evaluation investigation on high voltage inverter retrofit for fans and pumps in power plants." *Proc. CIGRE Sessions.* 2012

Turinno, S., & Facta, M. (2024). The Impact of Power Quality on VFD Application in Motor Fan Dust Collector. *International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology*, *8*(6), 37.

URL-1: https://www.processingmagazine.com/pumps-motors-drives/variable-frequency-drives/article/55283562/the-critical-role-of-modern-variable-frequency-drives-in-industrial-applications: Access Date: 30.04.2025

URL-2: https://www.automationworld.com/factory/motion/article/55249304/how-variable-frequency-drives-boost-energy-efficiency Access Date: 30.04.2025

Wallace, I. (2021). Harmonic Mitigation Strategies in Variable Frequency Drive Applications. *ASHRAE Transactions*, *127*(1).

Wibowo, P. M., Haddin, M., & Marwanto, A. (2021). Energy saving analysis of air fan motor in power plant boiler controlled by variable frequency drive. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, *12*(4), 2059-2069.

Gümüşhane University Journal of Science

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 590-607 doi: 10.17714/gumusfenbil.1545187 Research Article

A numerical aerodynamic analysis of a vertical axis wind turbine in a wind tunnel

Dikey eksenli bir rüzgar türbininin rüzgar tünelinde sayısal aerodinamik analizi

Muhammet Kaan YEŞİLYURT*[1], Mansur MUSTAFAOĞLU[1]

[1]*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Atatürk University, 25240 Erzurum, Türkiye*

• Received: 07.09.2024 • Accepted: 16.05.2025

Abstract

Within the framework of the global attempt towards reducing greenhouse gases and providing sustainable renewable energy to meet the growing energy demand, the research on the development of new renewable energy systems as well as on improving the efficiency of existing systems has gained great momentum over the recent decades. The applications and use of wind energy, a clean energy known and used since ancient times, have evolved in recent years. On the focus of several studies, either experimental or numerical, was developing novel wind turbines that offer greater efficiency. This research, in this respect, presents a numerical aerodynamic analysis of a helical blade vertical-axis wind turbine (VAWT) modeled in a wind tunnel in SOLIDWORKS and analyzed for its aerodynamic performance in ANSYS Fluent using the SST k-ω method. The stationary and rotary parts were meshed separately, and velocity and pressure contours were obtained and examined. The results of the numerical model suggested better performance of the hybrid helical blade turbine compared to Savonius or Darrieus turbines. The aerodynamic performance of a hybrid Savonius-Darrieus VAWT using numerical simulations in a three-dimensional wind tunnel revealed that the proposed design achieved a maximum torque of 2.05 Nm at a tip speed ratio (TSR) of 2.0, with a power coefficient (Cp) of 0.42, representing a 10% improvement over traditional Darrieus turbines. The hybrid design combines the high starting torque of the Savonius turbine with the efficiency of the Darrieus turbine, demonstrating superior performance in low-wind conditions. Numerical results were validated against experimental data from Castelli et al. (2011), showing good agreement with a maximum deviation of 10%. The findings highlight the potential of hybrid VAWTs for urban and low-wind environments, offering a sustainable and efficient energy solution.

Keywords: CFD, Numerical flow dynamics, Renewable energy, Vertical-axis wind turbines (VAWTs)

Öz

Sera gazlarını azaltma ve artan enerji talebini karşılamak için sürdürülebilir yenilenebilir enerji sağlama yönündeki küresel çabalar çerçevesinde, yeni yenilenebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesi ve mevcut sistemlerin verimliliğinin artırılması üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda büyük bir ivme kazanmıştır. Antik çağlardan beri bilinen ve kullanılan temiz bir enerji olan rüzgar enerjisinin uygulamaları ve kullanımı da son yıllarda gelişmiştir. Deneysel veya sayısal olmak üzere birçok çalışmanın odak noktasında, daha fazla verimlilik sunan yeni rüzgar türbinleri geliştirmek yer almıştır. Bu araştırma, bu bağlamda, SOLIDWORKS'te bir rüzgar tünelinde modellenen ve k-ω yöntemi kullanılarak ANSYS Fluent'te aerodinamik performansı analiz edilen helisel kanatlı dikey eksenli rotorlu rüzgar türbininin (VAWT) sayısal aerodinamik analizini sunmaktadır. Sabit ve döner parçalar ayrı ayrı ağa bağlanarak hız ve basınç konturları elde edilmiş ve incelenmiştir. Sayısal modelin sonuçları, hibrit helisel kanatlı türbinin Savonius veya Darrieus türbinlerine kıyasla daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Üç boyutlu bir rüzgar tünelinde sayısal simülasyonlar kullanılarak hibrit Savonius-Darrieus VAWT'nin aerodinamik performansı, önerilen tasarımın TSR 2 değerinde ve 0,42 güç katsayısında 2,05 Nm maksimum torka ulaştığını göstermiştir; bu da geleneksel Darrieus türbinlerine göre %10'luk bir iyileştirme sağlandığını göstermektedir. Hibrit tasarım, Savonius türbininin yüksek başlangıç torkunu Darrieus türbininin verimliliğiyle birleştirerek düşük rüzgar koşullarında üstün performans gösteriyor. Sayısal sonuçlar, literatürde elde edilen deneysel verilerle doğrulanmış ve %10'luk maksimum sapma ile iyi bir uyum göstermiştir. Bulgular, hibrit VAWT'lerin kentsel ve düşük rüzgarlı ortamlar için potansiyelini vurgulayarak sürdürülebilir ve verimli bir enerji çözümü sunduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: *CFD, Dikey eksenli rüzgar türbinleri (VAWT), Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Yenilenebilir enerji*

*Muhammet Kaan YEŞİLYURT; kaan.yesilyurt@atauni.edu.tr

1. Introduction

Fossil fuels, such as coal, oil, and natural gas, have historically been the primary sources of energy globally. However, due to concerns about their depletion, environmental impact, and geopolitical implications, there is a growing shift towards renewable energy sources. This transition is primarily driven by the need to address issues like greenhouse gas emissions, air pollution, and the finite nature of fossil fuel reserves (Dhunny et al., 2019). Solar and wind energy are significant renewable energy sources. Solar energy is captured through photovoltaic (PV) panels, adaptable to both grid-connected and off-grid systems. Residential solar installations have surged, enabling homeowners to generate their electricity and potentially engage in net metering. Commercial and utility-scale solar farms are increasingly prevalent, with technological advancements expanding solar energy viability even in areas with less sunlight (Tong, 2023). Wind energy is harnessed through turbines converting wind kinetic energy into electricity. Offshore wind farms, known for harnessing higher wind speeds, are gaining prominence. Onshore wind farms play a significant role in the energy sector, with ongoing technological enhancements boosting efficiency and cost-effectiveness (Kumar & Prakash, 2023).

Countries like Denmark and Germany excel in wind energy adoption, while China and the United States invest substantially in both solar and wind energies. However, adoption rates and practical applicability of these renewable sources can vary significantly based on regional specificities and developmental contexts (Bakkari, 2023). Renewable energy plays a crucial role in mitigating greenhouse gas emissions, reducing reliance on energy imports, and decreasing the consumption of fossil fuels, which are major contributors to carbon dioxide emissions. These energy sources are clean, inexhaustible, and increasingly competitive. Unlike fossil fuels, renewable energies are diverse, abundant, and globally viable, crucially producing no greenhouse gases or polluting emissions that contribute to climate change (Kumar & Prakash, 2023). The benefits of renewable energy are extensive, impacting the economy, environment, national security, and public health. Key advantages include bolstered reliability and resilience of the power grid, diminished dependence on imported fuels, and economic gains such as job creation and increased tax revenues. Additionally, the utilization of renewable energy leads to reduced air pollution and associated health impacts, as well as lowered greenhouse gas emissions and climate change risks (Huang et al., 2011).

Efficiency metrics for wind turbines are notably high, with modern turbines achieving efficiencies close to 56%, nearing the theoretical maximum. According to Betz' Law, the theoretical maximum efficiency of a wind generator is 59.3% of the wind's energy. Wind turbines are meticulously designed to optimize power extraction from wind, with scalability to stronger winds at higher altitudes or offshore locations significantly enhancing power output (Xie & Archer, 2014; Baqersad et al., 2015) cubically with wind speed and quadratically with blade length, thereby enhancing the swept area (Abdelsattar et al., 2022).

Wind energy stands out as a predictable, reliable, and cost-effective form of electricity generation per terawatt-hour (TWh), closely rivaling the costs of solar power. Some wind turbines are equipped with a yaw drive mechanism to adjust for changing wind directions, ensuring optimal performance by aligning the blades with the wind. An anemometer measures wind speed and direction, relaying this data to the controller, which then adjusts the yaw drive for maximum output (Sokolov et al., 2018).

Wind energy is recognized as one of the fastest-growing energy sources worldwide and remains a primary renewable power source in the United States. Wind turbines generate electricity by harnessing the mechanical power of the wind to spin a generator. This energy source is abundant, inexhaustible, and does not involve combustion or air pollution. Annually, wind energy helps prevent approximately 329 million metric tons of carbon dioxide emissions, equivalent to emissions from 71 million cars, and reduces other emissions contributing to acid rain and smog (Ma, 2024). Wind turbines are adaptable and can be strategically placed in various environments, including rural or remote areas like farms, ranches, and coastal or island communities where wind resources are abundant. Besides, the manufacturing process of wind turbines is highly efficient and has adopted a streamlined approach that contributes to the durability and reliability of wind turbines, requiring minimal maintenance and boasting operational lifespans of around 30 years (Buckney et al., 2012). This versatility positions wind energy as a crucial element in sustainable energy strategies, especially in locations where other energy sources may be less practical (Hossain et al., 2016).

1.1. Types of wind turbines

Wind turbines are typically categorized based on the alignment of the rotor axis as vertical axis wind turbines (VAWTs) and horizontal axis wind turbines (HAWTs). Conventional HAWTs are equipped with a tail resembling an aircraft's vertical stabilizer, aligning the turbine downwind to utilize wind direction for optimal operation, akin to traditional weather vanes or water pump windmills. These larger turbines often incorporate sophisticated computerized controls to monitor and adjust to prevailing wind directions, counteracting the significant inertial and gyroscopic forces generated by their large blades (Niziolek et al., 2016). Modern HAWTs are equipped with yaw drives to adjust for changing wind directions, ensuring that the blades always face into the wind for maximum output.

HAWTs are commonly configured in two primary orientations: upwind and downwind (Figure 1), each impacting the turbine's operation and efficiency. Downwind turbines offer simplicity and cost-effectiveness due to the absence of active yaw control, with blade flexing in strong winds moving the tips away from the support tower, reducing structural damage risks. However, downwind configurations face challenges, primarily from the support tower obstructing incoming wind, creating turbulence that hampers blade performance, leading to efficiency losses and increased blade loading due to resonant load/unload cycles with each rotation. In contrast, upwind turbines encounter fewer aerodynamic challenges from the tower, resulting in cleaner, unobstructed airflow (Bortolotti et al., 2021).

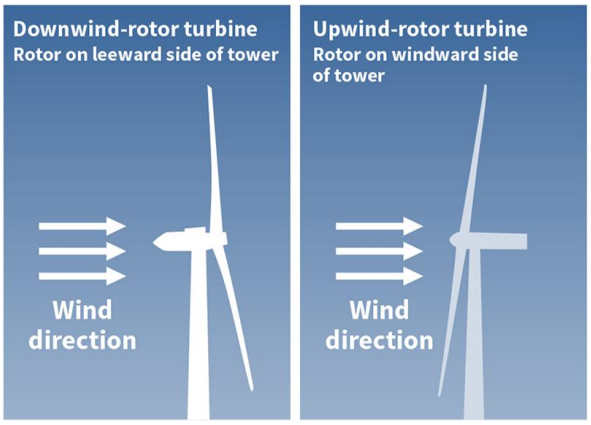


Figure 1. Types of HAWTs according to the facing of the rotor to the wind direction (Kanno & Ikeda, 2017)

Commercial operators typically favor upwind turbine designs over downwind configurations due to the pursuit of maximum efficiency. The losses associated with downwind turbines can significantly impact profits, making large downwind turbines a rare sight. Downwind turbines are more commonly found in small domestic setups prioritizing cost and simplicity over maximum efficiency (Bortolotti et al., 2021).

On the other hand, VAWTs are mounted vertically to the main rotor and operate independently of wind direction. They offer versatility in diverse wind conditions, such as low-altitude applications. Therefore, VAWTs were reported to be more suitable for urban use (Kadhim H. Suffer et al., 2014). However, VAWTs face challenges from wind shadow or turbulence caused by nearby structures or turbines (Liu et al., 2020).

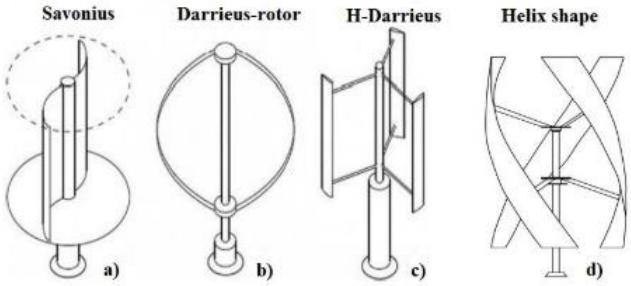


Figure 2. Different VAWT designs (Castellani et al., 2019)

As shown in Figure 2, VAWTs are further classified as Savonius, Darrieus, and Hybrid designs (Capps et al., 2012; Chamorro et al., 2013).

1.2. Wake characteristics and importance

The turbulence generated as wind flows through a turbine's rotor can have significant implications. These implications can be classified in various spatial and temporal scales, ranging from the airfoil scale (about 1 mm to 1 m), where the focus is on the fine details of blade aerodynamics and turbulence that occurs within milliseconds, up to the mesoscale and macroscale meteorological phenomena, which span tens to hundreds of kilometers and affect wind farms over days (Figure 3).

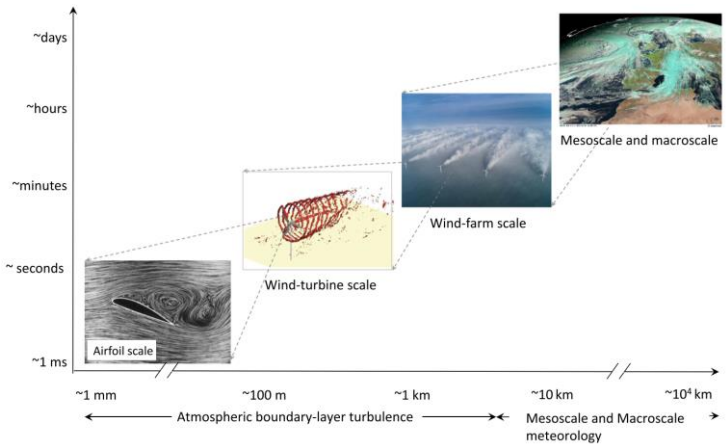


Figure 3. The importance of wind turbine design and associated airflow pattern in different scales (Porté-Agel et al., 2020)

At the airfoil scale, the focus is on how the shape and design of the turbine blades influence the immediate airflows and turbulence around the blade. These dynamics happen very quickly, on the order of milliseconds to seconds, and are crucial in determining the efficiency of the blade in converting wind energy to mechanical energy. At turbine scale, the spread of the disturbed air can spread about 10 meters to a few hundred meters, and the regions of reduced wind speed and increased turbulence downstream of the turbine, known as wake, become more significant as they can affect not only the performance of the turbine itself but also those of any downstream turbines in a wind farm.

Figure 4. The turbulence behind the wind turbines in a wind farm (Hameed et al., 2011)

The design of the turbine, particularly the rotor and blade geometry, plays a crucial role in managing these wakes. At the wind-farm scale, which spans kilometers, the interaction of multiple turbine wakes and their

collective impact on overall farm efficiency are considered (Figure 4). Finally, at the mesoscale and macroscale, which extends beyond 10 kilometers, the focus shifts to the interaction between the wind farm and larger atmospheric processes, such as weather systems and climate patterns. Understanding these interactions across different scales is essential for optimizing turbine design and layout to maximize energy capture while minimizing the negative impacts of wake effects, ensuring efficient and sustainable energy production.

Inadequate spacing between turbines can exacerbate this turbulence, leading to operational challenges such as increased mechanical loads on the turbine structure and reduced annual energy production (AEP) efficiency. To optimize performance, turbines should be positioned to capture a straight, laminar airflow through the rotor, as turbulence can hinder efficiency (Scott et al., 2020). A general guideline for turbine placement suggests spacing them five rotor diameters apart side to side and seven rotor diameters from front to back. However, variations in terrain and permitting constraints may necessitate deviations from this standard (Scott et al., 2020).

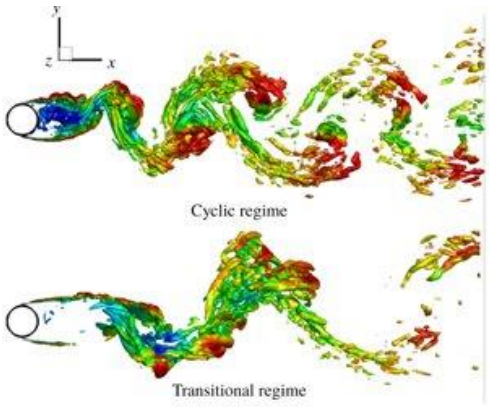


Figure 5. The airflow patterns past the wind turbine (Brandao et al., 2020)

The airflow onto and around a wind turbine is important for understanding how different flow regimes affect wind turbine performance. Engineers can use this information to optimize turbine design and placement, improving efficiency and reducing mechanical stress caused by turbulent airflows. The patterns of airflow around and past a wind turbine can be in a cyclic or transitional regime (Figure 5). In cyclic regime, the airflow displays highly organized and repetitive patterns that suggest a stable flow structure where vortices are shed consistently in a cyclic manner. The consistent shedding of vortices can be seen, which is characteristic of a laminar-to-turbulent transition that is predictable and stable over time.

In the transitional regime, the airflow is less organized compared to the cyclic regime. The presence of a more chaotic and complex mixture of vortices indicates a breakdown of the steady cyclic patterns into a more disordered state, characterized by irregular shedding of vortices and increased turbulence. In this regime, the aerodynamic forces acting on the turbine are potentially more unstable.

Wind turbines are designed with considerable height to capitalize on the increased wind speeds at higher elevations, where atmospheric drag is reduced. The energy potential of wind escalates exponentially with its velocity, with a small increase in wind speed leading to a substantial rise in energy output. This phenomenon is attributed to the laminar drag from the ground and other obstructions causing reduced wind speeds at lower altitudes (Chatterjee & Peet, 2018).

The diameter of wind turbines is a critical factor, as it determines the potential energy they can harness, directly proportional to the swept area of the rotor blades. Enhancing the length of the blades is a straightforward method to augment this area, which grows with the square of the radius. For instance, elevating a turbine with longer blades at a higher altitude significantly amplifies the energy captured. Doubling the blade length quadruples the energy production, and combining these adjustments multiplies the energy output exponentially (Chatterjee & Peet, 2018).

The exponential increase in energy output relative to the geometric increase in materials underscores the efficiency of larger turbines. Consequently, the cost of electricity per kilowatt-hour over the turbine's lifespan

is notably reduced due to these economies of scale. This efficiency disparity explains why small generators, like those on residential roofs, are generally less effective. For residential energy solutions, solar power typically offers greater efficiency and utility compared to wind power, unless specific wind conditions are exceptionally favorable.

The Savonius WT, developed by Sigurd Savonius, relies on the drag forces to rotate the vertical shaft and drive the electric generator by means of simple-design semi-cylindrical bucket-like blades, which bring on simple construction, low costs, low visual impact in the installation area, startup with low wind speed, independence from wind direction, and high torque (Altan & Atılgan, 2008; Castellani et al., 2019). Nevertheless, Savonius turbines offer lower efficiency, and their application is limited.

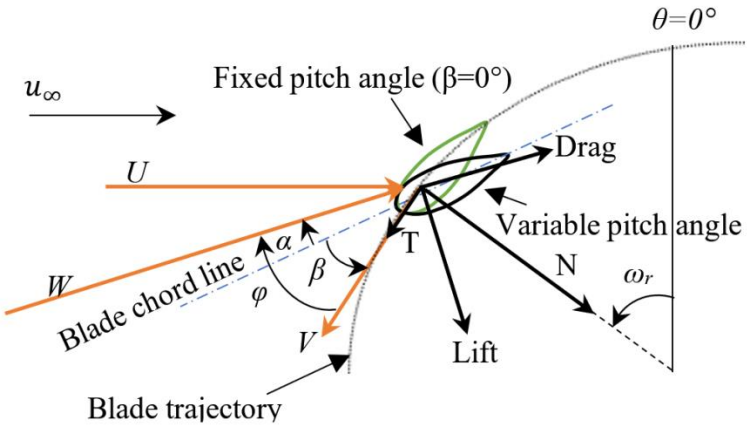


Figure 6. Forces and velocities effective on the blades of an Darrieus turbine (Gebreel Abdalrahman et al., 2019)

Darrieus VAWTs are characterized by their high-speed, low-torque design, ideal for generating alternating current by leveraging lift forces on their airfoil-shaped blades, typically in sets of three. These turbines rely on an aerodynamic surface akin to that of airplane wings to create a pressure differential between the upper and lower surfaces, generating a net lift force perpendicular to the wind direction (Figure 6). As the turbine rotates, the airfoils angle against the wind flow, producing torque in the turbine's rotation direction. The utilization of lift force is more efficient in energy generation compared to drag forces (Morgulis & Seifert, 2015).

While Darrieus VAWTs exhibit superior efficiency at high rotational speeds compared to Savonius turbines, they tend to have lower starting torque. Consequently, hybrid designs, such as the Savonius–Darrieus hybrid VAWTs, have been developed to combine the favorable attributes of both turbine types (Erfort et al., 2019). In terms of design considerations, the hybrid VAWT benefits from the structural simplicity of VAWTs, which do not require yaw mechanisms and can capture wind from any direction (Pan et al., 2021). This characteristic is particularly advantageous in urban environments where wind directions can change frequently. Additionally, the use of advanced blade designs and materials can further optimize performance, as demonstrated in various studies that explored the impact of blade shape and aspect ratio on VAWT efficiency (Brusca et al., 2014; Hu et al., 2017).

The efficiency of Darrieus VAWTs is around 40%, making them a viable competitor to traditional HAWTs (Sankar & Tiryakioğlu, 2008). These turbines are particularly advantageous for urban and offshore applications due to their ability to harness wind potential from any direction, even under turbulent flow conditions and at low tip speed ratios (MacPhee & Beyene, 2012).

The advantages of this turbine include smooth and efficient operation when turbulent winds and hurricanes blow, easier construction, greater safety and cheapness in maintenance and repair, low dependence on wind direction, and low noise during operation. Several examples of this turbine are in the laboratory of Takamatsu (Takamatsu, 1991) and Takenouchi (Takenouchi & Furukawa, 2005) by the Ministry of Finance. Dai (Dai et al., 2010) was able to predict the efficiency of the Darrieus turbine with two-dimensional CFD analysis. Ponta (Ponta & Dutt, 2000) has developed a channeling device for a Darrieus turbine to increase the flow velocity around the rotor and increase the turbine output at a given size. Shiono (Shiono et al., 2002) showed that snail wings have less fluctuation and better properties than straight wings.

Takao et al. (2008) were able to significantly increase the efficiency of this turbine by using arc-shaped guide vanes and observed that the use of guide vanes caused a vortex downstream of the rotor. In a similar study, Takao et al. (2009) conducted a laboratory study of a three-blade H-rotor wind turbine with an NACA4518 profile, with a chord length of 0.137 m, rotor diameter of 0.6 m, and height of 0.7 cm. They conducted their experiments at different wind speeds and different operating coefficients of the desired turbine with and without guide vanes. Their results showed that the use of guide vanes leads to an increase of about 77% of the maximum power factor. Gupta et al. (2006), compared Savonius and Darrieus turbines to build these two turbines in laboratory dimensions. The experimental results obtained in wind tunnels showed that the power factor in the Savonius turbine increased with increasing overlap of the turbine blades. Islam (Islam, 2008; Islam et al., 2008) aerodynamically studied and analyzed different types of turbines. Takao et al. (M. Takao, 2008) has studied the effect of instantaneous current upstream of the rotor with a CFD analysis and improved the efficiency of the rotor by installing current-conducting blades.

The aerodynamic performance of VAWTs has been a focal point in recent research. For example, Li et al. highlighted that integrated wind turbines can achieve higher utilization rates of wind energy while maintaining good starting performance (Li et al., 2022). This aligns with the findings of the hybrid VAWT, which not only improves starting torque but also enhances overall energy capture efficiency. The hybrid design's ability to operate effectively across a range of wind speeds further supports its potential for broader application in urban and rural settings, where wind conditions can be highly variable (Khammas et al., 2015).

Tawi et al. (2010) studied the performance of the Savonius turbine with three-dimensional analysis. Ji & Schluter (2011) tested a small model of a vertical axis wind turbine with different airfoils. Kyozuka (2008) their laboratory studies on a laboratory-scale two-blade Darrieus turbine showed that the combined turbine of Savonius and Darrieus turbines initially improved the performance of the Darrieus turbine.

Within the scope of this study a VAWT with helical blades was modeled in SOLIDWORKS software and its aerodynamic performance was numerically analyzed in a three-dimensional wind tunnel. In the study, the stationary and rotating parts of the turbine were modeled separately, which allowed for the velocity and pressure contours obtained examined. The aerodynamic analysis was performed using ANSYS Fluent with the SST k-ω method.

This research aims to contribute to the global efforts to increase the efficiency of renewable energy applications. While most previous studies primarily focus on single-type turbines, this research combines the high starting torque of Savonius turbines with the high efficiency of Darrieus turbines and thereby offers a unique solution to the limitations of traditional VAWTs. It contributes to the field by numerically investigating the performance of a proposed novel Savonius-Darrieus hybrid VAWT design optimized for urban and low-wind environments. Additionally, the use of three-dimensional CFD simulations in a wind tunnel setting provides a more accurate representation of real-world conditions compared to previous two-dimensional studies.

