e-ISSN: 2149-3367

FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Ahmet Necdet Sezer Kampusü
Fen Bilimleri Enstitüsü
AFYONKARAHİSAR
Tel: 444 03 03 / 1460-1470
Belgegeçer: 0 272 218 14 62
E-posta: fmbd@aku.edu.tr

https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

e-ISSN: 2149-3367 CİLT / VOLUME: XXV SAYI / NUMBER: 3 HAZİRAN / JUNE 2025

Afyon Kocatepe Üniversitesi FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering

https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering

Cilt / Volume 25
Sayı / Number 3

e – ISSN: 2149-3367

HAZİRAN 2025

JUNE 2025

Dergi Hakkında

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi (AKÜ FEMÜBİD), fen ve mühendislik bilimleri alanlarındaki güncel gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişimlerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda nitelikli bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır.

Eski adıyla "Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi", 1999 yılında yılda 2 sayı olarak Türkçe ve İngilizce makalelerle yayın hayatına başlamıştır. Ocak 2013'ten itibaren isim değiştirerek "Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi" olarak yayın hayatına devam etmiştir. Makale değerlendirme sürecinin şeffaflaştırılması ve optimizasyonu için Şubat 2013 itibarıyla çevrimiçi makale değerlendirme ve takip sistemi uygulamaya alınmıştır. Ocak 2015 itibaren yazarların başvuru işlemlerinin kolaylaştırılması, değerlendirme sürecindeki çalışmaların olabildiğince şeffaf takip edebilmesi, yazar ve editoryal ekip arasındaki iletişimin daha etkin kullanılabilmesi, yayınlanma sürecindeki düzenleme işlemlerinin kolaylaştırılması, okuyucuların yayımlanan makalelere daha kolay ulaşma imkânları gibi avantajlar sağlayan elektronik dergi (e-ISSN: 2149-3367) olarak yayınlanmaktadır. 2015 yılından itibaren yayınlanan sayılarla birlikte TRDizin'de (TÜBİTAK-ULAKBIM) indekslenerek mühendislik ve temel bilimler konularında makaleler yayınlamaya devam etmektedir. Ocak 2020 yılından itibaren AKÜ FEMÜBİD yılda 6 sayı (Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos, Ekim ve Aralık) olarak Türkçe ve İngilizce makaleleri Dergi Park aracılığıyla online olarak kabul etmektedir.

Makale göndermek isteyen yazarlarımız, dergi internet sayfamızdan (https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid) kayıt yaptırarak, özgün bilimsel araştırma makalelerini çevrimiçi olarak gönderebilir ve süreci takip edebilirler. Dergimize yayınlanmak üzere başvurusu yapılan makaleler Dergi Park arayüzü ile en az iki hakem (çift taraflı kör hakemlik sistemi) tarafından değerlendirilmektedir. Yazıları değerlendiren hakemlerin adları yazarlara bildirilmez. Hakemler de yazarların adlarını göremez.

Derginin Amacı

Ulusal ve uluslararası temel bilimler ve mühendislik ile ilgili çeşitli disiplinler üzerine çalışan akademisyenler, araştırmacılar ve öğrencilerin Türkçe ve İngilizce yayın yapabilmesini sağlamak, ayrıca bu alanda nitelikli akademik yayınların toplumsal ve bilimsel gelişime katkı sağlaması için bir ortam sunmak amacını gütmektedir.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, özgün bilimsel araştırmalar ile uygulama çalışmalarına yer veren bir dergidir. Dergide, fen ve mühendislik bilimlerinde yapılmış deneysel ve teorik ilerlemeleri içeren bilimsel ve özgün araştırma makalesi türündeki çalışmalara yer verilir. Ayrıca, lisansüstü tezlerden hazırlanan yayınlar veya bu tezlerin bir alt çalışması olarak hazırlanan özgün ve daha önce hiçbir yerde yayımlanmamış olan araştırma makaleleri kabul edilmektedir.

Dergideki Yayın Çeşitliliği

Özellikle araştırma makaleleri, orijinal modelleme ve matematiksel çalışmalar, disiplinlerarası mühendislik uygulamalarını içeren çalışmalar ve son teknoloji araştırmaları dergimize kabul edilmektedir. Teknik notlar, derlemeler, editöre mektuplar ve kısa bildirimler kabul edilmemektedir. Lütfen gönderiminizi yaparken seçenekler listesinden uygun makale türünü seçtiğinizden emin olunuz. Özel sayılara başvuru yapan yazarların, özel sayı makale türünü bu listeden seçtiklerinden emin olmaları gerekmektedir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering

İLETİŞİM VE DESTEK/ CONTACT AND SUPPORT

Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Fen Bilimleri Enstitüsü,
Ahmet Necdet Sezer Kampusu,
03200, Afyonkarahisar/Türkiye

Telefon/Phones: 444 03 03 / 1472-1473
Belgegeçer/Fax: 0 272 218 14 62
e-posta/e-mail: fmbd@aku.edu.tr

ALAN EDİTÖRLERİ/ EDITORIAL BOARD

DİL EDİTÖRLERİ / LANGUAGE EDITORS

İ. Sinan ATLI Metallurgical and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
sinanatli@aku.edu.tr

MİZANPAJ EDİTÖRÜ / LAYOUT EDITOR

İbrahim YAVUZ Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
iyavuz@aku.edu.tr
İsmail YILDIZ İscehisar Vocational School, Afyon Kocatepe University, (Turkiye)
iyildiz@aku.edu.tr

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

FEN BİLİMLERİ / SCIENCE

FİZİK (11)

KİMYA / CHEMISTRY (12)

MATEMATİK & İSTATİSTİK / MATHEMATICS & STATISTICS (13)

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / ENGINEERING

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ / YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ (51)

ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ (52)

GIDA, ÇEVRE &ORMAN / FOOD, ENVIRONMENTAL & FOREST (54)

KİMYA & METALURJİ VE MALZEME / CHEMISTRY & METALLURGY AND MATERIALS (57)

MADEN & JEOLOJİ / MINES, & GEOLOGICAL (58)

MAKİNE , İMALAT & OTOMOTİV / MACHINERY, MANUFACTURING & AUTOMOTIVE (59)

MÜHENDİSLİK DİĞER / OTHER ENGİNEERİNG (72)

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1540009
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 031101 (455-461)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 031101 (455-461)

Nükleer Seviye Yoğunluğu ve Gama Işınım Şiddet Fonksiyonu Modellerinin ^{59}Co İzotopunun Gama ile İndüklenen Reaksiyonların Üzerindeki Etkilerinin Karşılaştırılması

***Makale Bilgisi / Article Info**
Alındı/Received: 29.08.2024
Kabul/Accepted: 04.01.2025
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Comparison Of The Effects Of Nuclear Level Density and Gamma Ray Strength Function Models On Gamma Induced Reactions Of ^{59}Co Isotope

Deniz CANBULA[1*], Bora CANBULA[2],

[1] *Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Manisa, Türkiye*
[2] *Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye*

Öz

^{59}Co izotopunun (g,n), (g,2n) ve (g,3n) fotonükleer reaksiyon tesir kesitleri makroskopik ve mikroskopik nükleer seviye yoğunluğu modelleri (CTM, BSFGM, GSM, Goriely's Skyrme kuvveti, Hilaire Skyrme kuvveti, HFB Gogny) ve gama ışınım şiddet fonksiyonları (Brink-Axel, Kopecky-Uhl, HFBCS, HFB, Goriely hibrid) TALYS 1.96 bilgisayar kodu kullanılarak 40 MeV gelen parçacık enerjisine kadar hesaplanmıştır. Sonuçlar EXFOR (deneysel nükleer reaksiyon veri tabanı) kütüphanesinden alınan deneysel veriler ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın amacı, nükleer seviye yoğunluğu modellerinin ve gama ışınım şiddet fonksiyonlarının ^{59}Co izotopunun gama ile indüklenen reaksiyonlarının tesir kesitleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır. Analiz edilen reaksiyonların tesir kesitleri üzerinde bu teorik modellerin etkileri detaylı olarak bu çalışmada sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Nükleer seviye yoğunluğu modelleri; Tesir kesiti; gama ışınım şiddet fonksiyonları; ^{59}Co izotopu; TALYS.*