2. Materials and methods

The research methodology involves two main steps: (1) a comprehensive review of previous studies on VAWT aerodynamics and design parameters to identify gaps and opportunities for improvement, and (2) numerical simulations to model and analyze the proposed hybrid turbine design. The literature review informed the selection of design parameters and validation methods, while the numerical simulations provided detailed insights into the turbine's performance under various wind conditions. In this regard, the turbine design was modeled using Solidworks software and analyzed using ANSYS-Fluent to study the fluid flow around the turbine with different numerical methods and selection of the most appropriate method. The Shear-Stress Transport (SST) k-ω turbulence model, which has a good ability to model the flow and vortices around the turbine blade, and the PISO solution algorithm are used to model the Reynolds stress expressions in the equations of the size of motion (Arab Golarche et al., 2016). The time step in all calculations is chosen as the time required for one degree of turbine rotation.

2.1. k-ω SST model

The first proposed model for perturbation, the k-ω model, was proposed by Kolmogorov in 1941. This model, defined by two variables (k, the perturbation kinetic energy and ω, the specific scattering rate), is related to vortex viscosity:

$$\mu_t = \rho k/\omega \tag{1}$$

The k-ω SST model, a combination of k-ω and k-ε models, has the ability to simulate the flow around the wall and the flow outside the wake field and is described by the following equations (Khalaji et al., 2019):

k kinetic energy equation of turbulence:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \overline{u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial \overline{x_j}} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial \overline{x_j}} \left[(\mu + \sigma^* \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \tag{2}$$

ω is the specific scattering rate and is expressed in the following equation:

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \overline{u_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma \mu) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \tag{3}$$

α, β, β*, σ and σ* are the closed coefficients of the equation. In this study, this method is used to solve the problem.

The blade tip speed ratio parameter is another dimensionless parameter commonly used in wind turbine analysis and represents the ratio of the blade tip speed to the free flow velocity of the fluid and is defined as follows:

$$\text{Tip Speed Ratio (TSR)} = \frac{R\omega}{V} \tag{4}$$

In this equation, R is the blade length, ω is the angular speed of the turbine and v is the wind speed.

2.2. Modeling and boundary conditions

The channel length is approximately 12 times the rotor diameter. Figure 7-a shows the solution domain and the position of the turbine within. The perimeter of the rotor circumference has the continuity of the current flowing through the interface, which ensures the state of the rotor. In order to reduce the computation time of a mesh with an irregular structure, a triangular mesh (shown in Figure 8) was chosen for the wind tunnel subnetwork. Figure 7-b shows the close-up view of the 3D model of the proposed turbine analyzed in this study.

Since the aim of this study is to investigate the performance of a rotating machine, it is necessary to divide the computational domain into static and dynamic mesh. The area of the outer rectangle is static and constitutes the entire computational domain, and in Figure 7-a represents the wind tunnel subnetwork. In Figure 7-b, the spacing of the internal elements is defined by the rotor subnetwork, which rotates with an angular velocity (ω).

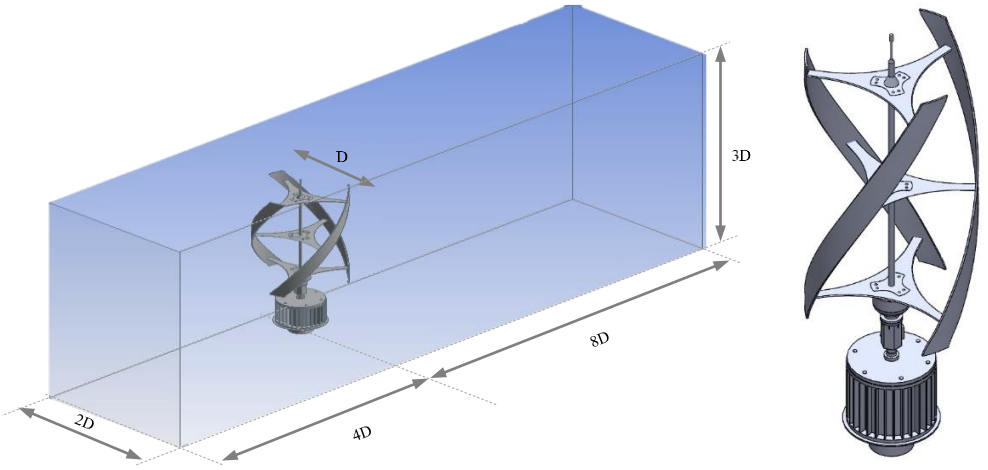


Figure 7. a) Modeling and dimensions of the wind tunnel network b) model drawn in Solidworks

The wind tunnel model was modeled in multiples of the rotor diameter (D). The rotor diameter is 1.2 m, with a blade profile based on the NACA 0018 airfoil. The wind tunnel has a length of 12 times the rotor diameter, 4D upwind side and 8D downwind side, a width of 2D, and a height of 3D. The blade length is 0.7 m, and the rotor height is 1.5 m.

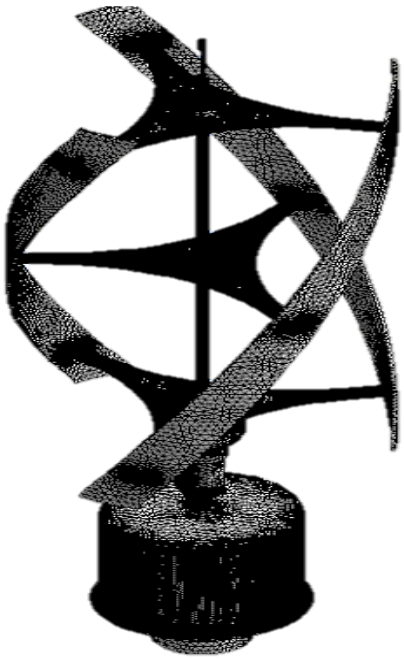


Figure 8. Wind turbine, mesh around rotor and blade

Figures 7 and 8 show the geometric model and the mesh. Mesh generation was performed in ANSYS Fluent software with a focus on accurately capturing the boundary layer and wake regions, using a combination of structured and unstructured grids. To study the mesh independence, 6 different meshes ranging from 595,555 to 9,655,555 cells were generated, and the turbine output torque was calculated for each mesh. As can be seen in Figure 9, the effect of mesh generation on the output torque of our proposed turbine was insignificant beyond some 6M cells. While the mesh independence test showed minimal variation in key parameters beyond this point, it also suggests that further refinement would not significantly alter the outcomes, which may not hold in all cases, particularly in simulations involving very fine-scale turbulence or complex geometries. Given the computational cost and marginal effect, the final mesh consisted of 6,569,855 cells. The mesh independence study, presented in Figure 9, confirms that the selected mesh is able to provide stable and accurate results.

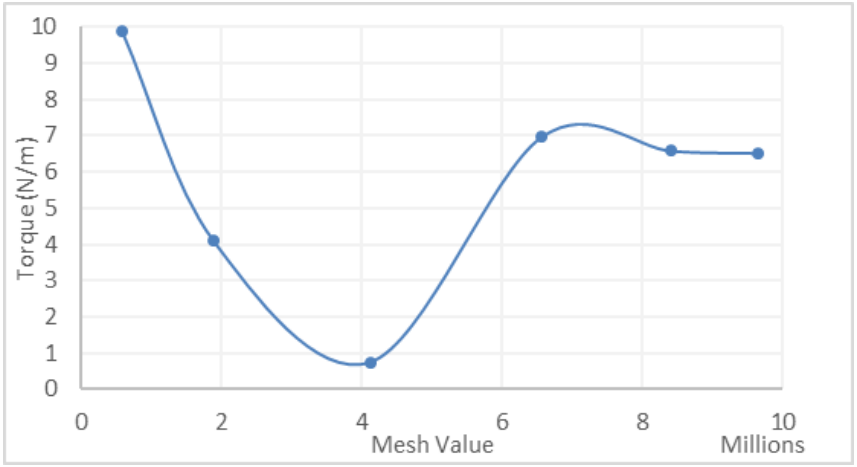


Figure 9. Proposed turbine torque of different networks to check mesh independence.

Furthermore, the time independence of the solution was confirmed by running simulations with varying time steps until the results stabilized. The simulations were performed on a high-performance computing cluster with 64 cores and 256 GB of RAM, requiring approximately 48 hours of CPU time per case. A time step of 0.01 seconds was used to ensure accurate resolution of the flow dynamics.

Boundary conditions were set to replicate realistic wind tunnel conditions and reflect typical operational environments for VAWTs. The performance of the VAWT model was investigated under steady-state conditions. During the analyses, the turbine was assumed to be operating in a steady-state condition under a constant wind speed. A uniform inlet velocity of 10 m/s was applied at the domain inlet, based on the blade chord length. A pressure outlet boundary condition was applied at the downstream end of the domain. The walls of the wind tunnel are modeled as no-slip boundaries. This approach has been accepted as a suitable method to understand the aerodynamic behavior of the turbine and to make comparisons between different turbine designs, but it should be noted that the study assumes steady inlet conditions. This may not fully capture the effects of wind gusts or directional variability that occur in natural environments.

While the simulation results were validated against available experimental data and other numerical studies in the literature, the absence of direct experimental validation for the specific turbine design studied is a limitation. Future research should aim to complement the numerical findings with wind tunnel tests or field measurements to further validate the model and ensure that the assumptions made do not significantly impact the accuracy of the results.

3. Results and discussion

In this paper, a novel Savonius-Darrieus hybrid vertical axis wind turbine was proposed and analyzed using ANSYS Fluent software. The torque output and power coefficient (Cp) of the proposed turbine were analyzed and compared with existing designs to test the ability of the proposed design to convert wind energy into mechanical power more efficiently, especially at the optimum tip speed ratio (TSR). The peak point in the Cp curve indicates the TSR value at which the turbine reaches maximum efficiency. This analysis reveals how effectively the turbine can use wind energy. In addition, the pressure contour plots clearly show the variable aerodynamic forces that the turbine blades are exposed to while rotating. These forces create dynamic loads that can affect the structural integrity of the turbine. The proposed turbine design is promising in terms of both energy conversion efficiency and structural durability. The fact that the turbine can operate effectively even at low wind speeds makes it more useful compared to existing Darrieus turbines. This feature can be a great advantage, especially in regions where wind energy potential is low. In conclusion, this study presents a new approach to solve the starting torque and overall performance problems of Darrieus turbines. The proposed design can be an important step to increase the efficiency and extend the turbine life in wind energy technology. Future experimental studies will further clarify the practical effectiveness of this design.

In Figure 10, to ensure the accuracy of the work process, the results of the Savonius-Darrieus turbine modeled in this paper were compared with Castelli's (Castelli et al., 2011). Figure 10 shows the changes in turbine power coefficient (Cp), defined as equation 5, in terms of blade tip speed ratio. The study by Castelli et al. (2011) was selected for validation due to its comprehensive experimental data on straight-bladed Darrieus turbines, which share similar aerodynamic principles with the proposed hybrid design. Although the current study focuses on helical blades, the validation ensures that the numerical model accurately captures the fundamental physics of VAWT operation.

$$C_p = \frac{P}{0{,}5\rho A V_\infty^3} \tag{5}$$

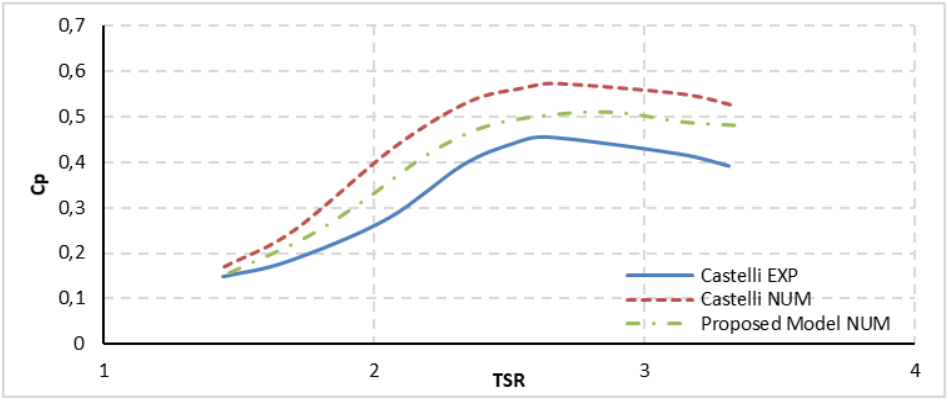


Figure 10. Comparison chart of the numerical results with the results of Castelli et al. (2011) for validation.

The Cp of the hybrid VAWT reached 0.33 at TSR=2 and indicated efficient energy conversion. This value is competitive when compared to other VAWT designs in the literature. For instance, Chabane et al. reported an increase in power coefficients for twin configurations of VAWTs, achieving values around 0.35 to 0.40 under optimal conditions (Chabane et al., 2022). Similarly, studies by Yan et al. have indicated that adaptive designs can push Cp values closer to 0.45, although these designs often involve complex mechanisms that may not be practical for all applications (Yan et al., 2023). The hybrid VAWT's Cp of 0.42 suggests that it is well-positioned within the spectrum of VAWT performance, particularly when considering its self-starting capabilities.

As can be seen in Figure 10, the curve of the numerical results in this study and Castelli's (Castelli et al., 2011) numerical data have a maximum difference of 10% with respect to each other. The comparison demonstrates the model's ability to predict torque and power coefficients and confirms the proposed model's reliability for simulating VAWT performance. The numerical and experimental results also have good accuracy in predicting the position of the maximum power factor and the behavior of the curve. It shows improved prediction of the turbine's performance compared to previous numerical models, particularly in terms of aligning more closely with experimental observations. This suggests that the enhancements in the proposed model could be beneficial for more accurately simulating and optimizing turbine designs in future studies. However, further validation across a broader range of TSRs and different turbine designs would be necessary to fully establish the robustness of the proposed model.

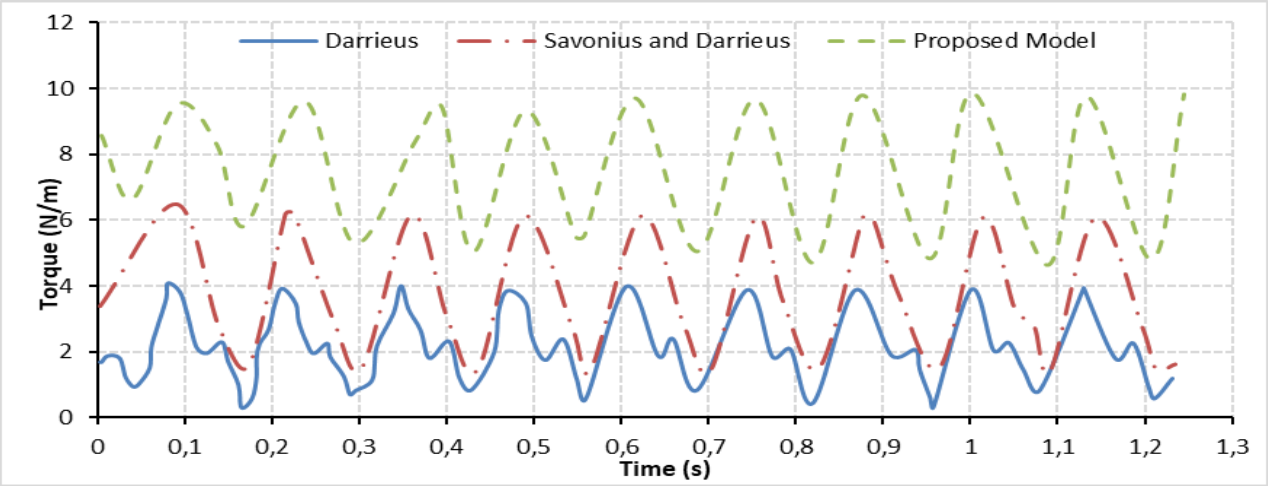


Figure 11. Variation of different turbine torques over time at TSR=2

The turbine torque is obtained at a constant speed ratio of 2.05 Nm. To increase the self-starting capability of the Darrieus turbine, it is recommended to use the Savonius turbine at the same time as the Darrieus turbine. The Savonius turbine can play an important role in improving the operation of the Darrieus turbine due to its high starting torque. Figure 11 shows the starting torque for the two turbines, Darrieus and Savonius, along with our proposed model. As can be seen, the torque values for the Darrieus and Savonius turbines and the proposed model are repeated every 120 and 180 degrees, respectively. Figure 11 clearly shows that the proposed model significantly outperforms both the Darrieus and the combined Savonius and Darrieus turbines in terms of torque generation. The higher and more stable torque values suggest that the improvements made in the design contribute to a more effective conversion of wind energy into mechanical energy. The proposed model is therefore a more suitable choice for applications requiring high and stable torque output.

Figure 12 shows the velocity distribution for the turbine propellers at an angle of 85°.

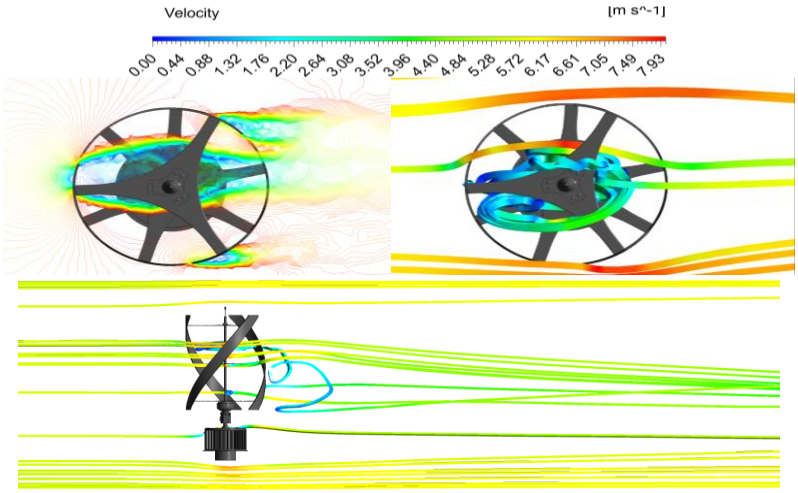


Figure 12. Velocity distribution for the proposed turbine impellers at an angle of 85 degrees.

The velocity scale in Figure 12 shows that the flow velocity reduces significantly in the wake region behind the blades, creating a zone of low-speed air that can impact the performance of subsequent turbines if placed too closely. Velocity distribution around the turbine blades at an 85-degree angle reveals critical aerodynamic features that influence the turbine's performance.

The high-velocity regions at the blade tips and the formation of vortices suggest areas where the turbine is effectively converting wind energy into mechanical energy, but also where some energy is lost due to turbulence. The wake effect behind the blades highlights the need for careful consideration of turbine spacing in an array to minimize the impact of these low-velocity regions. Overall, the velocity distribution patterns indicate that the turbine design has both strengths in maximizing energy capture and areas where further optimization could reduce energy losses.

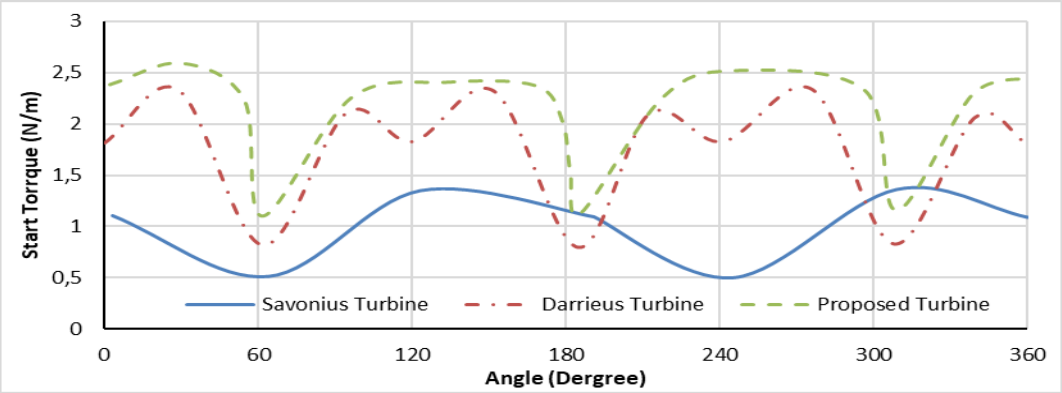


Figure 13. Initial torque for the two turbines Darrieus, Savonius and our proposed turbine at TSR=2

Figure 13 presents the start torque (in N/m) of three different turbine designs—Savonius, Darrieus, and the proposed turbine—across a full rotation (0 to 360 degrees). Start torque is a critical parameter in wind turbines as it determines the turbine's ability to initiate rotation from a standstill, particularly in low wind conditions. The Savonius turbine produces relatively low but more regular start torque throughout the rotation. The torque values range between 0.5 and 1.2 N/m, with smoother variations compared to the other turbines. This consistency is characteristic of the Savonius turbine, known for its high starting torque, which is crucial in initiating movement even at lower wind speeds. However, the torque levels are relatively modest compared to the other designs, indicating that while the Savonius turbine is reliable in starting, it might not generate sufficient torque for sustained operation at higher efficiencies. The Darrieus turbine exhibits higher torque but is inconsistent with significant fluctuations in start torque, with values ranging from around 0.6 to 2 N/m. The peaks correspond to specific angles where the blades are most favorably aligned with the wind, allowing for maximum force generation. However, the dips between these peaks indicate points in the rotation where the blades are less effective, leading to lower torque values. This fluctuation can cause instability in starting

performance, making it more challenging for the turbine to achieve consistent initiation, especially in variable wind conditions. The proposed turbine, on the other hand, shows both the highest and most consistent start torque across the full rotation, with values ranging from approximately 1.2 to 2.5 N/m. This design clearly outperforms both the Savonius and Darrieus turbines in terms of start torque, indicating that the improvements or optimizations made in this model contribute to a more efficient and robust initiation of rotation. The higher torque levels suggest that this turbine design is better suited for environments where starting in low wind conditions is critical and maintaining momentum once started is necessary.

As given in Figure 13, the proposed hybrid VAWT demonstrated a significant improvement in starting torque compared to traditional Darrieus turbines by taking advantage of Savonius turbines' characteristic high starting torque. It achieved a maximum torque of 2.05 Nm at a tip speed ratio (TSR) of 2.0, which represents a 20% enhancement compared to traditional Darrieus turbines. This improvement in starting torque is crucial for VAWTs, particularly in low wind speed environments where self-starting capabilities are often limited. Studies have shown that traditional Darrieus-type VAWTs frequently struggle with self-starting due to their aerodynamic characteristics, which can lead to poor performance at low TSRs (Sun et al., 2016; Batista et al., 2024). In contrast, the hybrid design effectively combines the advantages of both lift and drag mechanisms, enhancing its operational efficiency and starting performance (Toptaş et al., 2020; Zhang et al., 2023).

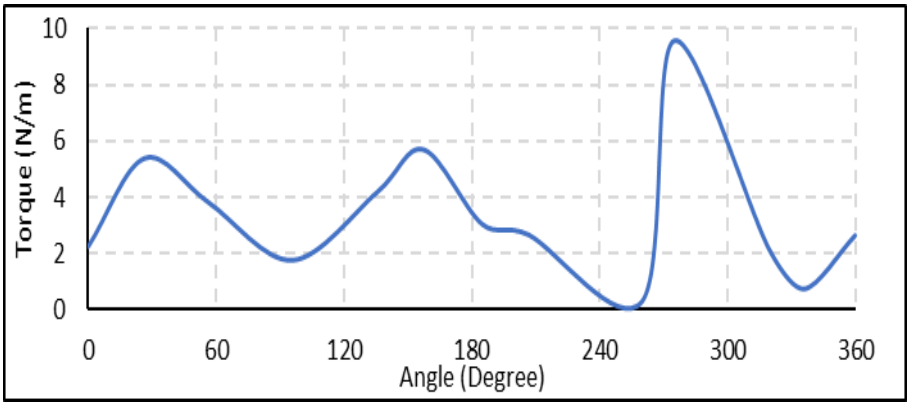


Figure 14. Our proposed turbine torque curve for one turbine rotation

Figure 14 shows the proposed turbine torque curve for one rotation. As can be seen from the figure, the turbine has a minimum at an angle of 260 degrees and a maximum at an angle of 275 degrees. Throughout the rotation, the torque exhibits significant variability, with noticeable peaks and troughs corresponding to specific angular positions of the blades. The most prominent peak occurs around 270 degrees, where the torque reaches its maximum value of approximately 9 N/m. This suggests that the blade alignment with the wind direction is optimal at this specific angle. Conversely, the torque drops sharply to 2 N/m after this peak, reaching a low point just after 300 degrees.

Figures 15 and 16 show the velocity and pressure distributions at 260 and 275 degrees for comparison.

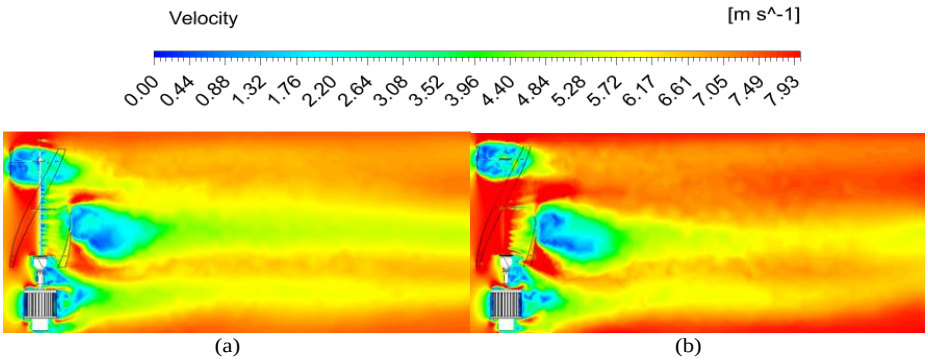


Figure 15. a) Velocity contour at 260-degree angle (minimum torque) b) Speed contour at 275 degree angle (maximum torque).