Abstract

(g,n), (g,2n) and (g,3n) photonuclear reaction cross sections of ^{59}Co were calculated with macroscopic and microscopic nuclear level density models (CTM, BSFGM, GSM, Goriely's Skyrme force, Hilaire Skyrme force, HFB Gogny) and gamma-ray strength functions (Brink-Axel, Kopeck-Uhl, HFBCS, HFB, Goriely's hybrid) by using the latest version of TALYS computer code up to 40 MeV incident energy. The results are compared with the experimental data taken from EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Database) library and each other. The aim of the study is that effects of nuclear level density models and gamma-ray strength functions are investigated on cross section of gamma induced reactions of ^{59}Co. The effects of these theoretical models on cross section of analyzed reactions are presented in detail in this study.

Keywords: *Nuclear level density models; Cross section; Gamma ray strength functions; ^{59}Co isotope; TALYS.*

1. Giriş

Gama parçacığı kaynaklı reaksiyon verilerinin özellikle son yıllarda astrofiziksel nükleosentez, radyasyondan koruma ve kalkan tasarımı, radyoterapide radyasyon doz durumu, nötron üretimi, aktivasyon analizi gibi teorik ve uygulamalı araştırmalarda öneminin arttığı görülmektedir. Bu tip reaksiyonların tesir kesiti verileri, dev dipol rezonansının (GDR) baskın olduğu 30 MeV gelen parçacık enerjilerinin altındaki enerjilerde özellikle dikkate alınmalıdır. Bu yüzden, bu çalışmada, yapısal bir Füzyon malzemesi olan ^{59}Co izotopunun gama parçacığı kaynaklı reaksiyon tesir kesitleri 5-40 MeV enerji aralığında incelenmiştir. ^{59}Co izotopunun deneysel toplam tesir kesiti değerleri (g,n), (g,2n) ve (g,3n) reaksiyonları için 40 MeV enerjiye kadar Alvarez vd. 1979 tarafından ölçülmüştür. ^{59}Co izotopu için farklı teknikler kullanılarak 450 MeV gelen parçacık enerjisine kadar gerçekleştirilen, başka deneysel çalışmalarda literatürde mevcuttur (Bazhanov vd. 1964, Davydov vd. 1987, David vd. 1974).

GDR, yaklaşık 10-30 MeV enerji aralığında çekirdeklerin elektromanyetik radyasyonu soğurmasını tanımladığı için teorik tesir kesiti hesaplamalarında büyük ilgi görmektedir. Hem ^{59}Co hem de diğer bazı küresel çekirdeklerin reaksiyon tesir kesitleri üzerindeki kollektif GDR etkilerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur (Tuan vd. 1968, Huber vd. 1967). Yapılan çalışmalarda küresel çekirdeklerin çoğunda bu etkinin tesir kesiti hesaplamalarında önemli olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmalara ek olarak, ^{59}Co izotopu için toplam tesir kesiti ve GDR bölgelerinde nükleer spin-spin ve isospin etkileri

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Deniz Canbula* *e-posta/e-mail: deniz.canbula@cbu.edu.tr*

araştırılmıştır (Nagamine vd. 1970, Fisher vd. 1972, Tsubota vd. 1978).