The velocity contours at 260 degrees illustrate the conditions under which the turbine experiences minimum torque. In contrast, at 275 degrees, the turbine has higher velocity in the wake and reduced energy loss and achieves maximum torque. The comparison of these two angles shows the importance of blade alignment and aerodynamic efficiency in maximizing the turbine's performance.

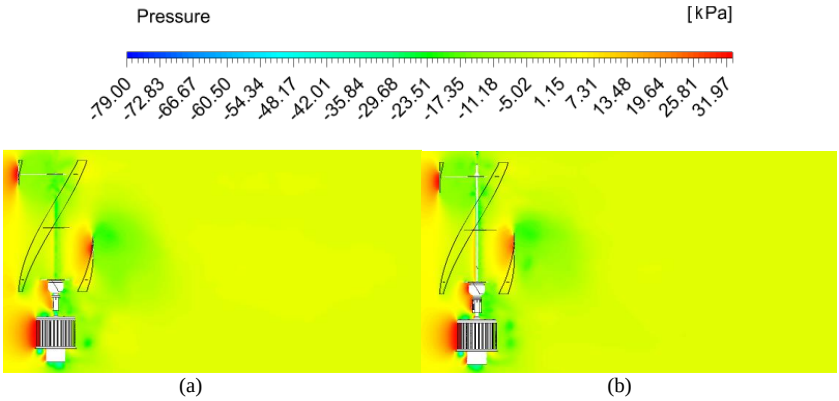


Figure 16. a) Pressure contour at an angle of 260 degrees (minimum torque) b) Pressure contour at an angle of 275 degrees (maximum torque).

From Figures 14, 15, and 16, it can be concluded that the maximum torque of a combined turbine occurs when the proposed turbine blades are approximately perpendicular to the wind flow direction. The proposed turbine blades are also safe from collision with vortices that form behind the turbine, and their aerodynamic performance is not reduced. The pressure contours at 260 degrees (second image) and 275 degrees provide insights into the pressure distribution around the wind turbine blades during conditions of minimum and maximum torque, respectively. These contours are mapped according to the pressure scale provided in the first image, which ranges from approximately -79.00 kPa to 31.97 kPa. At 260 degrees, which corresponds to the minimum torque condition, the pressure contours indicate significant regions of low pressure around and downstream of the turbine blades. The lowest pressure zones are found directly behind the blades, where the airflow separates and forms vortices, resulting in pressure values as low as -79.00 kPa. These low-pressure regions suggest a loss of aerodynamic efficiency, as the blades are not optimally aligned with the wind flow.

5. Conclusion

This study presents a novel hybrid Savonius-Darrieus hybrid VAWT designed to address the limitations of traditional VAWTs, particularly optimized for urban and low-wind environments. The proposed turbine combines the high starting torque of the Savonius turbine with the efficiency of the Darrieus turbine to offer a sustainable energy generation solution in challenging conditions.

Numerical simulations conducted in a three-dimensional wind tunnel using ANSYS Fluent demonstrated that the hybrid turbine achieves a maximum torque of 2.05 Nm at a TSR of 2.0, with a power coefficient (Cp) of 0.42. This represents a 10% improvement in efficiency compared to traditional Darrieus turbines, highlighting the superior performance of the hybrid design. The torque output and power coefficient (Cp) analysis confirm that the turbine is capable of converting wind energy into mechanical power effectively, particularly at the optimal tip speed ratio (TSR). The peak in the Cp curve highlights the TSR at which the turbine achieves maximum efficiency. Pressure contour plots indicate that the turbine blades experience varying aerodynamic forces, which can lead to structural loads that may affect the turbine's life. The numerical results were validated against experimental data to confirm the model's reliability and noted a good agreement with a maximum deviation of 10%. Findings reveal that the hybrid turbine is particularly effective in low-wind conditions, where traditional VAWTs often struggle to start or operate efficiently. The high starting torque of the Savonius component ensures reliable operation, while the Darrieus component maximizes energy conversion at higher wind speeds.

The practical implications of this study are significant. The proposed hybrid turbine offers a cost-effective and efficient solution for decentralized energy generation, particularly in areas where traditional wind turbines are impractical. By reducing reliance on fossil fuels and lowering greenhouse gas emissions, the hybrid turbine

contributes to global efforts to combat climate change and promote sustainable development. Furthermore, the study's findings can inform the design and optimization of future VAWTs.

Nevertheless, this study also has limitations that should be addressed by future research. The numerical simulations need experimental validation through wind tunnel testing or field measurements to confirm the hybrid turbine's performance in real-world conditions. Additionally, as the study focused on a specific blade profile, NACA 0018, and certain rotor geometry, future research should investigate the effects of different blade profiles and configurations on turbine performance. Finally, the economic feasibility of the hybrid turbine should be evaluated to assess its potential for commercialization and large-scale deployment.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to the editor and peers who reviewed and contributed to the article with their valuable and constructive comments.

Author contribution

All authors equally contributed to the study. The authors carried out literature survey, investigation and data curation jointly. The numerical analysis was done by MM. Authors jointly discussed the results and wrote the final draft. Reviewing and editing was performed by MKY. All authors read and approved the final manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

References

Abdelsattar, M., Hafez, W. A., Elbaset, A. A., Kamel, S., Kasem Alaboudy, A. H., Khan, B. Z., & Zaki Diab, A. A. (2022). Voltage Stability Improvement of an Egyptian Power Grid-based Wind Energy System Using STATCOM. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.2716

Altan, B. D., & Atılgan, M. (2008). An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius wind rotor. *Energy Conversion and Management, 49*(12), 3425–3432. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.08.021

Arab Golarche, A., Moghiman, M., & MalAbad, S. M. J. (2016). Numerical simulation of darrieus wind turbine Using 6DOF model to consider the effect of inertia and the fluid-solid interaction. *Modares Mechanical Engineering*, *15*(12), 143–152.

Bakkari, M. (2023). A Review of Wind Energy Potential in Morocco: New Challenges and Perspectives. *Wind Engineering*. https://doi.org/10.1177/0309524x231200582

Baqersad, J., Niezrecki, C., & Avitabile, P. (2015). Numerical and Experimental Analysis of the Boundary Conditions Effects on the Dynamics of Wind Turbines. *Wind Engineering*. https://doi.org/10.1260/0309-524x.39.4.437

Batista, N. C., Melício, R., Matias, J., & S. Catalào, J. P. (2024). Self-Start Performance Evaluation in Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbines: Methodology and Computational Tool Applied to Symmetrical Airfoils. *Renewable Energy and Power Quality Journal.* https://doi.org/10.24084/repqj09.302

Bortolotti, P., Ivanov, H., Johnson, N., Barter, G., Veers, P. S., & Namura, N. (2021). Challenges, Opportunities, and a Research Roadmap for Downwind Wind Turbines. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.2676

Brandao, F. L., Bhatt, M., & Mahesh, K. (2020). Numerical study of cavitation regimes in flow over a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics, 885.* https://doi.org/10.1017/jfm.2019.971

Brusca, S., Lanzafame, R., & Messina, M. (2014). Design of a Vertical-Axis Wind Turbine: How the Aspect Ratio Affects the Turbine's Performance. *International Journal of Energy and Environmental Engineering.* https://doi.org/10.1007/s40095-014-0129-x

Buckney, N., Green, S., & Pirrera, A. (2012). On the Structural Topology of Wind Turbine Blades. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.1504

Capps, S. B., Hall, A., & Hughes, M. (2012). Sensitivity of Southern California Wind Energy to Turbine Characteristics. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.1570

Castellani, F., Astolfi, D., Peppoloni, M., Natili, F., Buttà, D., & Hirschl, A. (2019). Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use. *Machines*, *7*(2), 35. https://doi.org/10.3390/machines7020035

Castelli, M. R., Englaro, A., & Benini, E. (2011). The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD. *Energy*, *36*(8), 4919–4934.

Chabane, F., Arif, A., & Barkat, M. A. (2022). Aerodynamic Shape Optimization of a Vertical-Axis Wind Turbine With Effect Number of Blades. *Dyna*. https://doi.org/10.15446/dyna.v89n220.94343

Chamorro, L. P., Tobin, N., A. Arndt, R. E., & Sotiropoulos, F. (2013). Variable-sized Wind Turbines Are a Possibility for Wind Farm Optimization. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.1646

Chatterjee, T., & Peet, Y. (2018). Exploring the Benefits of Vertically Staggered Wind Farms: Understanding the Power Generation Mechanisms of Turbines Operating at Different Scales. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.2284

Dai, Y. M., Gardiner, N., & Lam, W.-H. (2010). Cfd modeling strategy of a straight-bladed vertical axis marine current turbine. In *The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.

Dhunny, A. Z., Allam, Z., Lollchund, Dookhitram, K., & Rughooputh, S. (2019). A Decentralized Model of Wind Turbine Optimization. *Wind Engineering*. https://doi.org/10.1177/0309524x19849858

Erfort, G., Backström, T. W. von, & Venter, G. (2019). Reduction in the Torque Ripple of a Vertical Axis Wind Turbine Through Foil Pitching Optimization. *Wind Engineering*. https://doi.org/10.1177/0309524x19836711

Gebreel Abdalrahman, Mohamed A Daoud, William W Melek, Fue-Sang Lien, & Eugene Yee. (2019). *Design and Implementation of an Intelligent Blade Pitch Control System and Stability Analysis for a Small Darrieus Vertical-Axis Wind Turbine*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35190.24642

Gupta, R., Das, R., & Sharma, K. (2006). Experimental study of a Savonius-Darrieus wind machine. In *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries*. University of Columbia.

Hameed, Z., Vatn, J., & Heggset, J. (2011). Challenges in the reliability and maintainability data collection for offshore wind turbines. *Renewable Energy*, *36*(8), 2154–2165. https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.008

Hossain, J., Sharma, D., Mishra, N. K., Ansari, M. Z., & Kishore, V. (2016). Re-Assessment of Wind Energy Potential With New Technology in India. *Wind Engineering*. https://doi.org/10.1177/0309524x16651176

Hu, Y., Wang, T., Jin, H., Cao, X [Xianfeng], & Zhang, C. (2017). Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of Vertical-Axis Wind Turbine. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. https://doi.org/10.12720/sgce.6.2.104-113

Huang, S., Shukla, A., Pekny, J. F., Venkatasubramanian, V., & Reklaitis, G. V. (2011). The Effects of Vehicle-to-grid Systems on Wind Power Integration. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.520

Islam, M. (2008). *Analysis of fixed-pitch straight-bladed VAWT with asymmetric airfoils* [PhD Thesis, University of Windsor, Ontario].

Islam, M., Ting, D. S.-K., & Fartaj, A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *12*(4), 1087–1109.

Ji, X., & Schluter, J. (2011). Design and analysis of small-scale vertical axis wind turbine. In *Renewable power generation [electronic resource]: 6 - 8 September 2011, Raddison Blu, Edinburgh, UK* (P17-P17). IET. https://doi.org/10.1049/cp.2011.0214

Kadhim H. Suffer, R. Usubamatov, G. Quadir, & K. Ismail. (2014). Modeling and Numerical Simulation of a Vertical Axis Wind Turbine Having Cavity Vanes. In *Fifth International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation* (pp. 479–484).

Kanno, S., & Ikeda, H. (2017). Next-generation Energy Solutions Aimed at Symbiosis with the Global Environment : Hitachi Review. *Hitachi Review*, *66*(5), 460–465. https://www.hitachihyoron.com/rev/archive/2017/r2017_05/R5-01/index.html

Khalaji, M. N., Aliihsan, K., & Kotcioglu, I. (2019). Investigation of numerical analysis velocity contours k-ε model of RNG, standard and realizable turbulence for different geometries. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, *3*(2), 29–34.

Khammas, F. A., Suffer, K. H., Usubamatov, R., & Mustaffa, M. T. (2015). Overview of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Is One of the Wind Energy Application. *Applied Mechanics and Materials*. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.793.388

Kumar, N., & Prakash, O. (2023). Wind Energy Potential and Its Current Status in India. *Wind Engineering*. https://doi.org/10.1177/0309524x231183373

Kyozuka, Y. (2008). An experimental study on the Darrieus-Savonius turbine for the tidal current power generation. *Journal of Fluid Science and Technology*, *3*(3), 439–449.

Li, Z., Liu, M., Cao, X [Xin], Gao, M., Cheng, L., & Sun, H. (2022). Aerodynamic Performance Analysis and Power Generation Characteristics Experiment of Vertical Axis Wind Turbine. *Engineering Reports*. https://doi.org/10.1002/eng2.12500

Liu, F., Li, C., Xu, Y., Tang, G., & Xie, Y. (2020). A New Lower and Upper Bound Estimation Model Using Gradient Descend Training Method for Wind Speed Interval Prediction. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.2574

Ma, S. (2024). Coal-Fired Power Plants Using Ammonia for Flexibility Enhancement Under Carbon Control Strategies: Status, Development, and Perspectives. *Energy & Fuels*. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c05091

MacPhee, D., & Beyene, A. (2012). Recent Advances in Rotor Design of Vertical Axis Wind Turbines. *Wind Engineering*. https://doi.org/10.1260/0309-524x.36.6.647

Morgulis, N., & Seifert, A. (2015). Fluidic Flow Control Applied for Improved Performance of Darrieus Wind Turbines. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.1938

Niziolek, A. M., Onel, O., Guzman, Y. A., & Floudas, C. A. (2016). Biomass-Based Production of Benzene, Toluene, and Xylenes via Methanol: Process Synthesis and Deterministic Global Optimization. *Energy & Fuels*. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00619

Pan, L., Zhu, Z., Shi, Z., & Wang, L. (2021). Modeling and Investigation of Blade Trailing Edge of Vertical Axis Offshore Wind Turbine. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su131910905

Ponta, F., & Dutt, G. S. (2000). An improved vertical-axis water-current turbine incorporating a channelling device. *Renewable Energy*, *20*(2), 223–241.

Porté-Agel, F., Bastankhah, M., & Shamsoddin, S. (2020). Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. *Boundary-Layer Meteorology*, *174*(1), 1–59. https://doi.org/10.1007/s10546-019-00473-0

Sankar, T. L., & Tiryakioğlu, M. (2008). Design and Power Characterization of a Novel Vertical Axis Wind Energy Conversion System (VAWECS). *Wind Engineering*. https://doi.org/10.1260/030952408787548884

Scott, R., Viggiano, B., Dib, T., Ali, N., Hölling, M., Peinke, J., & Cal, R. B. (2020). Wind Turbine Partial Wake Merging Description and Quantification. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.2504

Shiono, M., Suzuki, K., & Kiho, S. (2002). Output characteristics of Darrieus water turbine with helical blades for tidal current generations. İn The twelfth international offshore and polar engineering conference. In *Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.

Sokolov, P., Jin, J. Y., & Virk, M. S. (2018). Accreted Ice Mass Ratio *(k-factor)* for Rotating Wind Turbine Blade Profile and Circular Cylinder. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.2298

Sun, X., Chen, Y., Cao, Y., Wu, G., Zheng, Z. C., & Huang, D. (2016). Research on the Aerodynamic Characteristics of a Lift Drag Hybrid Vertical Axis Wind Turbine. *Advances in Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.1177/1687814016629349

Takamatsu, Y. (1991). Experimental studies on a preferable blade profile for high efficiency and the blade characteristics of Darrieus-type cross-flow water turbines. *JSME İnternational Journal. Ser*, *34*(2), 149–156.

Takao, M [M.] (2008). A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row. *Journal of Fluid Science and Technology*, *3*(3), 379–386.

Takao, M [Manabu], Kuma, H., Maeda, T., Kamada, Y., Oki, M., & Minoda, A. (2009). A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row — Effect of guide vane geometry on the performance —. *Journal of Thermal Science*, *18*(1), 54–57. https://doi.org/10.1007/s11630-009-0054-0

Takenouchi, K., & Furukawa, A. (2005). Self-starting characteristics of ducted Darrieus turbine for extra-low head power. In *Proc. of Expo World Conf. on Wind Energy, Renewable Energy, Fuel Cell & Exhibition*.

Tawi, K., Yaakob, O., & Sunanto, D. T. (2010). Computer simulation studies on the effect overlap ratio for savonius type vertical axis marine current turbine. *International Journal of Engineering*, *23*(1), 79–88.

Tong, X. (2023). Research on Key Technologies of Large-Scale Wind-Solar Hybrid Grid Energy Storage Capacity Big Data Configuration Optimization. *Wind Engineering*. https://doi.org/10.1177/0309524x231188951

Toptaş, E., Bayrak, M. A., & Boz, T. (2020). Vertical Axis Hybrid Wind Turbine Design. *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engineering*. https://doi.org/10.21595/jmai.2020.21508

Xie, S., & Archer, C. L. (2014). Self-similarity and Turbulence Characteristics of Wind Turbine Wakes via Large-eddy Simulation. *Wind Energy*. https://doi.org/10.1002/we.1792

Yan, P., Li, Y., Gao, Q., Lian, S., & Wu, Q. (2023). Design and Analysis of an Adaptive Dual-Drive Lift–Drag Composite Vertical-Axis Wind Turbine Generator. *Energies*. https://doi.org/10.3390/en16227529

Zhang, J., Wang, C., Liu, W., Zhu, J., Yan, Y., & Zhao, H. (2023). Optimization of the Energy Capture Performance of the Lift-Drag Hybrid Vertical-Axis Wind Turbine Based on the Taguchi Experimental Method and CFD Simulation. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su15118848

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 608-619 doi: 10.17714/gumusfenbil.1560822 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Hurda alüminyumdan alümina takviyeli Al6013 matrisli kompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması

Production of alumina reinforced Al6013 matrix composites from scrap aluminum and investigation of their mechanical properties

Mahmut Can ŞENEL*[1], Tolgahan ARAPOĞLU[2]

[1]*Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55210, Samsun*

[2]*Samsun Büyükşehir Belediyesi, Metal ve Ahşap Atölyeleri Birimi, 55210, Samsun*

• Geliş tarihi / *Received*: 08.10.2024 • Kabul tarihi / *Accepted*: 16.05.2025

Öz

Bu çalışmada, azot gazı altında karıştırma döküm yöntemiyle alüminyum matrise farklı katkı oranlarında (ağırlıkça %3, 6, 9) alümina (Al_2O_3) takviyesi yapılarak Al6013-Al_2O_3 kompozitleri üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen kompozitlerin değişen takviye oranına göre mikroyapısı ve mekanik özellikleri (yoğunluk, Vickers sertlik, gözeneklilik oranı) detaylı bir şekilde incelenmiştir. Al6013-Al_2O_3 kompozitlere uygulanan mekanik testler neticesinde; en yüksek Vickers sertliği (153±3 HV), en düşük gözeneklilik oranı (%5.86) ve en yüksek çekme dayanımı (458±7 MPa) Al6013-%6Al_2O_3 kompozitte tespit edilmiştir. SEM analizlerinde %9 Al_2O_3 takviye edildiğinde Al_2O_3'ün topaklandığı gözlemlenmiştir. Bu topaklanma Al6013-%9Al_2O_3 kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Sonuç olarak Al6013 matrise belirli oranlarda (ağırlıkça %6'ya kadar) Al_2O_3 takviyesiyle malzemenin mekanik özelliklerinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca azot gazı altında karıştırma döküm yönteminin etkili bir üretim yöntemi olduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Alümina, Dayanım, Hurda alüminyum, Karıştırma döküm, Mikroyapı

Abstract

In this study, Al6013- Al_2O_3 composites with different reinforcement ratios of alumina (Al_2O_3: 3, 6, 9 wt.%) were produced via the stir casting technique under nitrogen gas. In this scope of work, the microstructure and mechanical properties (density, Vickers hardness, porosity ratio) of the produced composites were thoroughly investigated based on varying reinforcement ratios. According to the mechanical test results, the highest Vickers hardness (153±4 HV), lowest porosity ratio (5.86%) and highest tensile strength (458±7 MPa) were detected in the Al6013-6%Al_2O_3 composite among Al6013-Al_2O_3 composites. In SEM analyses, it was seen that Al_2O_3 was agglomerated when it was reinforced by 9%. As a result, it was determined that the mechanical properties of the material improved with the reinforcement of Al_2O_3 and graphene up to certain proportions (6 wt.%) into the Al6013 matrix. Furthermore, the stir casting method has proven to be an effective production method under nitrogen gas.

Keywords*: Alumina, Strength, Scrap aluminum, Stir casting, Microstructure*

*Mahmut Can ŞENEL; mahmutcan.senel@omu.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Mevcut zaman diliminde gelişen teknoloji ve artan sanayileşme, geleneksel yöntem ile üretilen malzemeler ile modern teknolojik taleplerin karşılanmasını mümkün kılmamaktadır. Katma değer açıdan yüksek ve üstün teknolojik malzemelerin ortaya çıkması için çalışmalar başlamış ve bu doğrultuda kompozit malzemelerin üretiminin yolu açılmıştır (Üstün, 2022).

Kompozit malzemeler, birden fazla malzemenin üstün olan özelliklerinin bir malzemede toplanması amacıyla oluşturulan malzemedir. Matris ana malzemesine göre kompozitler; metal, polimer ve seramik matrisli olarak sınıflandırılabilmektedir (Şenel, 2018). Partikül yapıdaki malzemelerin belli oranlarda karışmasıyla metal matrisli kompozitler elde edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerdeki (MMK'lerdeki) takviye elemanları; zirkonya (ZrO_2), silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum nitrür (Si_3N_4) gibi nitrür, oksit ve karbür formdaki seramikler olabilmektedir. Metal matrisli kompozitlerin üretiminde, magnezyum (Mg), titanyum (Ti) ve alüminyum (Al) gibi metaller ve alaşımları matris malzemesi olarak tercih edilmektedir. Malzemede matrisin seçiminde korozyon dayanımı, oksitlenme ve mekanik özellikler dikkate alınmaktadır (Şahin, 2015; Altunpak & Akbulut, 2019). MMK'ler bilimsel, teknolojik ve aynı zamanda ticari öneme de sahiptirler. Elyaf, kılcal kristal (whisker) ve parçacık türü takviyelerle güçlendirilen alüminyum matrisli kompozitler düşük yoğunluk, iyi aşınma direnci, yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü, yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik gibi birçok açıdan daha üstün yapıdadırlar. Parçacık takviyeli kompozitler; uçak, savunma, otomotiv ve elektronik endüstrilerinde ve yüksek sıcaklık dayanımı ile yüksek aşınma direnci gerektiren birçok sektörde kullanılmaktadır (Çanakçı, 2006; Kaya, 2016; Şimşek, 2019).

Alüminyum matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan Al_2O_3, kimya dünyasının önemli bir bileşeni olan alüminyum oksitin diğer adıdır. Kimyasal sembolü Al_2O_3 olan bu bileşik, alüminyum ve oksijen elementlerinden meydana gelmektedir. Al_2O_3, çeşitli endüstriyel alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle refrakter malzemelerin üretimi ve seramik endüstrisinde, metalürji gibi diğer birçok sektörde kullanılmaktadır. Dayanıklılığı, yüksek ergime noktası ve iletkenlik özellikleri, Al_2O_3'ü endüstriyel süreçlerde ve çeşitli ürünlerin yapımında tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir. Sertliği ve aşınma direnci yüksek bir malzeme olması sayesinde zımpara kağıtlarında, aşındırıcı malzemelerde ve kesici takımlarda kullanılmaktadır. Ayrıca Al_2O_3, yapay mücevherlerin ve yarı iletkenlerin üretiminde de önemli bir rol oynar. Bu nedenle Al_2O_3, modern endüstrinin vazgeçilmez bir bileşeni olarak karşımıza çıkmaktadır (Şenel, 2020; Şenel & Gürbüz, 2021; Demir, 2022).

Literatürde Al_2O_3 takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üzerine birtakım çalışmaların olduğu görülmüştür. Alaneme & Bodunrin (2013), çalışmalarında Al6063 alüminyum alaşımına hacimsel olarak %6, 9, 15 ve 18 oranlarında Al_2O_3 ilave ederek karıştırma döküm yöntemiyle alüminyum esaslı kompozitler üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerde artan takviye oranıyla gözeneklilik oranının arttığı ve en yüksek gözeneklilik oranının %3.51 olduğu görülmüştür. Al_2O_3 katkısıyla kırılma tokluğu ve kopma uzaması düşerken çekme dayanımı, sertlik ve akma dayanımı yükselmiştir. Arık vd. (2017) yaptıkları çalışmada alüminyum matrise %15 oranında Al_2O_3 takviye ederek toz metalürjisi yöntemi ile kompozit malzemeler üretmiştir. Daha sonra numuneler sıcak presleme yöntemiyle işlenmiş olup mikro yapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak Al_2O_3 taneciklerinin malzeme içerisinde homojen dağılmasına rağmen ara yüzey bağlanmasının yetersiz olduğu gözlenmiştir. Saf alüminyuma kıyasla sertlik değeri %62 oranında iyileşmiştir. Bajaj (2011) çalışmasında karıştırma döküm yöntemiyle ağırlıkça %2.5-10 oranlarında Al_2O_3, SiC ve SiC-Al_2O_3 katkılı alüminyum matris yapılı kompozit malzemelerin üretimini gerçekleştirmiştir. Üretilen numunelere çekme, darbe ve sertlik deneyleriyle numunelerin mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Takviye oranının artması ile sertlik, akma dayanımı ve darbe dayanımı artmıştır. Mekanik özelliklerdeki en yüksek artış 220 MPa akma dayanımı, 120 HRC sertlik değeri ve 9.36 Nm darbe dayanımı ile %10SiC-%10Al_2O_3 takviyeli kompozitte gerçekleşmiştir. Devaraju vd. (2013) yürüttükleri çalışmada, karıştırma döküm tekniğiyle Al6061-T6 matris malzeme içerisine hacimce %8 oranında SiC-grafit ve hacimce %4 oranında SiC-Al_2O_3 takviyesi yaparak alüminyum hibrit kompozitler üretmişlerdir. Yürütülen testler sonucunda; Al6061 alaşımının sertliği 104 HV iken; Al-SiC-grafit kompozitte 108 HV'ye çıkarken Al-SiC-Al_2O_3 kompozitte 120 HV'ye yükselmiştir. Verma vd. (2017) çalışmalarında, karıştırma döküm metoduyla Al356 alaşımına ağırlıkça %10 SiC ve Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin üretimini yapmışlardır. Al_2O_3 takviyeli kompozitin sertlik değeri (99.3 HRC) ve basma dayanımı (440 MPa) daha yüksek çıkarken; SiC takviyeli kompozitin çekme dayanımının (385 MPa), darbe dayanımının (8.6 Nm) ve kesme dayanımının (133 MPa) daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak bu çalışma kapsamında, Al6013 alaşımı matris malzeme olarak; Al_2O_3 tozu ise takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında ilk kez karıştırma döküm yöntemiyle hurda alüminyumdan Al6013 matrisli Al_2O_3 takviyeli kompozitler üretilerek numunelerin yoğunluğu, gözeneklilik oranı, sertliği, çekme dayanımı ve mikro yapısı incelenmiştir.

2. Materyal ve metot
2. Material and method

2.1. Materyal
2.1. Material

Bu çalışmada, üretim metodu olarak azot gazı altında karıştırma döküm yöntemi kullanılmıştır. Karıştırma döküm yöntemi uygulanırken matris malzemesi olarak hurda Al6013 alaşımından, takviye elemanı olarak Al_2O_3 tozlarından faydalanılmıştır. Bu sayede Al_2O_3 takviyeli alüminyum esaslı kompozitler üretilmiştir. Tablo 1'de Al6013 alaşımının bileşenleri ve ağırlıkça katkı oranları verilmiştir. Alüminyum alaşımlardan 6xxx serisi olanlarda ana alaşım elementleri silisyum (Si) ve magnezyum (Mg) olup bu elementlerin dışında bakır (Cu), manganez (Mn), titanyum (Ti) ve çinko (Zn) elementleri de yer almaktadır.

Tablo 1. Al6013 alaşımının bileşenleri ve % ağırlıkça katkı oranları (Koçdağ, 2019)
Table 1. *Components of Al6013 alloy and % weight contribution (Koçdağ, 2019)*

Mn	Si	Cu	Mg	Ti	Zn	Fe	Cr	Al
0.2-0.8	0.6-1.0	0.6-1.1	0.8-1.2	0.1	0.25	0.5	0.1	Kalan

Tablo 2'de Al6013 alaşımının genel özellikleri verilmiştir. Bu alaşımın özellikleri incelendiğinde yoğunluğunun 2.72 g/cm^3, elastisite modülünün 71 GPa, termal iletkenlik katsayısının 150 W/(mºK) ve çekme dayanımının 380 MPa olduğu görülebilmektedir.

Tablo 2. Al6013 alaşımının genel özellikleri (Aytekin, 2021)
Table 2. *General properties of Al6013 alloy (Aytekin, 2021)*

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	2.72
Ergime sıcaklığı (ºC)	579
Termal iletkenlik katsayısı (W/(m°K))	150
Çekme dayanımı (MPa)	380
Akma dayanımı (MPa)	350
Elastisite modülü (GPa)	71
Isıl genleşme katsayısı (ºK^{-1})	21.7x10^{-6}

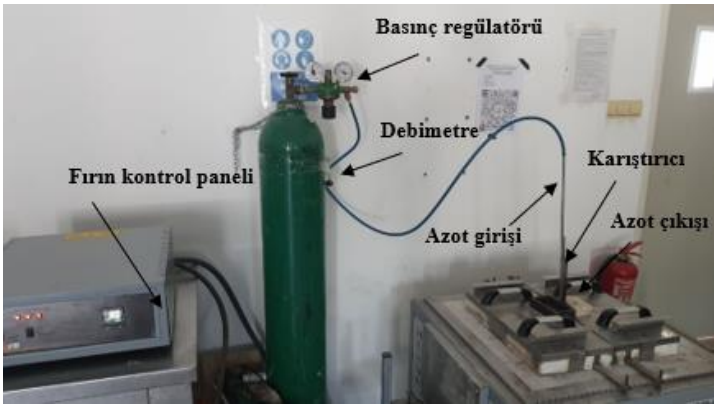
Al_2O_3, sahip olduğu üstün özellikleri (yüksek sertliği, aşınma direnci vb.) sayesinde birçok endüstriyel uygulamada önemli rol oynamaktadır. Günümüzde yapay kemiklerde, yüksek dereceli porselenlerde, yarı iletkenlerde ve entegre devre yüzeylerinde kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, katkı malzemesi olarak Hindalco firmasından temin edilen %98 saflığa ve ~4 µm boyuta sahip Al_2O_3 tozu kullanılmıştır. Tablo 3'de Al_2O_3'ün genel özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. Al_2O_3'ün genel özelllikleri (Kurt, 2010)
Table 3. *General properties of Al_2O_3 (Kurt, 2010)*

Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	3.98
Ergime sıcaklığı (ºC)	2050
Termal iletkenlik katsayısı (W/(mK))	28
Elastisite modülü (GPa)	~360
Genleşme katsayısı (1/ ºC)	7-8.8×10^{-6}
Molekül ağırlığı (g/mol)	101.96

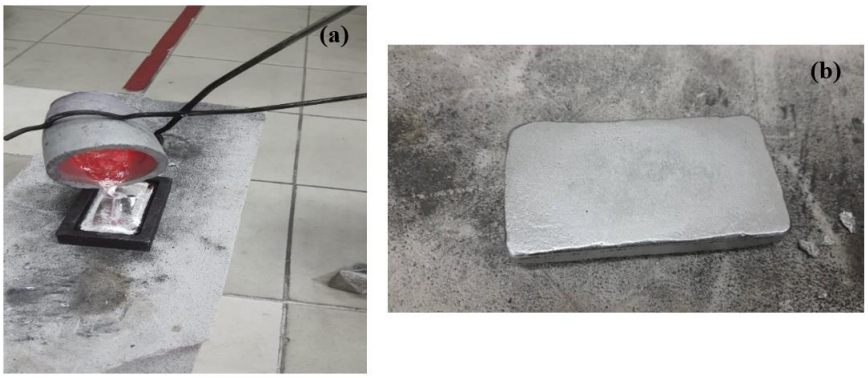
2.2. Yöntem
2.2. Method

Al6013-Al_2O_3 kompozitlerin karıştırma döküm yöntemiyle üretilebilmesi için ilk olarak Al6013 hurdasının ve Al_2O_3 tozlarının Radwag marka maksimum 220 g kapasiteli 1 mg ölçüm hassasiyetine sahip hassas terazide ağırlıkları ölçülmüştür. Al_2O_3'ün alüminyum matriste katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi için topaklanma oluşumlarının önlenmesi gerekmektedir. Al_2O_3 partiküllerdeki bu topaklanma oluşumlarını önlemek için, MTI marka yüksek enerjili bilyalı değirmen kullanılarak tozların karıştırılması sağlanmıştır. Sonrasında Al_2O_3 tozlara 400˚C sıcaklıkta ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bu sayede döküm sırasında ergiyik içerisinde oluşabilecek segregasyonun (ayrışmanın) da önüne geçilmesi sağlanmaktadır. Fırın içerisine yerleştirilen yüksek sıcaklığa dayanaklı grafit döküm pota içerisinde ergitme işlemi yapılmaktadır. Hurda alüminyum ergitme fırınında ergitildikten sonra ön ısıtma işlemi uygulanan tozlar pota içerisine eklenerek mekanik karıştırıcıyla karıştırılmakta ve bu sayede daha homojen bir dağılım elde edilmektedir. Ergitme işlemi için 1100 ℃ sıcaklığa kadar çıkabilen Protherm marka ergitme fırını kullanılmıştır. Grafit potayı sabitlemek için yutong tuğla kullanılarak pota, fırın içerisine yerleştirilmiştir. Ergitme işlemi %99 saflığa sahip azot gazı altında yapılmış olup ergitme işleminde kullanılacak fırın ve azot gazı bağlama tertibatı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Ergitme fırını ve azot gazı bağlama tertibatı
Figure 1*. Melting furnace and nitrogen gas connecting device*

Fırın kapağı kapatıldıktan sonra ön ısıtma uygulanmış grafit pota içerisine hurda Al6013 eklenip ergitme ve karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemiyle birlikte azot gazı 0.2 m^3/h hacimsel debide ergitilen malzemeye nüfus ettirilmiştir. Böylece oksidasyonun önlenmesi hedeflenmektedir. Karıştırma işleminde vorteks oluşumuna özellikle dikkat edilmiştir. Malzeme 700 ℃'de yarı katı halde iken içerisine Al_2O_3 tozları ilave edilmiştir. Ergitme 800℃'de gerçekleştirilip eriyik hale gelen grafit pota içerisindeki karışım, maşa ile alınarak AISI1030 çelik döküm kalıba dökülmüştür (Şekil 2a). Eriyik haldeki malzeme kalıba döküldükten sonra belirli bir süre katılaşması için beklenmiştir. Daha sonra döküm kalıbında bulunan külçe dışarıya çıkartılıp 20 dk kadar soğutulmuştur. Şekil 2b'de karıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzeme külçesi gösterilmektedir.



Şekil 2. Eriyiğin kalıba dökülmesi işlemi (a) ve üretilen kompozit külçe (b)
Figure 2. *The process of pouring the melt into the mold (a) and the produced composite ingot (b)*

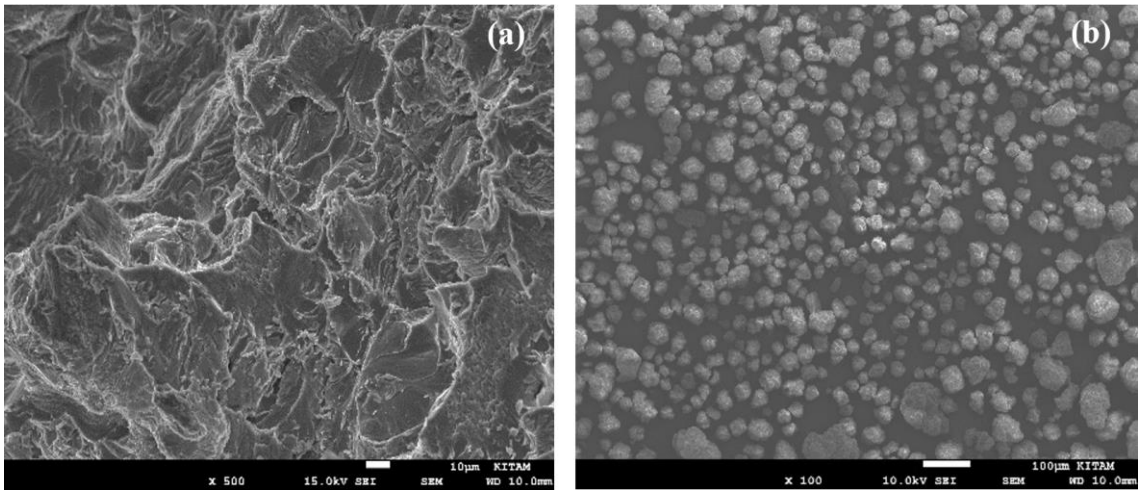
Döküm külçe çekme testleri için 100×10×10 mm boyutlarında; sertlik ve yoğunluk ölçümü için 10×10×10 mm boyutlarında kesilerek test numuneleri hazırlanmıştır. Sonrasında kesilen numuneler ani bir çekiç darbesiyle kırılarak mikroyapı incelemeleri için kırık yüzey numuneleri elde edilmiştir. Üretilen numunelerin zımparalanması ve yüzeylerinin parlatılması işlemleri Metkon marka zımparalama ve parlatma cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Öncelikle numune yüzeyindeki oksit tabakayı uzaklaştırmak için ilk olarak zımparalama işlemi yapılmıştır. İşlem sırasında sırasıyla; 100'lük, 600'lük ve 2000'lik SiC su zımparaları kullanılarak 10 dk boyunca numuneler zımparalanmıştır. Ardından alümina parlatma solüsyonu (toz boyutu: 1 µm) elmas çuha üzerine damlatılarak her bir numunenin yüzeyi 15 dk boyunca parlatılmıştır. Yüzey üzerindeki solüsyon artıkları etil alkol ile temizlendikten sonra numuneler test ve karakterizasyon için hazır hale getirilmiştir.

Üretilen numunelerin mekanik davranışını incelemek amacıyla numunelerin yoğunluk ölçümü, sertlik ölçümü ve çekme testi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin deneysel yoğunluğunu bulmak için Arşimet terazisi kullanılmıştır. Her bir seriden en az 5 numunenin yoğunluk ölçümü gerçekleştirilerek ortalama yoğunluk değeri belirlenmiştir. Vickers sertlik ölçümünde ise TmTeck marka mikro Vickers sertlik ölçme cihazından faydalanılmıştır. Test kapsamında ASTM E384 standardına göre numunelere 15 s süresince 1.961 N'luk (200 gf) yük uygulanmıştır. Numune üzerindeki iz mikroskop yardımıyla ölçülmüş ve bu değerler bilgisayara girilerek sertlik değeri belirlenmiştir. Numunenin yüzeyinden rastgele seçilen en az 5 sertlik değerinin ortalaması alınarak numunelerin ortalama sertlik değeri belirlenmiştir. Üretilen numunelerin çekme testi, ASTM E-8 standardına göre 10 ton kapasiteli üniversal test makinasıyla 3 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin çekme dayanımı değerlerinin tutarlı olması için çekme testleri en az 3 (üç) defa tekrar edilmiştir.

Bu çalışmada, tozların ve numunelerin X-ışını kırınımı (XRD) faz analizleri için Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi'nde bulunan Rigaku Smartlab model XRD cihazından faydalanılmıştır. Kullanılan XRD cihazı 2θ=20-80º tarama açısı aralığına, 2º/dk tarama hızına, 40 kV, 150 mA çalışma koşullarına ve 154 nm dalga boyuna sahiptir. Tozların morfolojisinin ve üretilen numunelerin kırık yüzeylerinin analizi için Jeol JSM7001F model taramalı elektron mikroskobu (SEM) tercih edilmiştir. Numunelerin mikro yapısında yer alan elementlerin dağılımının tespiti için SEM cihazı Enerji Dağılım X-ışını (EDX) spektrometresinden faydalanılmıştır

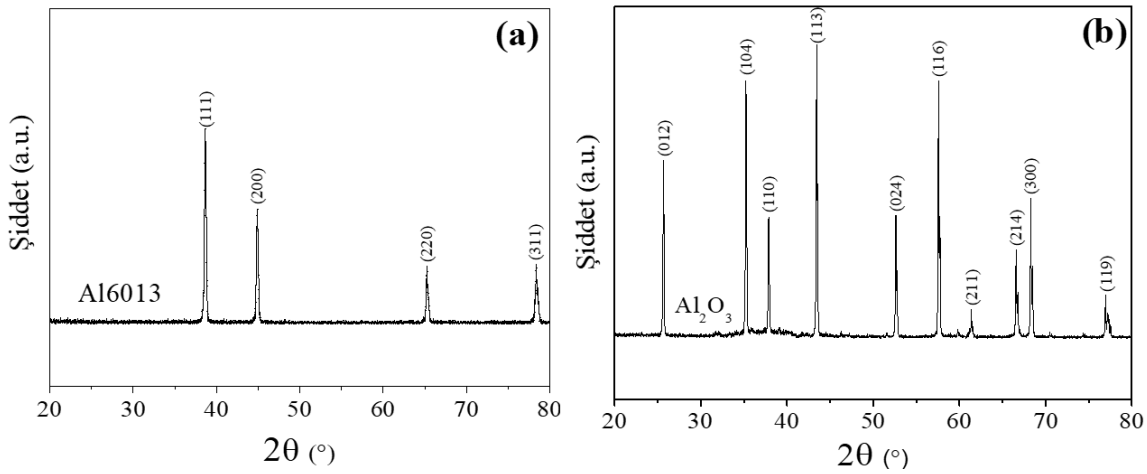
3. Bulgular ve tartışma
3. Results and discussion

Bu bölümde, hurda Al6013 alaşımı ve Al_2O_3 tozlarının görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Hurda Al6013 alaşımının 500 kat büyütmeli mikroskop görüntüleri incelendiğinde alüminyum tanelerinin 20 µm'den daha küçük boyutlarda olduğu rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Al_2O_3 tozlarına ait 100 kat büyütmeli SEM görüntüsünde ise Al_2O_3'ün küresel morfolojik bir yapıda ve partikül boyutunun 10 µm'den küçük olduğu görülmektedir (Şekil 3).



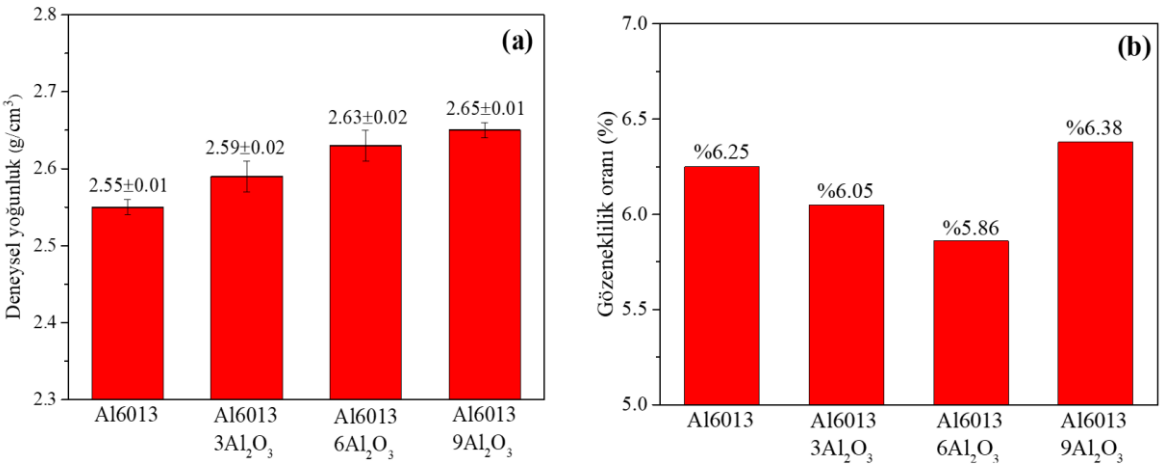
Şekil 3. Hurda Al6013 alaşımı (a) ve Al_2O_3 tozlarına ait SEM görüntüleri (b)
Figure 3. *SEM images of scrap Al6013 alloy (a) and Al_2O_3 powders (b)*

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan hurda Al6013 alaşımı ve Al_2O_3 tozlarının X-ışını kırınımı (XRD) cihazı kullanılarak faz analizleri yapılmıştır. XRD kırınım desenleri incelendiğinde; Al6013 alaşımına ait kırınım açılarının (2θ) 38°, 45°, 66°, 78° ve Al_2O_3 tozuna ait kırınım açılarının (2θ) 26°, 36°, 38°, 44°, 57°, 63°, 67°, 69°, 78° olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4). Bu analizlerle kompozit yapı içerisinde bulunan alüminyumun ve Al_2O_3'ün varlığı doğrulanabilecektir (Şenel & Gürbüz, 2021). Üretilen kompozitlerde ana fazların ve ikincil fazların tespiti açısından bu analizler önem arz etmektedir.



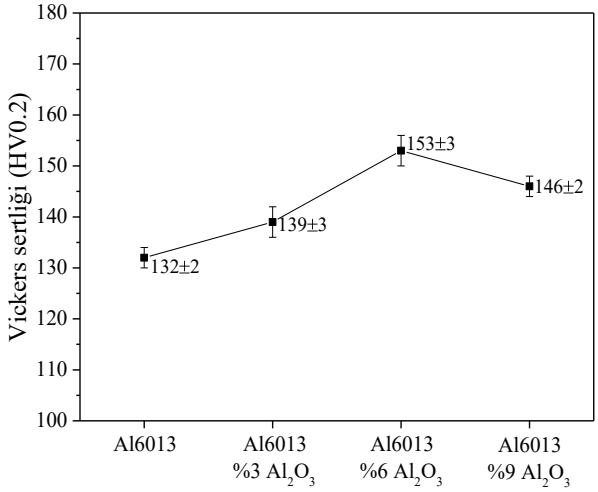
Şekil 4. Hurda Al6013 alaşımına (a) ve Al_2O_3 tozlarına ait XRD kırınım desenleri (b)
Figure 4. *XRD patterns of scrap Al6013 alloy (a) and Al_2O_3 powders (b)*

Al_2O_3 takviye oranına göre yoğunluk ve gözeneklilik oranı değişimi Şekil 5'de sunulmuştur. Al_2O_3 takviyesiyle deneysel yoğunluk düzenli olarak artmıştır. Gözeneklilik oranının ağırlıkça %6 Al_2O_3 takviyesine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Takviye oranı ağırlıkça %9'a çıkarıldığında ise gözeneklilik oranının arttığı tespit edilmiş olup bu durum Al_2O_3'ün muhtemel topaklanması sebebiyle gerçekleşmiştir. En yüksek yoğunluk Al6013-%9Al_2O_3 (2.65±0.01 g/cm^3) kompozitte ve en düşük yoğunluk (2.55±0.01 g/cm^3) Al6013 alaşımında saptanmıştır. Bu durum, Al6013 alaşımına (2.72 g/cm^3) kıyasla Al_2O_3'ün (3.98 g/cm^3) yüksek teorik yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. En yüksek gözeneklilik oranı (%6.38) Al6013-%9Al_2O_3 kompozitte ve en düşük gözeneklilik oranı (%5.86) Al6013-%6Al_2O_3 kompozitte belirlenmiştir. Ağırlıkça %6 Al_2O_3 katkısına kadar kompozitin gözeneklilik oranının olumlu yönde etkilendiği görülmüştür. Ağırlıkça katkı oranı %6'nın üzerine çıkarıldığında topaklanmanın etkisiyle gözeneklilik oranının arttığı düşünülmektedir. Bu durumu destekleyen literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda matris malzemeye kıyasla partikül boyutu daha küçük bir takviye elemanının matrise eklenmesiyle mikroyapıda yer yer topaklanmaların oluştuğu ve bu topakların gözenekliliği artırarak mekanik özellikleri olumsuz etkilediği rapor edilmektedir (Şenel & Gürbüz, 2021; Işık, 2023; Taşkın, 2023).



Şekil 5. Al6013 alaşımı ve Al6013-Al_2O_3 kompozitlerde Al_2O_3 katkı oranıyla yoğunluk (a) ve gözeneklilik oranı (b) değerleri
Figure 5. *Density (a) and porosity ratio (b) values of Al6013 alloy and Al6013-Al_2O_3 composites with Al_2O_3 reinforcement ratio*

Al_2O_3 takviye oranına göre Al6013-Al_2O_3 kompozitlerin Vickers sertlik değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. En yüksek Vickers sertlik değeri (153±3 HV) Al6013-%6Al_2O_3 kompozit malzemede tespit edilmiştir. En düşük sertlik değeri Al6013 alaşımında gözlemlenmiştir. Al6013-Al_2O_3 kompozit yapıda Al_2O_3 miktarı ağırlıkça %9'a çıkarıldığında sertlik değerinde (146±2) düşüş meydana gelmiştir. Bu durumun nedeninin, ortalama 3-4 µm tanecik boyutuna sahip Al_2O_3 partiküllerinin matris içerisinde kümelenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sertliğin artışı, matris içerisinde Al_2O_3'ün daha homojen bir dağılım sergilemesinden, sert seramik yapısından ve sinterleme etkisiyle matris-takviye elemanı arasındaki arayüzey etkileşiminin daha etkin olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde bu konu üzerine yapılmış çalışmalar da bu durumu desteklemektedir (Demir vd., 2022; Demir vd., 2023; Işık, 2023).



Şekil 6. Al6013 alaşımında ve Al6013- Al_2O_3 kompozitlerde Al_2O_3 katkı oranıyla Vickers sertlik değerleri
Figure 6. *Vickers hardness values of Al6013 alloy and Al6013-Al_2O_3 composites with Al_2O_3 reinforcement ratio*

Takviye elemanının sertliği üretilen kompozit malzemelerin sertlik değerlerini doğrudan etkilemektedir. Takviye malzemesinin sertlik değerinin kompozitin sertlik değerine etkisi karışım kuralına göre Eşitlik (1)'de verilmiştir (Taşkın, 2023).

$$H_k = H_m f_m + H_r f_r \quad (1)$$

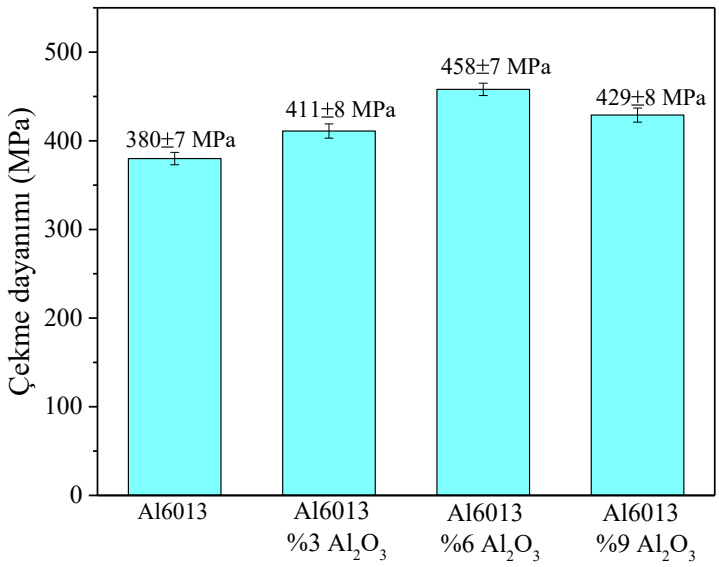
Bu eşitlikte, H_k, H_m, H_r kompozitin, matrisin, takviye elemanın sertliğini, f_m ve f_r matris ve takviye elemanının hacimsel katkı oranını ifade etmektedir.