Nükleer reaksiyonların tesir kesitlerini istatistiksel teori ile hesaplamak için iki önemli girdi vardır. Bunlardan biri çekirdeğin uyarılma enerjisi civarındaki uyarılmış seviyelerin sayısına karşılık gelen nükleer seviye yoğunluğu, diğeri ise gama emisyon kanalını tanımlayan gama ışınım şiddet fonksiyonudur. Bu girdilerin kullanılarak reaksiyon tesir kesiti hesaplamalarının ^{59}Co izotopu için yapıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur (Ratkevich vd. 2000, Barret vd. 1973, Fedorets vd. 2001, Larsen vd. 2014). Son yıllarda, iyi bilinen nükleer reaksiyon kodları TALYS (Koning vd. 2007), ALICE/ASH (Broeders vd. 2006) ve EMPIRE (Capote vd. 2007), bu girdilerin parametrelerini tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bilgisayar kodlarından bazılarının kullanılarak ^{59}Co izotopu için reaksiyon kesiti hesabının yapıldığı ve deneysel veriler ile karşılaştırılarak tartışmalı olarak sunulduğu çalışmalar mevcuttur (Demir vd. 2015; Kavun ve Makwana, 2020). Gurubumuzun daha önceki bazı çalışmalarında, TALYS kodu, fotonükleer reaksiyonların tesir kesiti hesaplamalarında kullanılmıştır (Canbula B. 2020, Canbula D. 2021, Canbula ve Canbula 2022). Bu çalışmada, ^{59}Co izotopunun gama parçacığı kaynaklı reaksiyonlarının tesir kesitleri üzerinde nükleer seviye yoğunluğu modellerinin ve gama ışınım şiddet fonksiyonlarının etkileri TALYS 1.96 kodu kullanılarak araştırılmıştır.

Çalışmanın devamında; Materyal ve Metot kısmında, hesaplama yöntemi sunulmuştur. Bulgular kısmında, sonuçlarımızı ve tartışmalarımızı sunuyoruz. Son olarak, sonuç kısmında, elde edilen sonuçların karşılaştırmalı analizini veriyoruz.

2. Materyal ve Metot

2.1. *Seviye Yoğunluğu*

Belirli bir uyarılma enerjisi etrafındaki uyarılmış seviyelerin sayısı nükleer seviye yoğunluğu olarak tanımlanır ve her çekirdek için karakteristik bir dağılıma sahiptir. Astrofizikte, reaktör dizaynında, medikal fizikte ve özellikle reaksiyon tesir kesiti hesaplamalarında önemli bir yeri vardır. Literatürde bilinen 6 nükleer seviye yoğunluğu modeli vardır, bunlardan geri-kaydırılmış Fermi gaz modeli (BSFGM) (Bethe 1937, Dig vd. 1973), sabit sıcaklık modeli (CTM) (Gilbert ve Cameron 1965), genelleştirilmiş süperakışkan model (GSM) (Ignatyuk vd. 1979, Ignatyuk vd. 1993) makroskopik olanlar, Goriely'nin kombinasyonel tablolarından Skyrme kuvveti (Goriely Skyrme) (Goriely vd. 2001), Hilaire'in kombinasyonel tablolarından Skyrme kuvveti (Hilaire Skyrme) (Goriely vd. 2008) ve Hilaire'in kombinasyonel tablolarından sıcaklığa bağlı Hartree-Fock-Bogolyubov Gogny kuvveti (HFB Gogny) (Hilaire vd. 2012) mikroskopik olanlardır. Bunlardan ilki ve en basit olanı Bethe (Bethe 1937) tarafından önerilmektedir. Modele göre, nükleonlar birbirleri ile etkileşime girmez, tek parçacık durumlarına eşit aralıklarla yerleşirler ve kollektif seviyeler yoktur. Uyarılma enerjisine bağlı toplam nükleer seviye yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi verilir,

$$\rho^{tot}(U) = \frac{1}{12\sqrt{2}\sigma}\frac{\exp\left[2\sqrt{aU}\right]}{a^{1/4}U^{5/4}}, \tag{1}$$

U, σ^2, a sırasıyla uyarılma enerjisi, spin-kesme parametresi ve nükleer seviye yoğunluğu parametresidir. a nükleer seviye yoğunluğunun ana değişkenidir ve yaygın olarak uyarılma enerjisine bağlı Ignatyuk'un formülü (Ignatyuk 1975) kullanılır,

$$a(U) = \tilde{a}\left(1 + \delta W\frac{1-\exp\left[-\gamma U\right]}{U}\right) \tag{2}$$

$\tilde{a}$, yüksek enerjilerde a değerinin limit değerine karşılık gelen asimptotik nükleer seviye yoğunluğu parametresidir. δW sıvı damlası kütle formülündeki mikroskopik düzeltme terimidir.