Alüminyum matrisli kompozitin sertliğini, dislokasyon yoğunluğu mekanizması kontrol etmektedir. Al_2O_3 katkısıyla alüminyum esaslı kompozitin dislokasyon yoğunluğu artmaktadır. Al-Al_2O_3 kompozitlerin dislokasyon yoğunluğunun kareköküyle, Vickers sertliği arasında doğrudan bir ilişki olup Eşitlik (2)'de verilmiştir (Işık, 2023).

$$H = H^* + aGb\sqrt{\rho} \quad (2)$$

Burada, b Burger vektörünü, G kayma modülünü, ρ dislokasyon yoğunluğunu, α ve h ise malzeme sabitlerini ifade etmektedir. Bu eşitlik, dislokasyon yoğunluğuyla malzeme sertliği arasında lineer bir ilişki olduğunu göstermektedir. Dislokasyonların hareketinin zorlaşmasıyla dislokasyon yoğunluğu artmakta ve bu durum da kompozitin sertliğini artırmaktadır.

Şekil 7'de Al6013 alaşımının, Al6013-%3Al_2O_3, Al6013-%6Al_2O_3ve Al6013-%9Al_2O_3 kompozitlerin çekme dayanımı verilmiştir. Yapılan testler neticesinde Al6013 alaşımının çekme dayanımı 380±7 MPa iken; %6Al_2O_3 katkılı alüminyum esaslı kompozitin çekme dayanımı 458±7 MPa'a yükselmiştir. Bu durum, Al_2O_3 partiküllerinin engel bariyeri görerek dislokasyonların hareketini engellemesinden kaynaklanmaktadır. Dislokasyonların hareketinin engellenmesi, dislokasyon yoğunluğunu artırarak kompozit malzemenin dayanımını artırmaktadır. Bu durumu literatürdeki çalışmalar da desteklemektedir (Demir vd., 2022; Demir vd., 2023).

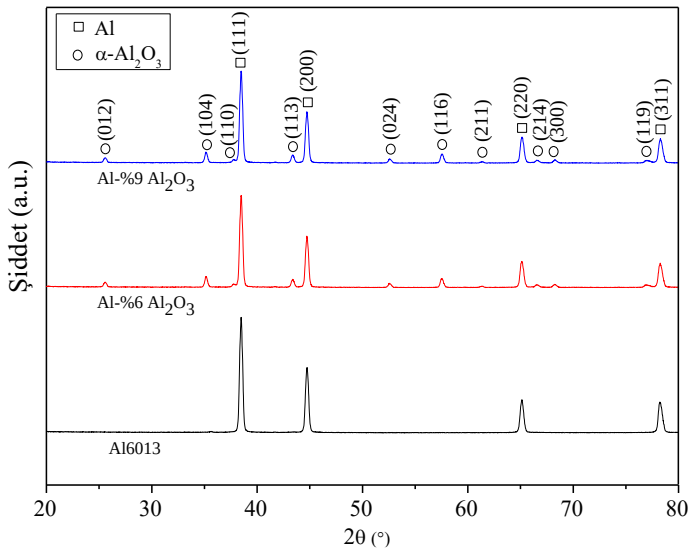


Şekil 7. Al6013 alaşımı ve Al6013-Al_2O_3 kompozitlere ait çekme dayanımı değerleri
Figure 7. *Tensile strength values of Al6013 alloy and Al6013-Al_2O_3 composites*

Tane sınırında bulunan takviye elemanları hem tane büyümesine engellemekte hem de dislokasyonlar için engel teşkil ederek mukavemette artış sağlamaktadır. Eşitlik (3)'de verilen Hall Petch denkleminden görüldüğü üzere tane boyutunun küçülmesi akma dayanımını (σ_A) artırmaktadır. Eşitlikteki d partikül boyutu, σ_A akma dayanımı ve K ise malzeme sabitidir. Bu eşitlik, daha küçük tane boyutlu bir katkı elemanının (Al_2O_3 gibi) matrise eklenmesinin kompozitin akma dayanımının artacağını ifade etmektedir (Işık, 2023).

$$\sigma_A = K.\, d^{-1/2} \tag{3}$$

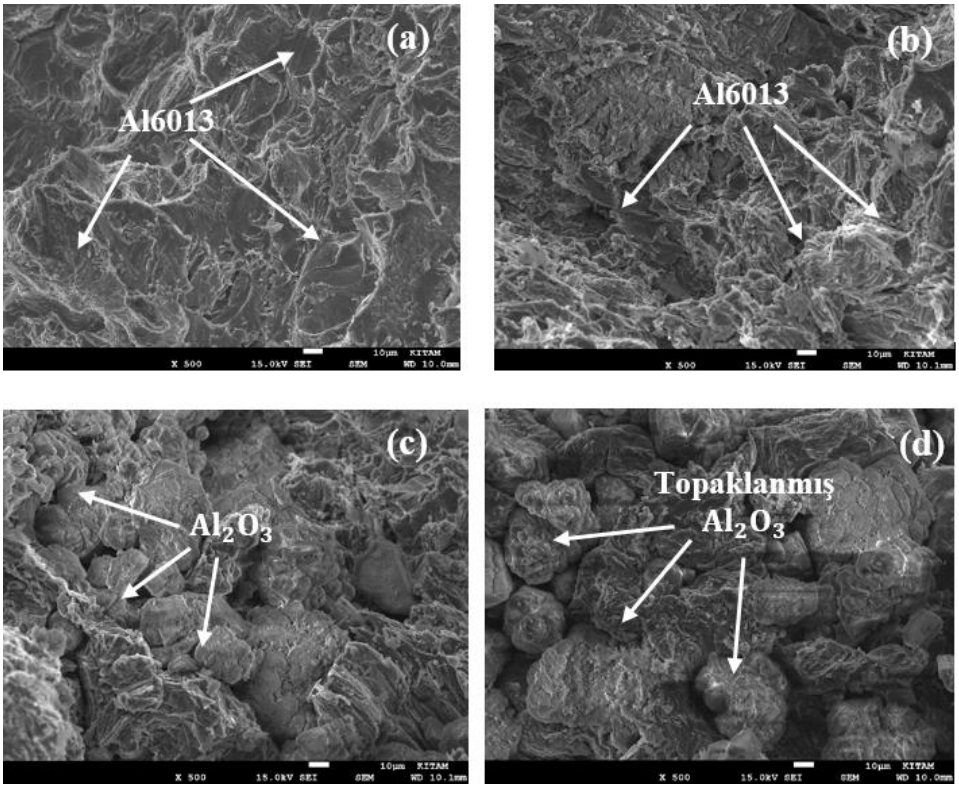
Karıştırma döküm yöntemi ile üretilen kompozitlerin faz yapısının tespiti için XRD analizi yapılmıştır. Al6013 alaşımı ve Al6013-Al_2O_3 kompozitlerin XRD pikleri Şekil 8'de sunulmuştur. XRD deseni incelendiğinde; kompozitlerde Al_2O_3 ve alüminyum piklerine rastlanmıştır. Bu durum da mikro yapıda alüminyumun ve Al_2O_3'ün varlığını doğrulamaktadır.



Şekil 8. Al6013 alaşımına ve Al6013-Al_2O_3 kompozitlere ait XRD desenleri
Figure 8. *XRD patterns of Al6013 alloy and Al6013-Al_2O_3 composites*

Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen Al6013 matrisli kompozitlerin mikro yapılarını incelemek amacıyla kırık yüzey SEM analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 9). Al6013-%3Al_2O_3 ve Al6013-%6Al_2O_3 kompozitlere ait SEM görüntüleri incelendiğinde, kompozit yapı içerisindeki Al_2O_3 partiküllerinin tane sınırlarına yerleşerek

homojene yakın bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Ağırlıkça %9Al_2O_3 takviyesi içeren kompozit malzemede ise Al_2O_3 taneciklerinde topaklanmaların meydana geldiği ve bu topaklanmaların etkisiyle mikroyapıda gözeneklerin oluştuğu belirlenmiştir. Bunun sonucunda üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin bozulduğu öngörülmektedir.



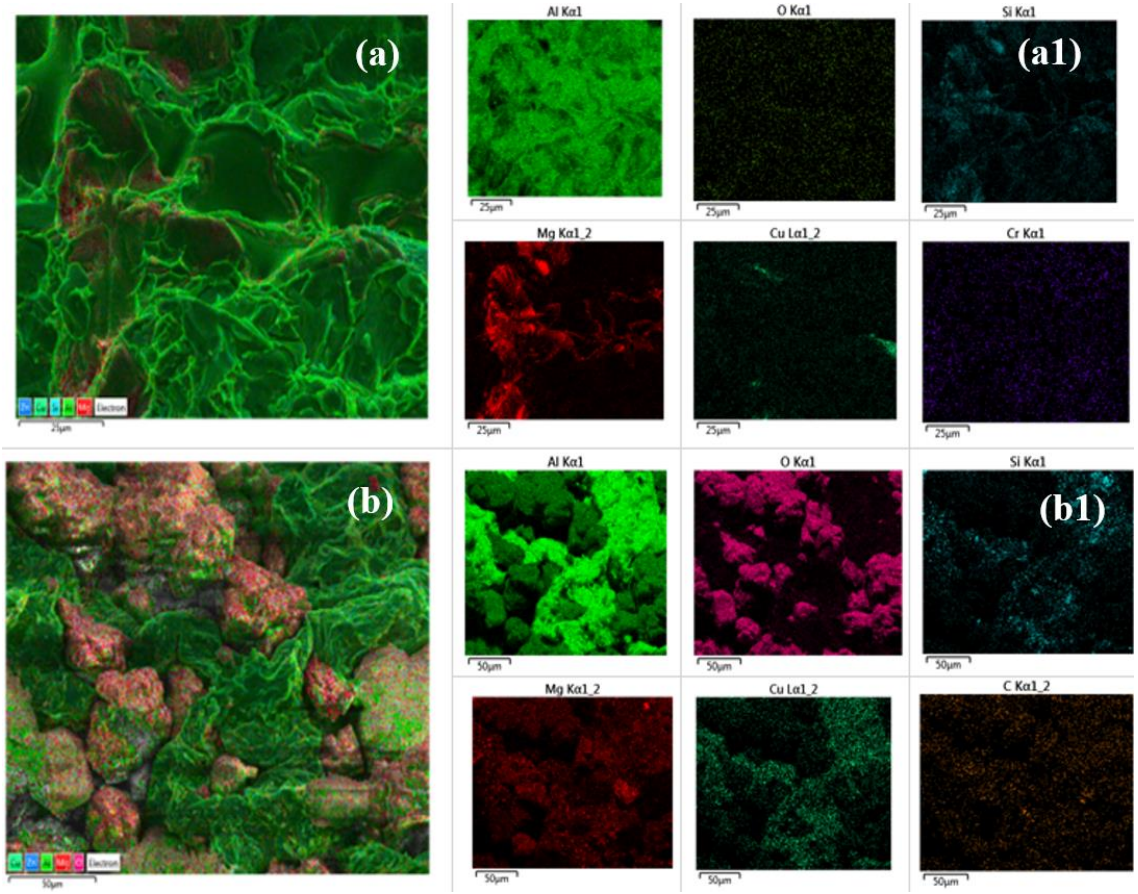
Şekil 9. Al6013 alaşımına (a), Al6013-%3Al_2O_3 (b), Al6013-%6Al_2O_3 (c) ve Al6013-%9Al_2O_3 kompozitlere (d) ait kırık yüzey SEM görüntüleri
Figure 9. *Fracture surface SEM images of Al6013 alloy (a), Al6013-%3Al_2O_3 (b), Al6013-%6Al_2O_3 (c) and Al6013-%9Al_2O_3 composites (d)*

Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen Al6013 alaşımına ve Al6013-%9Al_2O_3 kompozit malzemesine ait element dağılım haritası ve SEM-EDX görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir. SEM-EDX analizlerinde her bir element farklı renk ile gösterilmiştir. SEM-EDX analizinde Al (yeşil dağılımlı), C (turuncu dağılımlı), Mg (kırmızı dağılımlı), O (pembe dağılımlı) ve Si (turkuaz dağılımlı) elementleri yapı içerisinde görülmektedir. Oksijen elementi iç yapıdaki oksit tabakanın varlığını ifade etmektedir. Al6013-%9Al_2O_3 kompozitin SEM-EDX element haritasından Al_2O_3'ün topaklandığı görülmektedir. Bu da mekanik özelliklerde bozulmalara sebep olmaktadır.

4. Tartışma ve sonuçlar
4. Discussion and conclusions

Yürütülen çalışmada, Al6013 alüminyum matrise ağırlıkça %3, 6, 9 oranlarında Al_2O_3 takviyesi yapılarak azot gazı altında karıştırma döküm yöntemi kullanılarak malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen numunelerin gözenekliliği, yoğunluğu, sertliği, çekme dayanımı ve mikroyapısı incelenerek ulaşılan sonuçlar aşağıda özet halinde verilmiştir:

- En yüksek yoğunluk değeri (2.65 g/cm^3) Al6013-%9Al_2O_3 kompozitte ve en düşük gözeneklilik oranı (%5.86) Al6013-%6Al_2O_3 kompozitte belirlenmiştir. Ağırlıkça %6'ya kadar Al_2O_3 katkısının kompozitin hem yoğunluk ve hem de gözeneklilik oranını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Buna karşın ağırlıkça %9Al_2O_3 takviyesinde üretilen numuneler içerisinde en yüksek gözeneklilik oranı elde edilmiştir. Bu durumun Al_2O_3 partiküllerin muhtemel topaklanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 10. Karıştırma döküm yöntemi ile üretilen Al6013 alaşımının SEM-EDX görüntüsü (a), element dağılım görüntüleri (a1) ve Al6013-%9Al_2O_3 kompozitin SEM-EDX görüntüsü (b), element dağılım görüntüleri (b1)
Figure 10. *SEM-EDX picture (a), element distribution pictures (a1) of Al6013 alloy produced by stir casting method and SEM-EDX picture (b), element distribution pictures (b1) of Al6013-9%Al_2O_3 composite*

- En yüksek Vickers sertlik değeri (153±3 HV) ve çekme dayanımı (458±7 MPa) Al6013-%6Al_2O_3 kompozit malzemede tespit edilmiştir. En düşük sertlik değeri (132±2 HV) Al6013 alaşımında gözlemlenmiştir. Al6013 alaşımına kıyasla Al6013-%6Al_2O_3 kompozit yapıda sertliğin %16 oranında arttığı tespit edilmiştir. Al_2O_3 miktarı ağırlıkça %9'a çıkarıldığında sertlik değerinde (146±2 HV) düşüş meydana gelmiştir. Bu durum, ortalama 3-4 µm tanecik boyutuna sahip Al_2O_3 partiküllerinin kümelenmesinden kaynaklandığı öngörülmektedir.

- XRD kırınım desenleri incelendiğinde; Al6013-Al_2O_3 kompozitlerinde alüminyum ve Al_2O_3 piklerine rastlanmıştır. Bu durum da mikro yapıda alüminyumun ve Al_2O_3'ün varlığını doğrulamaktadır.

- SEM analizlerinde, Al_2O_3 partiküllerinin Al6013-%3Al_2O_3 ve Al6013-%6Al_2O_3 kompozit yapılarda homojene yakın dağıldığı görülmüştür. Ancak SEM-EDX görüntüsünden de anlaşılabileceği üzere Al6013-%9Al_2O_3 kompozit yapıda Al_2O_3 partiküllerinin topaklandığı tespit edilmiştir.

- Yapılan ölçüm ve analizler sonucunda Al6013 alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirmede Al_2O_3'ün iyi bir takviye elemanı olduğu görülmüştür. Ayrıca azot gazı altında karıştırma döküm yöntemiyle üretilen Al6013-Al_2O_3 kompozitlerde en uygun Al_2O_3 takviye oranı ağırlıkça %6 olarak belirlenmiştir.

Teşekkür
Acknowledgement

Bu çalışmada, SEM ve XRD analizi konusunda vermiş olduğu destekten dolayı Karadeniz İleri Tekonoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne (KİTAM) teşekkür ederiz. Yürütülen çalışma PYO.MUH.1901.22.008 kodlu proje ile Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederiz.

Yazar katkısı
Author contribution

Mahmut Can Şenel: Mikroyapı analizi, faz analizi ve eleştirel inceleme kapsamında katkı sunmuştur.
Tolgahan Arapoğlu: Literatür taraması ve mekanik testlerin yürütülmesi alanında katkı sunmuştur.

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

Alaneme, K. K., & Bodunrin, M. O. (2013). Mechanical behaviour of alumina reinforced AA 6063 metal matrix composites developed by two step-stir casting process. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineerin*g, 6(3), 105- 110.

Altunpak, Y., & Akbulut, H. (2019). δ-Al_2O_3 kısa fiber takviyeli LM 13 alüminyum alaşımının eğilme dayanımına yaşlandırma ısıl işleminin etkisi. *ECJSE*, 6(1), 175-180. https://doi.org/10.31202/ecjse.463790

Arık, H., Semerci, P., & Kırmızı, G. (2017). Sıcak presleme ile alüminyum matrisli ve Al_2O_3 takviyeli toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışlarının araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(4), 87-97. https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.343115

Aytekin, S. (2021). *Al_2O_3 nano partikül takviyeli al matrisli kompozit malzemenin farklı kaynak akımları ve türlerinde oluşan mikroyapı ve sertlik özelliklerinin analizi* [Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Bajaj, P. (2011). *Mechanical behaviour of aluminium based metal matrix composites reinforced with SiC and alumina* [Yüksek Lisans Tezi, Thapar University, Üretim ve Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı].

Çanakçı, A. (2006). AA2024 matrisli B_4C parçacık takviyeli kompozitlerin vorteks yöntemiyle üretimi ve özelliklerinin incelenmesi [Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Demir, M. (2022). *İndüksiyonla sıcak işlemin grafen ve/veya Si_3N_4/B_4C takviyeli Al6061 esaslı kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerine ve mikroyapısına olan etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].

Demir, M. E., Çelik, Y. H., & Kalkanlı, A. (2022). The effect of rolling and aging on mechanical and tribological properties in B_4C particle reinforced Al7075 matrix composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 16187-16208. https://doi.org/10.1007/s13369-022-06891-6

Demir, M. E., Çelik, Y. H., Kilickap, E., & Kalkanlı, A. (2023). The effect of B_4C reinforcements on the microstructure, mechanical properties, and wear behavior of AA7075 alloy matrix produced by squeeze casting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237(6), 2574-2584. https://doi.org/10.1177/09544089221139095

Devaraju, A., Kumar, A., & Kotiveerachari, B. (2013). Influence of addition of GMP/Al_2O_{3p} with SiC_p on wear properties of aluminum alloy 6061-T6 hybrid composites via friction stir processing. *Transtions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 1275-1280. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62593-5

Işık, E. (2023). *Al7075-Al_2O_3-grafen ve Al7075-ZrO_2-grafen hibrit kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerinin ve mikroyapısının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Kaya, A.İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite,* 38-45.

Koçdağ, N. (2019). *6013 alüminyum alaşımının özelliklerine ısıl işlem ve deformasyon parametrelerinin etkileri* [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].

Kurt, H. (2010). *Al-Al_2O_3 kompozit malzeme üretiminde karıştırma tekniğinin kompozitin aşınma davranışı üzerine etkilerinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Şahin, Y. (2015). *Kompozit malzemelere giriş.* Seçkin Yayıncılık.

Şenel, M. C. (2018). *Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalürjisi metoduyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi* [Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Şenel, M. C. (2020). Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen saf Al ve Al-B_4C, Al-Al_2O_3 kompozitlerin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 783-795. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.689359

Şenel, M. C., & Gürbüz, M. (2021). Investigation on mechanical properties and microstructures of aluminum hybrid composites reinforced with Al_2O_3/GNPs binary particles. *Archives of Metallurgy and Materials*, 66(1), 97-106. https://doi.org/10.24425/amm.2021.134764

Şimşek, İ. (2019). Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen farklı miktarlarda ZrO_2 takviyeli Al-2Gr matrisli kompozit malzemelerin aşınma performanslarının incelenmesi. *ECJSE*, 6(3), 594–605. https://doi.org/10.31202/ecjse.560741

Taşkın, A. (2023). *Al7075-Si_3N_4-grafen ve Al7075-B_4C-grafen hibrit kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].

Üstün, M. (2022). *Al-ZrO_2-grafen ve Al-SiO_2-grafen hibrit kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerinin ve mikroyapısının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].

Verma, R., Sharma, S., & Kumar, D. (2017). Analysis of mechanical properties of aluminium based metal matrix composites reinforced with alumina and SiC. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6(3), 454-459.

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2025) 15(2): 620-638 doi: 10.17714/gumusfenbil.1618127 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Güç sistemlerinde harmonik tespiti için gelişmiş meta sezgisel algoritmaların karşılaştırılması

Comparison of advanced metaheuristic algorithms for harmonic detection in power systems

Şule Nilhan OĞUZALP*[1], Sıtkı AKKAYA[2], Ulaş EMİNOĞLU[3]

[1]*Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik Bölümü, 58140, Sivas*

[2]*Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 58000, Sivas*

[3]*Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun*

• Geliş tarihi / *Received*: 13.01.2025 • Kabul tarihi / *Accepted*: 30.05.2025

Öz

Enerji sektöründe rekabetin artması ve kullanıcıların daha kaliteli enerji talep etmesi, elektrik şebekelerinde güç kalitesini öncelikli bir konu haline getirmiştir. Güç kalitesini etkileyen parametrelerden biri de harmoniklerdir. Harmonikler güç sistemlerinde; gerilim-akım dalga şekillerinin bozulması, rezonans olayları sonucunda aşırı akım ve gerilim yükselmesi, sayaçlarda yanlış ölçmeler, yalıtım hataları ve elektronik cihazların arızalanmasına, ek enerji kayıpları ve ısınmalar gibi birçok istenmeyen durumlara neden olabilir. Bu nedenle harmonikler son yıllarda üzerinde sıkça çalışılan bir araştırma alanı olmuştur. Bu çalışmada, son yıllarda geliştirilen AVOA (African Vulture Optimization Algorithm), ARO (Artificial Rabbit Optimization), SWO (Spider Wasp Optimization), MGO (Mountain Gazelle Optimization) ve AO (Aquila Optimization) algoritmaları ve En Küçük Kareler (Least Squares) yönteminin bir arada kullanıldığı hibrit yöntemler, harmoniklerin tespitinde kullanılarak sonuçları incelenmiştir. Analizlerde, literatürde sıkça kullanılan bir test sinyali üzerinde çalışılmıştır. Bu sinyalin harmonik genlikleri, En Küçük Kareler (Least Squares) yöntemiyle belirlenmiş, faz açıları ise ilgili meta sezgisel algoritmalar kullanılarak hibritleştirilmiş yöntemlerle (MGO-LS gibi) tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, incelenen beş yöntem arasında önerilen MGO-LS'nın tahminleri gürültüsüz ve Gaussian gürültülü koşullarda bile daha doğru ve güvenilir olduğunu göstermiştir. Bu durum, incelenen problem için MGO-LS algoritmasının harmonik tespiti için etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Dağ ceylanı optimizasyonu, En küçük kareler yöntemi, Güç kalitesi, Harmonik

Abstract

The increasing competition in the energy sector and the growing demand of users for higher quality energy have made power quality a priority issue in electrical networks. One of the parameters affecting power quality is harmonics. In power systems, harmonics can lead to various undesirable situations such as distortion of voltage and current waveforms, excessive current and voltage rise due to resonance phenomena, inaccurate measurements in meters, insulation failures, malfunctions in electronic devices, additional energy losses, and overheating. Therefore, harmonics have become a frequently studied research area in recent years. In this study, hybrid methods combining recently developed algorithms such as African Vulture Optimization Algorithm (AVOA), Artificial Rabbit Optimization (ARO), Spider Wasp Optimization (SWO), Mountain Gazelle Optimization (MGO), and Aquila Optimization (AO) with the Least Squares (LS) method were employed for harmonic detection, and their results were analyzed. In the analyses, a commonly used test signal from the literature was examined. The harmonic amplitudes of this signal were determined using the Least Squares (LS) method, while the phase angles were estimated using hybrid methods (e.g., MGO-LS) incorporating the relevant metaheuristic algorithms. The results obtained showed that among the five examined methods, the proposed MGO-LS provided more accurate and reliable estimations even under noiseless and Gaussian noisy conditions. This indicates that the MGO-LS algorithm is an effective method for harmonic detection for the problem under investigation.

Keywords: Mountain gazelle optimization, Least square method, Power quality, Harmonic

*Şule Nilhan OĞUZALP; soguzalp@cumhuriyet.edu.tr

1. Giriş
1. Introduction

Güç sistemlerinde meydana gelen bozulmaların doğru ve etkin bir şekilde tespiti, güvenilir enerji iletimi, sistem stabilitesinin korunması ve ekipman ömrünün uzatılması açısından hayati bir öneme sahiptir. Bu bozulmaların analizi, yalnızca sistem performansının izlenmesi ve olası arızaların erken tespiti için değil, aynı zamanda enerji kalitesinin sürdürülebilir bir şekilde sağlanması açısından da kritik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Özellikle genlik ve frekans gibi parametrelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, sistem verimliliğini artırmak ve kaliteli enerji sunumunu desteklemek açısından büyük önem taşımaktadır.

Analitik yöntemler, bozulma tespit süreçlerini iyileştirmek amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, modern güç sistemlerinin artan karmaşıklığı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, bu yöntemlerin doğruluğunu ve etkinliğini artırma gerekliliğini beraberinde getirmiştir. Geleneksel yöntemler arasında yaygın olarak kullanılan Fourier tabanlı teknikler, harmonik tespiti ve analizi için önemli araçlar sunmakla birlikte, yüksek harmonik derecelerinde çözünürlük ve doğruluk açısından sınırlamalar göstermektedir. Bu sınırlamalar, genlik ve faz parametrelerini daha yüksek doğrulukla tahmin edebilen, aynı zamanda düşük hesaplama maliyetleri sunan yeni yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir (Subjak & McQuilkin, 1990). Ayrıca harmanik bozulmalar voltaj ve akım dalga formlarını bozarak trafo kayıplarını %15 artırabilir ve elektronik cihazların ömrünü kısaltabilir. Harmonik kestiriminde geleneksel yöntemler sıklıkla Fourier dönüşümü, dalgacık dönüşümü ve istatistiksel analiz teknikleri gibi deterministik yaklaşımlara dayanmaktadır. Ancak bu yöntemler, özellikle doğrusal olmayan, zamana bağlı değişkenlik gösteren ve gürültü içeren karmaşık sistemlerde yeterli hassasiyet ve esneklik sağlayamamaktadır (Bollen & Hassan, 2011). Bu sınırlamaları aşmak amacıyla meta sezgisel (metaheuristic) algoritmalar tercih edilmektedir. Genetik algoritma (GA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), diferansiyel evrim (DE) ve yapay arı kolonisi (ABC) gibi meta sezgisel yöntemler, küresel optimizasyon yetenekleri sayesinde çoklu yerel minimum problemlerinde daha doğru ve kararlı çözümler sunabilmektedir (Yang, 2010). Meta sezgisel yaklaşımlar, ön bilgiye ihtiyaç duymadan geniş çözüm uzaylarında etkili arama yapabildikleri için, harmonik bileşenlerin doğru kestiriminde avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntemler, sinyaldeki ani değişimleri, zamansal varyasyonları ve harmoniklerin karmaşık yapısını daha iyi modelleyebilmektedir (Zhao et al., 2014). Bu bağlamda, harmonik kestiriminde meta sezgisel algoritmaların kullanımı, sistem doğruluğunu ve kestirim güvenilirliğini artırmak açısından literatürde yaygın bir şekilde benimsenmiştir. Meta sezgisel optimizasyon algoritmaları, klasik Fourier tabanlı yöntemlerin "picket–fence" etkisi ve spektral sızıntı, çözünürlük–hız takası, ön bilgi bağımlılığı ve gürültüye karşı zayıf dayanıklılık gibi temel kısıtlarını aşmak için nüfus temelli global arama stratejileri, esnek çok–kriterli maliyet fonksiyonları ve rastgelelik özellikleri sunar. Picket-fence etkisi, ayrık Fourier dönüşümü temelli analizlerde, sinyal frekanslarının analiz edilen frekans bileşenlerine tam olarak denk gelmemesi durumunda ortaya çıkan bir hata türüdür. Bu etki, özellikle analiz pencere uzunluğunun yetersiz olduğu durumlarda belirginleşir. Bu durum spektral genliklerin gerçek değerlere göre düşük tahmin edilmesine neden olur. (Oppenheim & Schafer, 2010). Bu nedenle, sinyaldeki harmonik bileşenlerin doğru ve hassas kestirimi için alternatif yöntemlerin, özellikle meta sezgisel algoritmaların kullanımı tercih edilmektedir. Çalışmamızda MGO–LS, kaçış–takip döngüsüyle yerel minimum tuzaklarından kaçarak hem gürültüsüz hem de gürültülü ortamlarda tutarlı genlik tahminleri (ε=0,0331 ve ε=8,3413) elde eder, hibrit LS döngüsü ile gerçek zamanlı uygulama gereksinimlerini karşılayacak hız–doğruluk dengesini sağlar ve çoklu simülasyonlarda ortalama ve standart sapma değerleriyle istatistikî güvenilir performans sergiler.

Son yıllarda, sinyal işleme teknikleri ile optimizasyon algoritmalarını birleştiren modern yöntemler, harmonik tespiti alanında daha esnek, hızlı ve etkili çözümler sunmaktadır. Harmoniklerin doğru bir şekilde tespiti, yalnızca enerji kalitesini korumakla sınırlı kalmayıp, hat kayıplarını azaltmak, ekipmanların ömrünü uzatmak ve işletme maliyetlerini düşürmek açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, doğrusal olmayan yüklerin artışıyla birlikte harmonik distorsiyonlar daha yaygın hale gelmiştir. Bu distorsiyonlar, voltaj ve akımın ideal sinüzoidal dalga formundan sapmasına yol açarak ekipman arızalarına, verimlilik kayıplarına ve artan işletme maliyetlerine neden olmaktadır (Apon vd., 2021). Harmonik tahmini, bu tür sorunları hafifletmek ve etkili telafi tekniklerini geliştirmek için temel bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Harmonik sinyallerin dinamik yapısı ve zamanla değişen koşullar, tahmin sürecini daha karmaşık hale getirmekte ve geleneksel yöntemlerin sınırlarını zorlamaktadır. Discrete Fourier Transform (DFT) ve Fast Fourier Transform (FFT) gibi yaygın analiz yöntemleri, harmonik tespiti için temel araçlar olsa da aliasing (yansıma), sızıntı ve picket fence gibi etkiler nedeniyle pratik uygulamalarda sınırlamalar gösterebilmektedir

(Bettayeb & Qidwai, 2003). Klasik hızlı Fourier dönüşümü (FFT), birçok bilimsel alanda yaygın olarak kullanılır; ancak FFT, zaman sınırlaması nedeniyle spektral sızıntı ve hesaplanan spektrumda ayrık frekans örneklemesinden kaynaklanan picket–fence etkisi gibi temel sorunlara sahiptir (Li& Fu,2008). Bu yaklaşımların sınırlamalarını aşmak amacıyla, Kalman filtresi ve benzeri model tabanlı sinyal işleme tekniklerinin meta sezgisel optimizasyon algoritmalarıyla bütünleştirildiği hibrit yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler genellikle şu adımları içerir:

(i) Sinyalin lineer durum–uzay modelinin tanımlanması,
(ii) Sistem ve ölçüm gürültüsünün kovaryans matrislerinin belirlenmesi,
(iii) Kalman filtresiyle ilk tahmin adımının yapılması ve
(iv) Elde edilen parametrelerin optimizasyon algoritmasıyla rafine edilmesi.

Bununla birlikte, gerçek dünya güç sistemlerinde model parametrelerinin (örneğin stokastik gürültü istatistikleri, sistem dinamikleri) kesin olarak bilinmemesi, hata kovaryanslarının yanlış kurulması sonucunda filtre performansının ciddi şekilde bozulmasına yol açar. Ayrıca hem filtreleme hem de nüfus temelli optimizasyon adımlarının ardışık çalıştırılması yüksek bellek ve işlemci kaynakları tüketimine neden olur; bu da özellikle dar zaman pencerelerinde gerçek zamanlı uygulamalarda gecikme ve hesaplama darboğazlarına sebep olmaktadır (Costa vd., 2007). Böylece, ön-bilgi gereksinimi ve artan hesaplama yükü, bu hibrit yöntemlerin pratikte sınırlı kabul edilmesine yol açmaktadır. Meta sezgisel optimizasyon yöntemleri, harmonik tespiti alanında klasik tekniklerin ötesine geçerek yüksek doğruluk ve işlem verimliliği sunan güçlü alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Örneğin Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Yapay Arı Kolonisi (ABC), karmaşık hata yüzeylerinde global en iyi çözüme yaklaşma potansiyeli taşırken, erken yakınsama ve yerel minimum tuzaklarına duyarlılık gibi kısıtlarla karşılaşabilmektedir (Shi & Eberhart, 1998). Bunun üzerine geliştirilen Afrika Akbaba Optimizasyon Algoritması (AVOA), Arşimet Optimizasyon Algoritması (AOA) ve Passif Congregation ile Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSOPC) gibi hibrit yaklaşımlar, popülasyon temelli arama stratejilerini farklı mekanizmalarla birleştirerek harmonik tahminindeki doğruluğu önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca, bu meta sezgisel algoritmaların En Küçük Kareler (Least Squares) yöntemiyle entegrasyonu, başlangıç tahminlerindeki sapmaları azaltarak hem çözüme ulaşma hızını artırmakta hem de hesaplama yükünü optimize etmektedir (Ali vd., 2023).

Sonuç olarak, güç sistemlerindeki harmoniklerin doğru tespiti, enerji kalitesinin artırılması ve sistem stabilitesinin korunması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma, farklı harmonik tahmin yöntemlerinin doğruluk ve etkinlik açısından değerlendirilmesini ve enerji kalitesine katkılarını ele almayı amaçlamaktadır.

2. *Literatür taraması ve temel yöntemler*
2. Literature review and basic methods

Harmonik sinyallerin genlik tahmini genellikle doğrusaldır ve geleneksel En Küçük Kareler (Least Squares, LS) yöntemi ile kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Ancak, faz tahmini, sinyalin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle daha karmaşık bir problem olarak karşımıza çıkar. Bu nedenle, literatürde birçok araştırmacı, harmonik bileşenlerin doğru ve hızlı bir şekilde tahmin edilmesine yönelik yeni algoritmalar geliştirmiştir. Bu çalışmaların temel amacı, yalnızca harmonik bileşenleri tespit etmekle sınırlı kalmayıp, tahmin doğruluğunu artırmak ve hesaplama süresini kısaltmaktır.

Önerilen algoritmalar arasında Genetik Algoritma (GA) tabanlı LS yöntemi (GA-LS) dikkat çekmektedir. (Bettayeb & Uvais, 2003), faz tahmini için GA, genlik tahmini için ise LS yöntemi kullanan bir hibrit algoritma geliştirmiştir. Bu yöntem, genlik tahmininde başarılı sonuçlar sunarken, faz tahmininde doğruluk açısından belirgin iyileştirmeler sağlamaktadır. Ancak, GA tabanlı algoritmalar, erken yakınsama eğilimi ve yerel minimumlara duyarlılık gibi sınırlamalara sahiptir, bu da güç sistemi harmoniklerinin tahmininde maksimum doğruluğa ulaşılmasını engelleyebilmektedir (Gaing, 2004).

Harmonik tahminindeki diğer bir yaklaşım, Bakteri Foraging Optimizasyonu (BFO) algoritmasıdır. Ray (2012), bu yöntemi Yinelemeli En Küçük Kareler (RLS) yöntemi ile birleştirerek RLS-BFO adlı bir model geliştirmiştir. Bu çalışmada, faz tahmini için Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Pasif Congregation (PSOPC), genlik tahmini için ise LS yöntemi kullanılmıştır. Bu hibrit yöntem, özellikle düşük hesaplama maliyetleri ile dikkat çekmektedir.

Diğer bir çalışmada, Biswas (2013), Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması ile LS yöntemini birleştirerek harmonik bileşenlerin fazını ve genliğini tahmin etmek için etkili bir çözüm sunmuştur. Bu algoritma, yüksek doğruluk sağlamasına rağmen, büyük boyutlu problemlerde hesaplama maliyeti açısından bazı kısıtlamalar taşımaktadır. Bu sorunu ele almak için Kabalci vd. (2018), Modifiye ABC (MABC) algoritmasını tanıtarak algoritmanın performansını önemli ölçüde artırmıştır.

Daha yakın zamanda, Haseb vd. (2023), Hibrit Ağırlıklı En Küçük Kareler Çok Yönlü Optimize Edici (WLS-MVO) yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem, özellikle faz ve genlik tahminindeki doğruluğu artırarak enerji kalitesini iyileştirme potansiyeli sunmaktadır. Benzer şekilde, Apon vd. (2021), Arşimet Optimizasyon Algoritması (AOA) tabanlı LS yöntemi (AOA-LS) ile faz tahmini konusunda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Her iki yöntemde, harmonik tahmininde yüksek doğruluk ve düşük hesaplama maliyetleri sağlayarak geleneksel yöntemlerin sınırlarını aşmaktadır.

Bu çalışmalar, harmonik tespiti ve tahmin süreçlerinde önemli ilerlemeler sağlamış olsa dahi mevcut yöntemlerin performansını daha da artırmak için ek araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle, değişen yük koşulları ve gürültülü ortamlar gibi zorlu senaryolarda daha dayanıklı ve verimli algoritmalar geliştirilmesi gerekmektedir.

Tahmin $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{w}_n$ koşulunda en iyi sonucu sağlamasına olanak tanır. Ancak $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{w}_n$ değerleri en iyi çözüm olmayabilir ve optimize edilmesi gerekebilir. Bu nedenle, bir sonraki iterasyonda $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{w}_n$, aşağıdaki J maliyet fonksiyonuna göre bir optimizasyon algoritması kullanılarak Denklem 8'deki gibi güncellenir.
Bu işlem nihai yakınsama koşuluna ulaşılana kadar tekrarlanır.

2.1. Dağ ceylanı optimizasyonu (MGO)
2.1.Mountain gazelle optimization (MGO)

Dağ ceylanlarının sosyal yaşamından ve hiyerarşik düzenlerinden esinlenerek geliştirilmiş bir meta sezgisel optimizasyon algoritmasıdır (Abdollahzadeh vd., 2022). Algoritma, ceylanların dört temel davranışını modellemektedir: bekar erkek sürüleri, doğum sürüleri, bölgesel bekar erkekler ve göç davranışı (Khodadadi, 2023).

Algoritmada, her bir ceylan, bu gruplardan birine atanarak çözüm alanını etkili bir şekilde keşfetmeyi ve sömürü dengesini sağlamayı hedefler. MGO, grup dinamiklerini ve bireysel etkileşimleri simüle ederek optimizasyon problemlerinde güçlü performans sergiler (Abbassi vd., 2023).

Bölgesel bekar erkekler: Yetişkin erkek ceylanlar en iyi küresel çözüm konumu X* etrafında bölgesel hakimiyet kurar (Ekinci & İzci, 2023). Aşağıda Denklem (1) ile matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$X_i^{t+1} = X^* - r_1 \cdot g\,(\,X^* - X_j^t\,) \tag{1}$$

Burada g arama yeteneğini artıran rastgele katsayı Denklem (2) ile verilmiştir.

$$g = g_{max} \exp\left(-\lambda \frac{t}{Tmax}\right) \tag{2}$$

Doğum sürüleri: Dişi ve yavru gruplarına yardım davranışı Denklem (3) ile modellenir (Sarangi & Mohapatra, 2023).

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \alpha\, r_2\,(X_k^t - X_i^t) \tag{3}$$

α genç erkek etki faktörü, X_k rastgele seçilmiş bireydir.

Bekar erkek sürüleri: güçsüz genç erkeklerin baskın yetişkinlerle rekabeti Denklem (4) ile verilmiştir. Burada β genç sürü etki faktörü ve r_3 rastgele skalerdir (Alomoush vd., 2024).

$$X_i^{t+1} = X_j^t + \beta r_3\,(X_j^t - X_i^t) \tag{4}$$

Yiyecek aramaya geçiş: Dağ ceylanları, otlamak ve yiyecek kaynakları bulmak amacıyla sürekli olarak uzun mesafeli yolculuklar yaparlar. Bu yolculuklar, ceylanların yüksek hızlı koşma ve atlama becerileri sayesinde

etkili bir şekilde gerçekleştirilir (Alomoush vd., 2024). Dağ ceylanlarının bu davranışı, optimizasyon algoritmasında geniş çaplı arama süreçlerini simgelemek için kullanılmıştır. Uzun mesafe göç ve besin aramaya ilişkin matematiksel model Denklem (5) te gösterilmiştir.

$$X_i^{t+1} = L + r_4\,(U - L) \tag{5}$$

Burada L, U problem sınırları r_4 uniform rastgele sayıdır.

Her iterasyonda bu 4 mekanizma uygulanıp yeni nesil oluşturulur ve en iyi çözümler korunur. Zayıf bireyler elenir.

3. Materyal ve metod
3. Material and method

Bu çalışmada, harmonik bileşenlerin genliklerinin doğru ve güvenilir biçimde tahmin edilmesi amacıyla, En Küçük Kareler (Least Squares – LS) yöntemi ile beş farklı meta sezgisel optimizasyon algoritması hibrit bir yapıda birleştirilmiştir. Kullanılan test sinyali, farklı genlik ve faz açılarına sahip temel bileşen ile çeşitli harmonik bileşenlerin sinüs bileşiminden oluşmakta ve hem gürültüsüz hem de farklı sinyal-gürültü oranlarına (SNR) sahip ortamlarda değerlendirilmiştir. LS yöntemi, sinyaldeki sabit frekans bileşenleri için genlik tahmini yapılmasında temel teknik olarak kullanılmış; ancak doğrudan uygulandığında yerel minimumlara takılma riskini azaltmak amacıyla, çözüm uzayının küresel olarak taranmasını sağlayan meta sezgisel algoritmalarla desteklenmiştir. Bu bağlamda, Afrika Akbaba Optimizasyon Algoritması (AVOA) (Abdollahzade vd., 2021), Arşimet Optimizasyon Algoritması (ARO) (Wang vd., 2022), Deniz Martısı Optimizasyonu (SWO) (Faramarzi vd., 2020), Dağ Ceylanı Optimizasyonu (MGO) (Abdollahzade vd., 2021) ve Aquila Optimizasyonu (AO) (Abuailgah vd., 2021) olmak üzere beş farklı yöntem kullanılmıştır. Her bir algoritma ile birlikte 100 iterasyon ve 50 bireyden oluşan popülasyon parametreleriyle çoklu simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve her bir deney, 50 tekrar üzerinden Performans metriği olarak normalize edilmiş ortalama karesel hata (%ε) ile değerlendirilmiştir. Denklem 14 'de % ε, tahmin hatasının gerçek sinyal enerjisine oranını % cinsinden verir. Böylece yöntemlerin hem tahmin doğruluğu hem de gürültüye karşı dayanıklılığı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu yapı hem teorik hem de pratik düzlemde güçlü bir tahmin modeli sunmakta ve özellikle LS yönteminin doğrusal yapı avantajını, meta sezgisel algoritmaların küresel çözüm arama yeteneğiyle birleştirerek etkin bir sistem oluşturmaktadır.

Bu bölümde, harmonik parametrelerin tahmin süreci, doğrusal olmayan optimizasyon algoritması ve doğrusal LS (Least Squares) yöntemi kullanılarak ele alınmaktadır. Elektrik sinyalinin temel tanımı Denklem (6)'de verilmiştir:

$$Z(t) = \sum_{n=1}^{N} A_n \sin(w_n t + \phi_n) + v(t) \tag{6}$$

Bu denklemde, $n = 1, 2, \ldots, N$ harmonik sırasını ifade ederken, A_n, ϕ_n ve w_nsırasıyla n'inci harmoniğin genliği, faz açısı ve açısal frekansıdır. $w_n = 2\pi f_n$ ve $v(t)$, ölçülen sinyale eklenen gürültüyü temsil eder. Her bir harmoniğin A_n, ϕ_n ve w_n değerlerini tahmin etmek için Denklem (7)'de verilmiştir.

$$\hat{Z}(t) = \sum_{n=1}^{N} \hat{A}_n \sin\left(\hat{w}_n t + \hat{\phi}_n\right) \tag{7}$$

Burada $\hat{A}_n$, $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{w}_n$ sırasıyla A_n, ϕ_n ve w_n tahminlerini ifade etmektedir. Bu durum göz önüne alınarak ana sinyal Denklem (8) ile ifade edilir.

$$Z(t) = \hat{Z}(t) + r(t) = \sum_{n=1}^{N} \hat{A}_n \sin\left(\hat{w}_n t + \hat{\phi}_n\right) + r(t) \tag{8}$$

Burada $r(t)$, $Z(t)$ ile $\hat{Z}(t)$ arasındaki farkı ifade eden tahminleri temsil etmektedir. Tahminin amacı N'in belirlendiği koşullar $r(t)$ değerini en küçük yapacak en iyi $\hat{A}_n$, $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{w}_n$ değerlerini bulmaktır.

Modeldeki harmoniklerin fazları doğrusal olmayan ve [0, 2π) aralığında sınırlı olduğundan, ϕ_n ve w_n değerlerini tahmin etmek için yinelenmeli MGO optimizasyon algoritması kullanılmaktadır. Her iterasyonda

fazlar ve frekanslar tahmin edildikten sonra, genlik $\widehat{\mathrm{A}}_{\mathrm{n}}$, standart LS yöntemi ile elde edilir. $\mathrm{Z(t)}$ sinyali K örnekle örneklendirildiğinde, ayrık doğrusal model Denklem (9) ve (10) ile temsil edilir.

$$\mathrm{Z(k)} = \mathrm{H(k)} \cdot \mathrm{A} + \mathrm{v(k)},\ \mathrm{k} = 1, 2, \ldots, \mathrm{K} \tag{9}$$

Aşağıdaki Tablo 1 de MGO algoritmasının başlangıç parametre değerleri verilmiştir.

Tablo 1. MGO algoritmasının başlangıç parametreleri
Tablo 1. *Initial parameters of the MGO algorithm*

Parametre	Açıklama	Önerilen Başlangıç Değeri
Popülasyon Boyutu	Aynı anda evrimleşen birey sayısı	50
Maksimum İterasyon	Algoritmanın çalışacağı jenerasyon sayısı	100
Keşif Katsayısı Başlangıç	Keşif yeteneğinin başlangıç değeri	2.0
Azalan Faktör λ	g'nin iterasyonla azalma hızını kontrol eder	0.05
Doğum Sürü Etki Katsayısı α	Dişi–yavru grubundaki çekim gücü	0.5
Bekar Sürü Etki Katsayısı β	Genç erkeklerin baskınlarla rekabet şiddeti	0.5
Rastgele Skalerler r1,r2,r3,r4	Her adımda üretilen uniform rastgele sayı	Üretildiği gibi (0–1 arası)
Çözüm Aralığı (Lb , Ub)	Aranan değişkenlerin alt ve üst sınırları	[0,2π]

$$\mathrm{H(k)} = \begin{bmatrix} \sin(\mathrm{w_1 t_1} + \phi_1) & \ldots & \sin(\mathrm{w}_N \mathrm{t_1} + \phi_{\mathrm{N}}) \\ \sin(\mathrm{w_1 t_2} + \phi_1) & \ldots & \sin(\mathrm{w_N t_2} + \phi_{\mathrm{N}}) \\ & \vdots & \\ \sin(\mathrm{w_1 t_k} + \phi_1) & \ldots & \sin(\mathrm{w_N t_k} + \phi_{\mathrm{N}}) \\ & \vdots & \\ \sin(\mathrm{w_1 t_K} + \phi_1) & \ldots & \sin(\mathrm{w_N t_K} + \phi_{\mathrm{N}}) \end{bmatrix} \tag{10}$$

Burada $\mathrm{Z(k)}$, eklenen gürültü $\mathrm{v(k)}$ ile ölçülen değerin k. örneğidir; $\mathrm{A} = \left[\mathrm{A_1}, \mathrm{A_2}, \ldots, \mathrm{A_N}\right]^{\mathrm{T}}$ tahmin edilmesi gereken genlik vektörüdür; $\mathrm{H(k)}$, sistem yapısı matrisidir. Daha önce belirtildiği gibi, amaç $\mathrm{Z(k)}$ ile $\hat{\mathrm{Z}}(\mathrm{k}) = \widehat{\mathrm{H}}(k)\widehat{\mathrm{A}}$ arasındaki farkı en aza indiren en iyi $\widehat{\mathrm{A}}_{\mathrm{n}}$, $\widehat{\phi}_{\mathrm{n}}$ ve $\widehat{\mathrm{w}}_{\mathrm{n}}$ değerini bulmaktır. $\widehat{\phi}_{\mathrm{n}}$ ve $\widehat{\mathrm{w}}_{\mathrm{n}}$ değerleri belirli bir optimizasyon algoritması kullanılarak hesaplandıktan sonra $\widehat{\mathrm{H}}(k)$ bu değerlere bağlı kalarak hesaplanır. $\widehat{\mathrm{H}}(k)$ 'nın tam sıra bit matris olduğu varsayıldığında $\widehat{\mathrm{A}}$'nın tahmini için standart LS algoritması Denklem (11) olarak güncellenir.

$$\widehat{\mathrm{A}} = \left[\widehat{\mathrm{H}}^{\mathrm{T}}(\mathrm{k}) \cdot \widehat{\mathrm{H}}(\mathrm{k})\right]^{-1} \widehat{\mathrm{H}}^{\mathrm{T}}(\mathrm{k})\mathrm{Z(k)} \tag{11}$$

Bu sinyalin tahmini Denklem (12) ile gerçekleştirilir.

$$\hat{\mathrm{Z}}(\mathrm{k}) = \widehat{\mathrm{H}}(\mathrm{k})\widehat{\mathrm{A}} \tag{12}$$

$$\mathrm{J} = \sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{K}} \left(\mathrm{Z(k)} - \hat{\mathrm{Z}}(\mathrm{k})\right)^2 \tag{13}$$

LS yöntemi, sinyali oluşturan frekans bileşenlerinin genliklerini tahmin etmek için temel araç olarak kullanılmıştır. Denklemler yardımıyla, hedef sinyal ile tahmini sinyal arasındaki hata fonksiyonu minimuma indirgenmiş ve bu işlem lineer cebirsel çözümle gerçekleştirilmiştir. Ancak, LS yöntemi başlangıç parametrelerine ve hatalı frekans tahminlerine karşı hassas olduğundan, hata yüzeyinde küresel minimumu bulmak için meta sezgisel algoritmalarla desteklenmiştir. Belirtilen beş optimizasyon algoritması, LS ile hibrit şekilde kullanılmıştır. Her biri, harmonik sinyaldeki genlik vektörünü optimize ederek toplam hatayı minimize etmeye çalışır. Bu çalışmada kullanılan En Küçük Kareler (Least Squares) yönteminin harmonik tespit sürecinde başlangıç hatalarını hızla gidererek global en iyi çözüme yönelmeyi sağlar. Burada;

-Daha Düşük Başlangıç Hatası: LS ön tahminindeki daha isabetli genlik değerleri, MGO'nun arama uzayını erkenden daraltarak erken yakınsama sağlar.

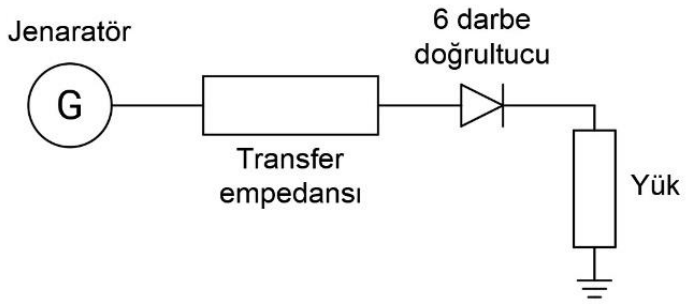
-Kaçış-Takip Dengesi: MGO'nun eksplorasyon ve eksploitasyon evrelerindeki adaptif geçiş yeteneği, gürültü kaynaklı yerel maksimum tuzaklarından daha etkin biçimde kurtulur.
-Hızlı ve İstikrarlı Yakınsama: Ortalama olarak ilk 50 iterasyonda ε değerini %75 oranında düşürerek, gerçek zamanlı uygulamalarda kritik öneme sahip hızlı güncellemeyi destekler.
-Gürültü Dayanıklılığı: 0 dB koşulunda dahi diğer yöntemlere kıyasla yaklaşık %20–%35 daha düşük normalize hata ile çalışarak, sinyal gürültü oranı azaldığında bile yüksek performansını korur.

Karşılaştırma amacıyla, Tablo 2'de kullanılanla aynı test sinyalini üretmek için bir simülasyon modülü kullanılmaktadır. Test sinyali, Z_0 (t) olarak adlandırılır ve bu, basit güç sistemindeki yük barasının terminalinden örneklenen bozulmuş bir voltaj dalga formudur. Test sinyalinin harmoniklerinin frekansları ve fazları Tablo 1'de listelenmiştir (Z.Lu vd., 2008).

Tablo 2. Test sinyalinin harmonik içeriği
***Tablo 2**. Harmonic content of the test signal*

Harmonik düzen	Genlik (p.u)	Faz (derece)
Temel (50 Hz)	0.95	-2.02
5. (250 Hz)	0.09	82.1
7. (350 Hz)	0.043	7.9
11. (550 Hz)	0.03	-147.1
13. (650 Hz)	0.033	162.6

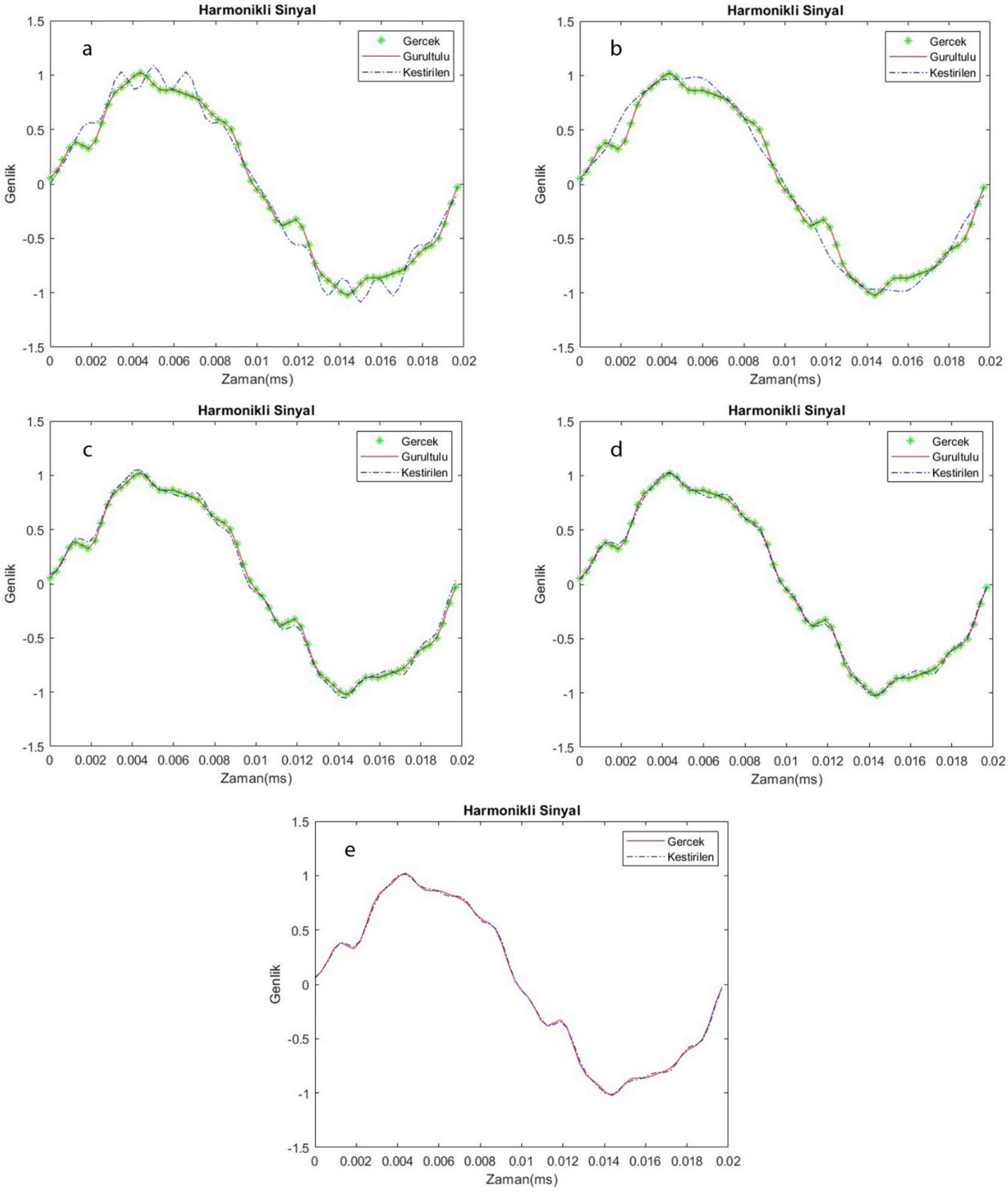
Test sinyali, 50 Hz' lik bir voltaj dalga formundan döngü başına 64 nokta örneklenerek alınmıştır. Algoritma hem gürültüsüz hem de gürültülü durumlarda çalıştırılmıştır. Simülasyon Gauss gürültüsü kullanılmıştır. Her bir gürültü türü için sinyal-gürültü oranları (SNR) sırasıyla 40,20, 10 ve ayrıca gürültüsüz olarak seçilmiştir. Bu nedenle, bu gürültüler orijinal sinyale eklenerek dört farklı sinyal üretilmiştir. Orijinal test sinyali dahil olmak üzere, her bir gürültülü durumda dört sinyal algoritma tarafından ayrı ayrı işlenmiştir. Bu makaledeki simülasyon çalışmasında, kullanılan algoritmalar için popülasyon boyutu ve maksimum jenerasyon sayısı sırasıyla 50 ve 100 olarak seçilmiştir. Algoritmaların durdurma kriteri, maksimum jenerasyon sayısına ulaşılmasıdır. Şekil 1 yük barasında tam dalga altı darbeli köprü doğrultucu içeren iki baralı üç fazlı basit bir güç sistemini tanımlar.



Şekil 1. Basit güç sistemi: yükü besleyen altı darbeli tam dalga köprü doğrultucuya sahip iki veri yolu mimarisi
***Figure 1.** Simple power system: a two-bus architecture with six-pulse full wave bridge rectifier supplying the load*

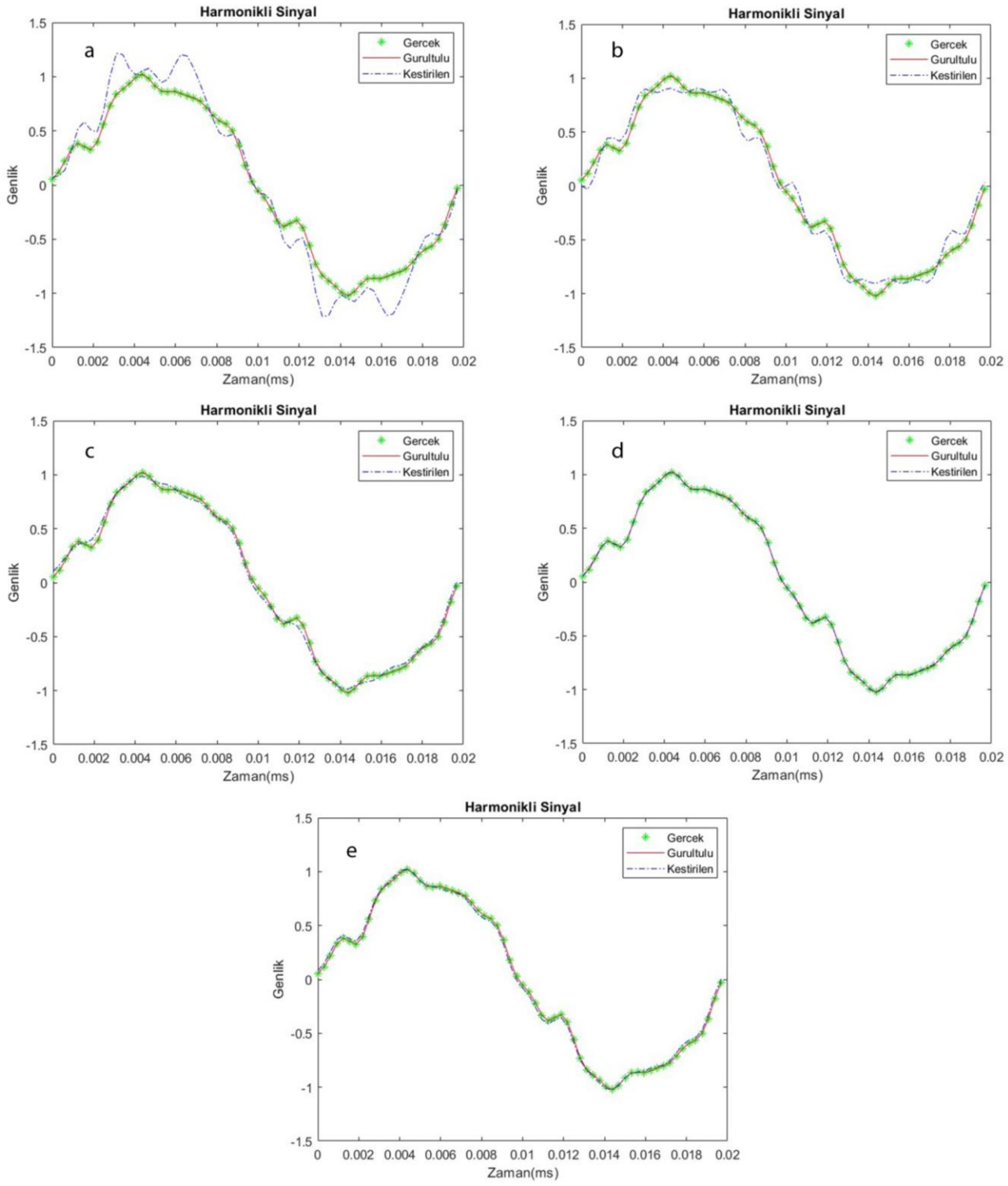
4. Simulasyon sonuçları
4. Simulation results

Bu simülasyonda, test sinyalinde beş harmonik dikkate alınmıştır. Sistem matrisi H (k), denklem 10' da verilmiştir. Bu durumda tahmin edilmesi gereken parametreler temel frekans, 5., 7., 11. ve 13. harmonikler için beş faz ve beş genlik olmak üzere on adettir. Tahmin edilen harmoniklerden yeniden yapılandırılan dalga formu, orijinal test sinyali ile karşılaştırılmış ve hibrit yöntemlere ait tüm sonuçlar Şekil 2-3-4-5-6'da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, yeniden yapılandırılmış sinyal, sinyal-gürültü oranının (SNR) yüksek olduğu durumda orijinal sinyale neredeyse aynıdır. Gürültü koşulları kötüleştikçe, tahmin sonucundaki hatalar artmasına rağmen sinyal yine de tatmin edici bir doğruluğu korur.

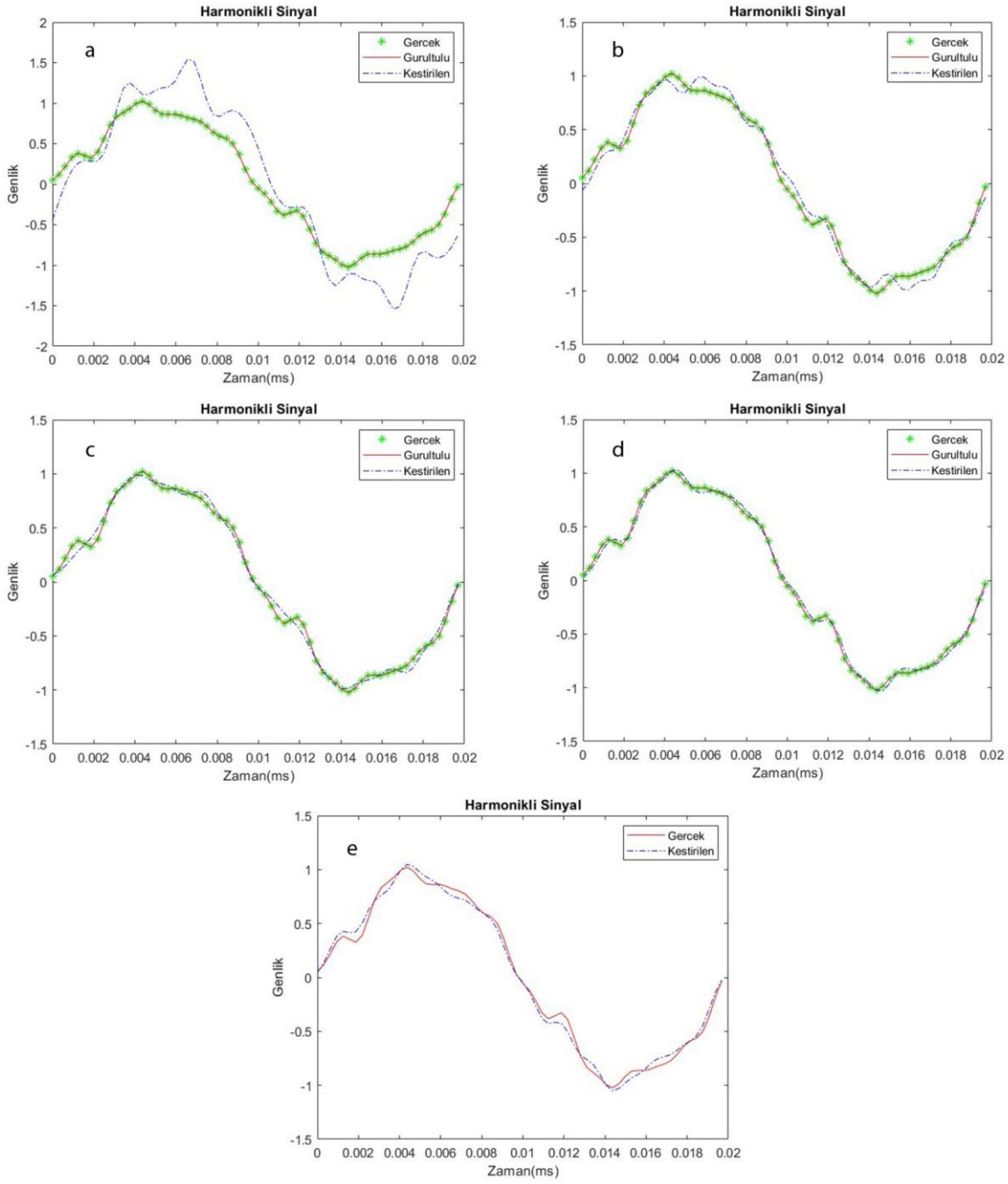


Şekil 2. Test sinyali için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (AO-LS) a) 0dB'de AO-LS b) 10dB'de AO-LS c) 20dB'de AO-LS d) 40dB'de AO-LS d) Gürültüsüz ortamda AO-LS

Figure 2. *Actual and estimated waveforms for the test signal a) AO-LS in 0dB b) AO-LS in 10dB c) AO-LS in 20Db d) AO-LS in 40dB d) AO-LS in noiseless environment*

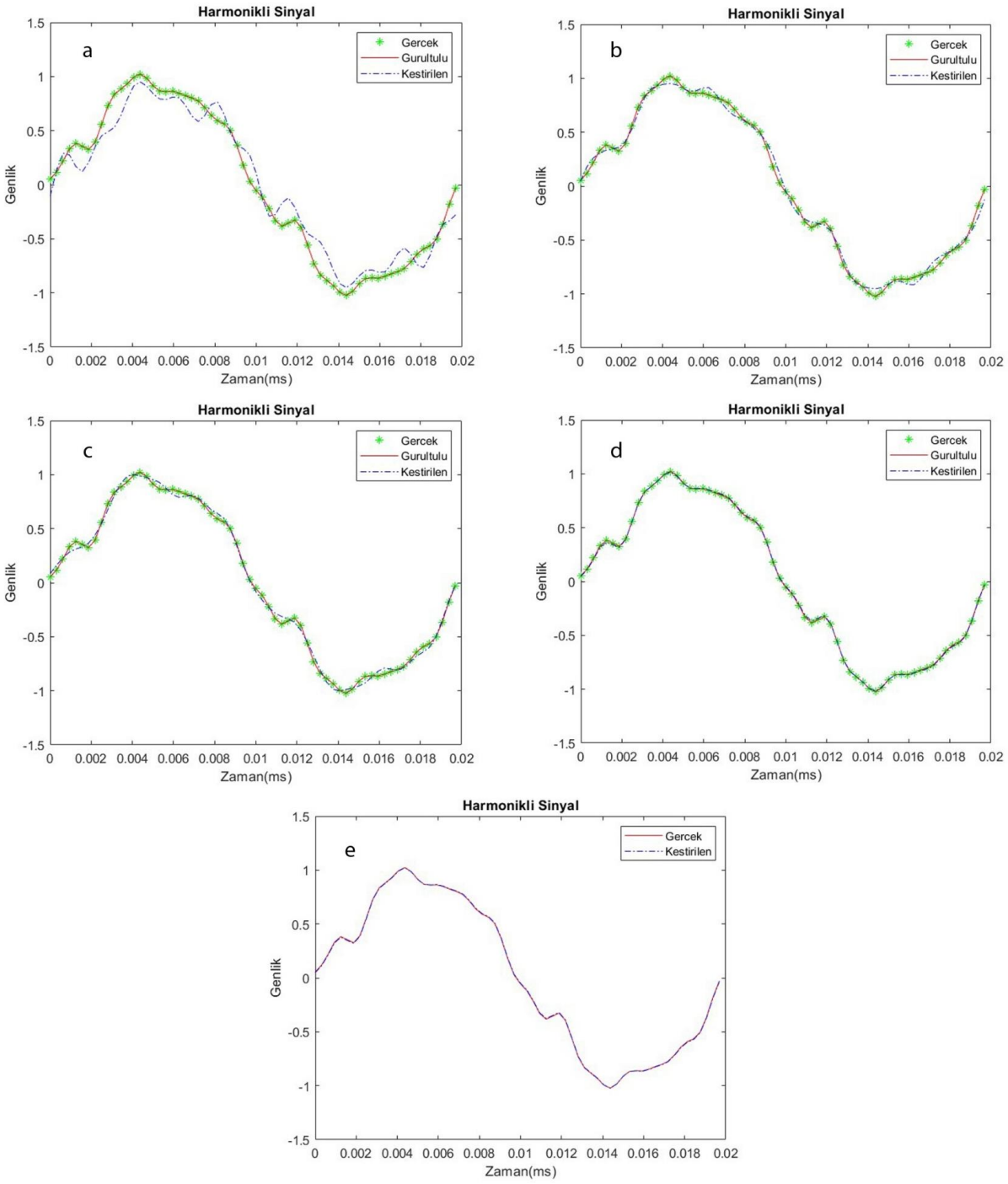


Şekil 3. Test sinyali için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (AVOA-LS) a) 0dB'de (AVOA-LS) b) 10dB'de (AVOA-LS) c) 20dB'de (AVOA-LS) d) 40dB'de (AVOA-LS) d) Gürültüsüz ortamda (AVOA-LS)
Figure 3. *Actual and estimated waveforms for the test signal a)* (AVOA-LS) *in 0dB b)* (AVOA-LS) *in 10dB c)* (AVOA-LS) *in 20dB d)* (AVOA-LS) *in 40dB d)* (AVOA-LS) *in noiseless environment*



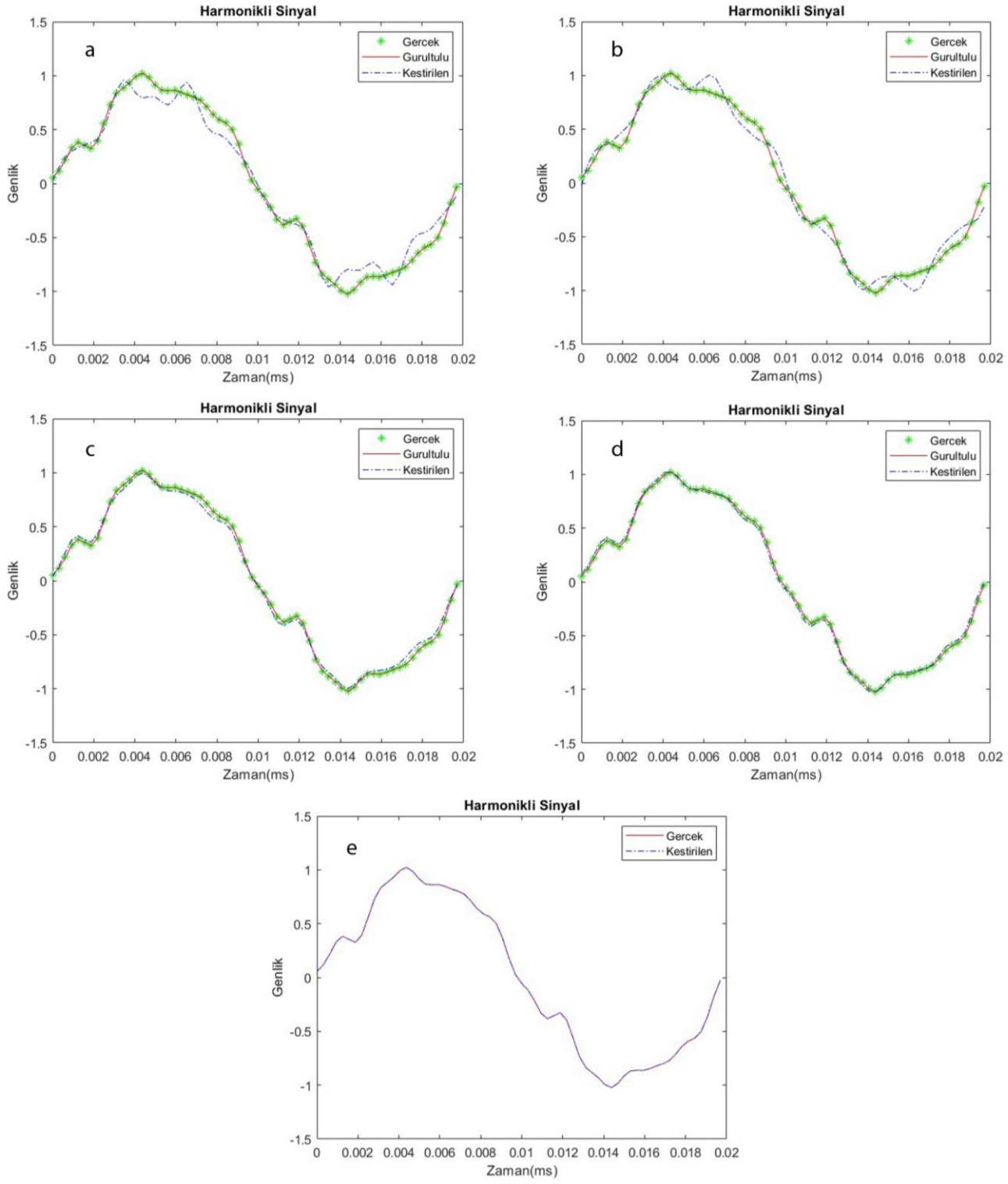
Şekil 4. Test sinyali için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (SWO-LS) a) 0dB'de SWO-LS b) 10dB'de SWO-LS c) 20dB'de SWO-LS d) 40dB'de SWO-LS d) Gürültüsüz ortamda SWO-LS

Figure 4. *Actual and estimated waveforms for the test signal a) SWO-LS in 0dB b) SWO-LS in 10dB c) SWO-LS in 20dB d) SWO-LS in 40dB d) SWO-LS in noiseless environment*



Şekil 5. Test sinyali için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (ARO-LS) a) 0dB'de ARO-LS b) 10dB'de ARO-LS c) 20dB'de ARO-LS d) 40dB'de ARO-LS d) Gürültüsüz ortamda ARO-LS

Figure 5. *Actual and estimated waveforms for the test signal a) ARO-LS in 0dB b) ARO-LS in 10dB c) ARO-LS in 20dB d) ARO-LS in 40dB d) ARO-LS in noiseless environment*



Şekil 6. Test sinyali için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (MGO-LS) a) 0dB'de (MGO-LS) b) 10dB'de (MGO-LS) c) 20dB'de (MGO-LS) d) 40dB'de (MGO-LS) d) Gürültüsüz ortamda (MGO-LS)
Figure 6. *Actual and estimated waveforms for the test signal a) (MGO-LS) in 0dB b) (MGO-LS) in 10dB c) (MGO-LS) in 20dB d) (MGO-LS) in 40dB d) (MGO-LS) in noiseless environment*

Simülasyon çalışmalarında, normalize edilmiş ortalama karesel hata (ε) Denklem (14) ile hesaplanmıştır:

$$\epsilon = \frac{\sum_{k=1}^{K}(Z(k)-\hat{Z}(k))^2}{\sum_{k=1}^{K} Z(k)^2} \times 100 \qquad (14)$$

Önerilen algoritmaların ilgili tahmin sonuçları denklem 14'te hesaplanan sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, MGO-LS algoritmasıyla yeniden yapılandırılmış sinyal, sinyal-gürültü oranının (SNR) yüksek olduğu yani gürültü oranının düşük olduğu durumda orijinal sinyalle yüksek uyum içinde elde edildiği gözlenmektedir. Gürültü koşulları kötüleştikçe yani SNR azaldıkça, tahmin sonucundaki tahmin hataları artmasına rağmen diğer kestirim yöntemleriyle kıyaslandığında en iyi kestirilen sinyal olarak umut vadedici bir sonuç verdiği gözlenmiştir.

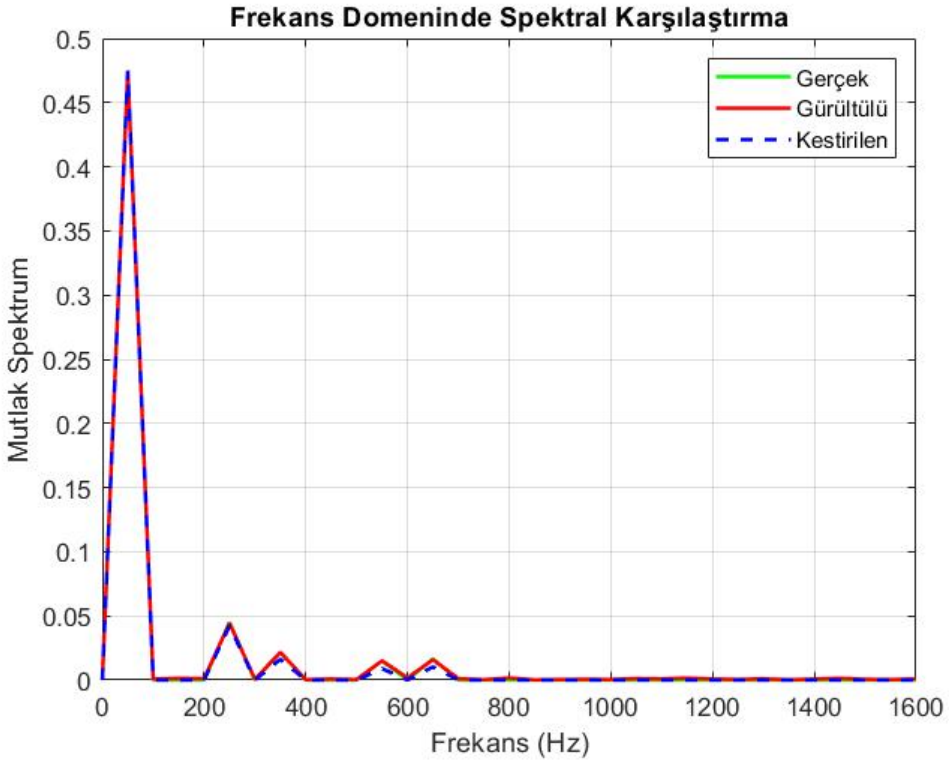
Tablo 3. Test sinyalindeki harmoniklerin tahmini için kullanılan algoritma hatalarının karşılaştırılması
Table 3. *Comparison of algorithm errors used for estimating harmonics in the test signal.*

		% ϵ				
Test Ortamı	**SNR**	**MGO-LS**	**AVOA-LS**	**SWO-LS**	**ARO-LS**	**AO-LS**
	0dB	**8.3413**	18.7593	14.6448	10.5234	9.6438
Beyaz Gaussian	10 dB	**1.3551**	1.9084	1.7824	4.3213	1.6828
Gürültülü Ortam	20 dB	**0.2892**	0.2856	0.5690	2,6807	0.2404
	40 dB	**0.0417**	0.0854	0.4404	3.4095	0.0734
Gürültüsüz Ortam	-	**0.0331**	0.0439	0.4495	3.2362	0.0808

Tablo-3'te görüldüğü üzere en iyi tahmini veren algoritma MGO-LS'nin farklı parametrelerdeki karşılaştırmalı grafikleri aşağıdaki gibidir.

4.1. Frekans domeninde spektral karşılaştırma
4.1. Spectral comparison in frequency domain

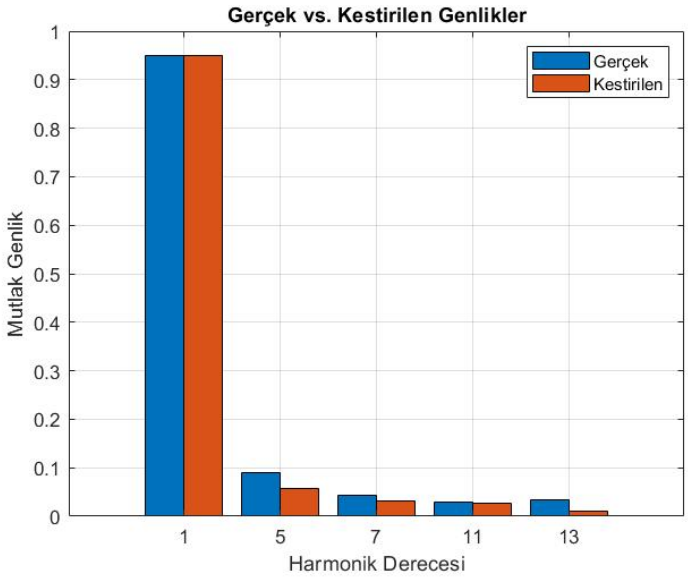
Aşağıdaki Şekil 7'de kestirilen sinyalin frekans domeninde gerçek sinyale oldukça yakın bir performans sergilediğini göstermektedir. Özellikle temel frekans bileşenlerinde (200-600 Hz aralığı) kestirilen genliklerin gürültüsüz sinyal ile neredeyse örtüştüğü görülmektedir. Gürültülü sinyale kıyasla, kestirim algoritmasının yüksek frekans bileşenlerinde bile (1200-1600 Hz) gürültüyü etkili bir şekilde filtrelediği ve sinyalin orijinal yapısını koruduğu açıkça gözlemlenmektedir. Bu sonuç, modelin spektral bozulmaları başarıyla düzeltebildiğinin bir göstergesidir.



Şekil 7 MGO-LS yöntemi için frekans domeninde spektral karşılaştırması
Figure 7. *Spectral comparison in frequency domain for MGO-LS method.*

4.2. Gerçek ve kestirilen genlikler
4.2. Actual vs. predicted amplitudes

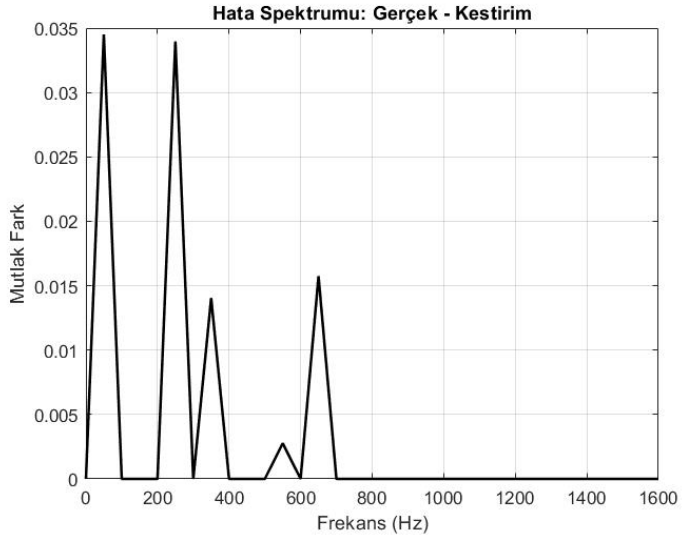
Şekil 8'de Harmonik genliklerin karşılaştırılması, kestirim modelinin temel harmoniklerde (5. ve 7.) mükemmele yakın bir doğruluk sağladığını ortaya koymaktadır. Yüksek harmoniklerde (11.ve 13.) gözlemlenen küçük sapmalara rağmen, genliklerin genel eğiliminin doğru bir şekilde yakalandığı görülmektedir. Bu durum, modelin harmonik içeriği büyük ölçüde koruyabildiğini ve sinyalin enerji dağılımını başarıyla temsil ettiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 8 MGO-LS yöntemi için gerçek ve kestirilen genlikler için karşılaştırma grafiği
Figure 8. *Comparison graph for real and estimated amplitudes for MGO-LS method.*

4.3. Hata spektrumu: gerçek ve kestirim arası fark
4.3. Error spectrum: difference of actual and predicted values

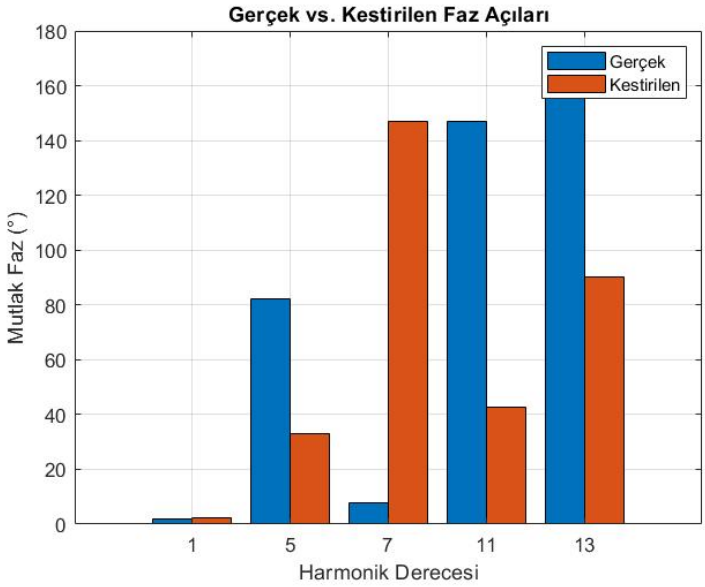
Şekil 9'da Hata spektrumu analizi, kestirilen sinyal ile gerçek sinyal arasındaki farkın genel olarak düşük seviyelerde kaldığını göstermektedir. Özellikle düşük ve orta frekans bölgelerinde (200-1000 Hz) hataların minimum düzeyde olduğu görülmekte olup, bu da modelin bu bantlarda son derece güvenilir olduğunu desteklemektedir. Yüksek frekanslardaki küçük sapmalar ise, modelin gürültüyü bastırma konusundaki dengeli yaklaşımını yansıtmaktadır.



Şekil 9 MGO-LS yöntemi için gerçek - kestirim hata spektrumu
Figure 9. *Actual - prediction error spectrum for MGO-LS method*

4.4 Gerçek vs. kestirilen faz açıları
4.4 Actual vs. predicted phase angles

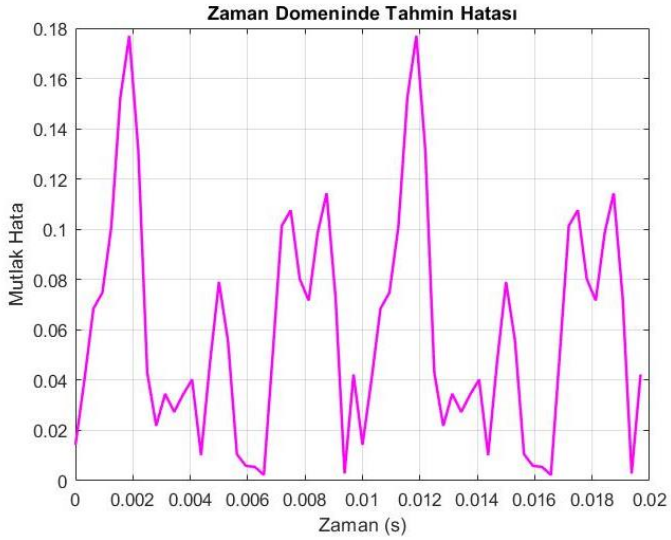
Şekil 10'da Faz açılarının karşılaştırılması, modelin harmonik fazları büyük bir doğrulukla tahmin edebildiğini göstermektedir. Temel harmoniklerde gerçek ve kestirilen fazların neredeyse tamamen örtüştüğü gözlemlenmektedir. Yüksek harmoniklerdeki sapmalara rağmen, faz kestirimindeki genel başarı, modelin sinyalin zaman-faz ilişkisini doğru bir şekilde koruyabildiğinin güçlü bir kanıtıdır.



Şekil 10 MGO-LS yöntemi için gerçek ve kestirilen faz açıları için karşılaştırma grafiği
Figure 10 Comparison graph for actual and estimated phase angles for MGO-LS method

4.5. Zaman domeninde tahmin hatası
4.5. Forecast error in time domain

Şekil 11'de Zaman domenindeki hata analizi, kestirilen sinyalin gerçek sinyale genel olarak çok yakın olduğunu ortaya koymaktadır. Hata değerlerinin büyük ölçüde sıfıra yakın seyretmesi, modelin dinamik davranışları başarıyla taklit edebildiğini göstermektedir. 0.002 ve 0.006 sn gibi zaman aralıklarındaki küçük sapmalar, sinyalin geçici özelliklerinin kestirimindeki zorlukları yansıtsa da genel performansın oldukça yüksek olduğu açıktır.



Şekil 11 MGO-LS yöntemi için zaman domeninde tahmin hatası
Figure 11. *Forecast error in time domain for MGO-LS method.*

5.Sonuçlar
5.Conclusions

Bu çalışmada, harmoniklerin tespitinde kullanılan son yıllarda geliştirilen optimizasyon yöntemlerinin en hızlı şekilde en doğru genlik ve faz açısı değerlerini bulan kestirim yöntemini verecek bir çalışma karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. AVOA (African Vulture Optimization Algorithm), ARO (Artificial Rabbit Optimization), SWO (Spider Wasp Optimization), MGO (Mountain Gazelle Optimization) ve AO (Aquila Optimization) algoritmaları incelenmiştir. Algoritmalara ait sonuçlardan, aynı popülasyon jenerasyonu kullanıldığında, MGO-LS algoritması, harmonik tahminindeki hataları azaltma konusunda diğer algoritmalar ile karşılaştırıldığında en iyi tahminle önemli bir iyileşme sağladığı görülmüştür. Gürültü (SNR) yüksek olduğunda, özellikle gürültü olmadığındaki koşullarda dahi en iyi tahmini sağlamıştır. Gürültüsüz durumda en kısa sürede tahmin yapan algoritma ise 0.0062 sn ile SWO-LS algoritması olmuştur. Deneysel bulgular, MGO-LS algoritmasının özellikle gürültülü (0 dB) koşullarda diğer hibrit yöntemlere kıyasla belirgin bir üstünlük sergilediğini göstermektedir. Deneysel bulgular, MGO-LS'nin hem gürültüsüz hem de 0 dB SNR (yüksek gürültü) koşullarında en düşük ε değerini koruduğunu göstermiştir. Gürültüsüz ortamda ε = 0,0331 ile en düşük hatayı veren MGO-LS, 0 dB'de ε = 8,3413 değerine ulaşmıştır. Aynı koşulda AVOA-LS'in ε değeri 18,7593, SWO-LS'in 14,6448, ARO-LS'in 10,5234 ve AO-LS'in 9,6438 olarak ölçülmüştür. Buna göre MGO-LS, AVOA-LS'e kıyasla %55,5, SWO-LS'e göre %43,0, ARO-LS'e göre %20.8 ve AO-LS'e göre %13.5 daha düşük normalize edilmiş hata (ε) sunmuştur. Bu başarı, MGO'nun adaptif "kaçış–takip" mekanizmasıyla erken iterasyonlarda hatayı hızla azaltmasına ve LS ön tahmininin isabetli başlangıç değerleriyle arama uzayını etkin biçimde daraltmasına bağlanabilir. Ayrıca MGO-LS, ilk 50 iterasyonda ε değerini yaklaşık %75 oranında düşürerek gerçek zamanlı harmonik analizi gerektiren uygulamalarda gerekli hız-doğruluk dengesini sağlamaktadır.

Şekil 2–6'daki gerçek vs. tahmini dalga formları üzerinden, özellikle düşük SNR'de MGO-LS'nin yeniden yapılandırma başarısı ortaya konmuştur. Ayrıca burada hızlı yakınsama performansı gösterdiği de grafiksel sonuç ile tespit edilmiştir. Çalışmada önerilen MGO-LS yöntemi hem gürültüsüz hem de düşük sinyal-gürültü oranına sahip ortamlarda yüksek doğrulukla harmonik genlik tahmini yapabilmesi ve hızlı yakınsama özelliği sayesinde, gerçek zamanlı güç sistemlerinde harmonik izleme uygulamaları için uygun bir çözüm sunmaktadır. Ortalama hesaplama süresinin 0,0068 saniye gibi düşük bir seviyede olması, yöntemin özellikle anlık analiz ve sürekli izleme gerektiren enerji kalite izleme sistemlerinde etkin bir biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. Hatayı en iyi minimize eden yöntemin MGO-LS yöntemi olduğu ortaya konmuştur.

Yapılan analizler, kullanılan kestirim modelinin genel olarak son derece başarılı olduğunu göstermektedir. Model hem frekans hem de zaman domeninde sinyalin temel özelliklerini büyük bir doğrulukla koruyabilmekte, gürültüyü etkili bir şekilde filtreleyerek sinyalin orijinal yapısını ortaya çıkarabilmektedir. Harmonik genlik ve faz kestirimlerindeki yüksek doğruluk, modelin sinyal işleme uygulamalarında güvenilir bir araç olarak kullanılabileceğini desteklemektedir. Elde edilen sonuçlar, modelin pratik uygulamalarda başarıyla kullanılabileceğine dair güçlü kanıtlar sunmaktadır.

Teşekkür
Acknowledgement

Yazarlar, meta sezgisel optimizasyon yöntemleri konusunda değerli bilgilerini paylaşan Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Sibel ARSLAN'a ve makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılarından dolayı editör ve hakemlere teşekkür eder.

Yazar katkısı
Author contribution

Şule Nilhan OĞUZALP; Kaynaklar, araştırma, yöntemlerin belirlenmesi, algoritmaların oluşturulması, analiz edilmesi, sonuçlandırılması, yorumlanması, Yazma/orijinal taslak. Sıtkı AKKAYA: Araştırma konusunun belirlenmesi, yorumların değerlendirilmesi, yazım kontrolü. Ulaş EMİNOĞLU: Biçimsel analiz, yorumların değerlendirilmesi, yazım kontrolü.

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

Abbassi, R., Saidi, S., Urooj, S., Alhasnawi, B. N., Alawad, M. A., & Premkumar, M. (2023). An accurate metaheuristic mountain gazelle optimizer for parameter estimation of single-and double-diode photovoltaic cell models. *Mathematics,* 11(22), 4565.

Abdel-Basset, M., Mohamed, R., Jameel, M., & Abouhawwash, M. (2023). Spider wasp optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm. *Artificial Intelligence Review*, 56(10), 11675-11738.

Abdollahzadeh, B., Gharehchopogh, F. S., & Mirjalili, S. (2021). African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107408.

Abdollahzadeh, B., Gharehchopogh, F. S., Khodadadi, N., & Mirjalili, S. (2022). Mountain gazelle optimizer: a new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *Advances in Engineering Software,* 174, 103282.

Abualigah, L., Yousri, D., Abd Elaziz, M., Ewees, A. A., Al-Qaness, M. A., & Gandomi, A. H. (2021). Aquila optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm. *Computers & Industrial Engineering,* 157, 107250.

Akyol, S. (2021). Global optimizasyon için yeni bir hibrit yöntem: kaya kartalı optimizasyonu-tanjant arama algoritması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 33(2), 721-733.

Ali, A., Ahmed, M., Apon, H. J., Rahman, M. S., Ahsan, A., Prapti, S. T., & Ahmed, A. (2023, October). Power System Harmonics Estimation: A new optimization technique-based implementation with African Vulture Optimization Algorithm based Least Square Method. (2023) .*First International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence (ICAEECI) (pp. 1-7). IEEE.*

Alomoush, W., Houssein, E. H., Alrosan, A., Abd-Alrazaq, A., Alweshah, M., & Alshinwan, M. (2024*).* Joint opposite selection enhanced Mountain Gazelle Optimizer for brain stroke classification. *Evolutionary Intelligence,* 1-19.

Apon, H. J., Abid, M. S., Morshed, K. A., Nishat, M. M., & Faisal, F. (2021, October). Power system harmonics estimation using hybrid Archimedes optimization algorithm-based least square method. In *2021 13th international conference on information & communication technology and system (ICTS)* (pp. 312-317). IEEE.

Aydemir, S. B. (2022). Küresel optimizasyon için gauss kaotik haritası ile kartal optimizasyonu. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 34(1), 85-104.

Bakır, H. (2024). Dynamic fitness-distance balance-based artificial rabbits optimization algorithm to solve optimal power flow problem. *Expert Systems with Applications,* 240, 122460.

Bettayeb, M., & Qidwai, U. (2003). A hybrid least squares- GA-based algorithm for harmonic estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 18(2), 377-382.

Biswas, S., Chatterjee, A., & Goswami, S. K. (2013). An artificial bee colony-least square algorithm for solving harmonic estimation problems. *Applied Soft Computing*, *13*(5), 2343-2355.

Bollen, M. H. J., & Hassan, F. (2011). Integration of Distributed Generation in the Power System. Wiley-IEEE Press.

Costa, F. F., Cardoso, A. J. M., & Fernandes, D. A. (2007, April). Harmonic analysis based on Kalman filtering and Prony's method. In *2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives* (pp. 696-701). IEEE.

Ekinci, S., & Izci, D. (2023). Enhancing IIR system identification: Harnessing the synergy of gazelle optimization and simulated annealing algorithms. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy,* 5, 100225.

Fan, J., Li, Y., & Wang, T. (2021). An improved African vultures optimization algorithm based on tent chaotic mapping and time-varying mechanism. *Plos one,* 16(11), e0260725.

Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S., & Gandomi, A. H. (2020). Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic. *Expert systems with applications,* 152, 113377.

Gaing, ZL (2004). AVR sisteminde PID kontrolörünün optimum tasarımı için bir parçacık sürüsü optimizasyon yaklaşımı. *IEEE enerji dönüşümü işlemleri*, 19 (2), 384-391.

Gülmez, B. (2023). Stock price prediction with optimized deep LSTM network with artificial rabbits optimization algorithm. *Expert Systems with Applications,* 227, 120346.

Haseeb, A., Waleed, U., Ashraf, M. M., Siddiq, F., Rafiq, M., & Shafique, M. (2023). Hybrid weighted least square multi-verse optimizer (WLS–MVO) framework for real-time estimation of harmonics in non-linear loads. *Energies*, 16(2), 609.

Kabalci, Y., Kockanat, S., & Kabalci, E. (2018). A modified ABC algorithm approach for power system harmonic estimation problems. *Electric power systems research,* 154, 160-173.

Khodadadi, N., El-Kenawy, E. S. M., De Caso, F., Alharbi, A. H., Khafaga, D. S., & Nanni, A. (2023). The Mountain Gazelle Optimizer for truss structures optimization. *Applied Computing and Intelligence,* 3(2), 116-144.

Li, Y. F., & Fu, K. (2008). Eliminating the picket fence effect of the fast Fourier transform. Computer Physics Communications, 178(7), 486–491. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.11.001

Lu,Z., Ji, T. Y., Tang, W.H., & Wu, Q. H. (2008). Optimal harmonic estimation using a particle swarm optimizer. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 23(2), 1166-1174.

Ray,P.K., & Subudhi, B. (2012). BFO optimized RLS algorithm for power system harmonic estimation. *Applied Soft Computing,* 12(8), 1965-1977.

Sarangi, P., & Mohapatra, P. (2023). Evolved opposition-based mountain gazelle optimizer to solve optimization problems. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences,* 35(10), 101812.

Sasmal, B., Hussien, A. G., Das, A., & Dhal, K. G. (2023). A comprehensive survey on aquila optimizer. *Archives of Computational Methods in Engineering, 30(7),* 4449-4476.

Sasmal, B., Das, A., Dhal, K. G., & Saha, R. (2024). A Comprehensive Survey on African Vulture Optimization Algorithm. *Archives of Computational Methods in Engineering,* 31(3), 1659-1700.

Subjak, Joseph S., & Jhon S. Mcquilkin. Harmonics causes, effects,measurements, and analysis : an update. *IEEE transactions on industry applications.* 26.6 (1990); 1034-1042.

Shi, Y., & Eberhart, R. C. (1998). Parameter selection in particle swarm optimization. In Evolutionary Programming VII: 7th International Conference, *EP98 San Diego, California, USA, March 25–27, 1998 Proceedings 7* (pp. 591-600). Springer Berlin Heidelberg

Turgut, O. E., & Turgut, M. S. (2023). Local search enhanced Aquila optimization algorithm ameliorated with an ensemble of Wavelet mutation strategies for complex optimization problems. *Mathematics and Computers in Simulation,* 206, 302-374.

Wang, L., Cao, Q., Zhang, Z., Mirjalili, S., & Zhao, W. (2022). Artificial rabbits optimization: A new bio-inspired meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* 114, 105082.

Yang, X. S. (2010). Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications. Wiley.

Zhang, J., Khayatnezhad, M., & Ghadimi, N. (2022). Optimal model evaluation of the proton-exchange membrane fuel cells based on deep learning and modified African Vulture Optimization Algorithm. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,* 44(1), 287-305.

Zhang, Y. J., Yan, Y. X., Zhao, J., & Gao, Z. M. (2022). AOAAO: The hybrid algorithm of arithmetic optimization algorithm with aquila optimizer. *IEEE Access, 10,* 10907-10933.

Zhao, B., Guo, C. X., & Cao, Y. J. (2014). "A multiagent-based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch." IEEE Transactions on Power Systems, 20(2), 1070–1078.

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.