BSFGM yüksek uyarılma enerjilerinde güvenilir bir yapı sağlarken, düşük uyarılma enerjilerinde ıraksama sorunu yaşamaktadır. Bu probleme çözüm önerisinden sonra (Grossjean ve Feldmeier, 1985, Demetriou ve Goriely 2001) nükleer reaksiyon hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. CTM, düşük ve yüksek uyarılma enerjileri arasında bir eşleşme enerjisi içerir. Bu eşleşme enerjisine kadar CTM kullanılır, bu enerjinin üzerindeki enerjilerde Fermi gaz modeli tercih edilir. GSM ise, Bardeen-Cooper-Schrieffer teorisine göre süperiletken eşleşme korelasyonlarını dikkate alır (Ignatyuk vd. 1979, 1993). İlk makroskopik nükleer seviye yoğunluğu modellerinde Ignatuk'un formülasyonu kullanılmıştır (Ignatyuk 1975).

Nükleer astrofizik veya hızlandırıcı bazlı sistemler üzerindeki spesifik uygulamalar için deneysel verilerin daha geniş bir enerji aralığına genişletilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, deneysel verilerin eksik veya hiç olmadığı durumlarda mikroskobik veya yarı mikroskobik temelli nükleer modellerin kullanılması gerekmektedir. Hartree-Fock BCS modelini istatistiksel yaklaşımla içeren mikroskobik seviye yoğunluk modelleri, deneysel verileri en az makroskobik modeller kadar yeniden üretmede başarılıdır. S. Goriely (Goriely vd. 2001), 150 MeV uyarılma enerjisine ve $\boldsymbol{I = 30}$ spin değerine kadar Hartree-Fock modeli temelli Skyrme kuvvetini kullanarak nükleer seviye yoğunluklarını hesaplanmıştır. S. Hilaire (Goriely vd. 2008), 200 MeV uyarılma enerjisine ve $\boldsymbol{I = 49}$ spin değerine kadar

8500'den fazla çekirdek için enerji, spin ve pariteye bağlı seviye yoğunluklarını mikroskopik kombinasyonel model tabanlı olarak önermiştir. Diğer kombinasyonel mikroskobik model ise sıcaklığa bağlı Hartree-Fock-Bogolyubov ve Gogny kuvvetine dayanmaktadır (Hilaire vd. 2012). Bu model, tek parçacık seviyelerini ve kolektif özellikleri aynı anda kullanarak seviye yoğunluklarını tahmin eder.

2.2 Gama Işınım Şiddet Fonksiyonları

Gama ışınım şiddet fonksiyonu, istatistiksel teori ile fotonükleer reaksiyonların tesir kesitlerinin belirlenmesi için gerekli girdilerden biri olup, ayrıca nükleer reaksiyonlarda gama emisyon kanalını tanımlamak için de önem arz etmektedir. Bu fonksiyonu, nükleer seviye yoğunluğu gibi ortalama bir niceliktir ve elektrik ve manyetik geçişleri ifade eder. E1 radyasyonu için Kopeck-Uhl'nin genelleştirilmiş Lorentzian formu (Kopecky ve Uhl 1990) kullanılır:

$$f_{E1}(E_\gamma,T) = \frac{\sigma_{E1}\Gamma_{E1}}{(2l+1)\pi^2\hbar^2c^2}\left[\frac{E_\gamma\tilde{\Gamma}_{E1}(E_\gamma)}{(E_\gamma^2-E_{E1}^2)+E_\gamma^2\tilde{\Gamma}_{E1}(E_\gamma)^2}+\frac{0.7\Gamma_{E1}4\pi^2T^2}{E_{E1}^3}\right], \quad (3)$$

$\tilde{\Gamma}(E_\gamma)$ enerjiye bağlı sönümleme genişliği şu şekilde verilir:

$$\tilde{\Gamma}_{E1}(E_\gamma) = \Gamma_{E1}\frac{E_\gamma^2+4\pi^2T^2}{E_{E1}^2}, \quad (4)$$

T nükleer sıcaklık aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$T = \sqrt{\frac{E_n+S_n-\Delta-E_\gamma}{a(S_n)}}, \quad (5)$$

E_n gelen parçacığın nötron enerjisi, S_n nötron ayrılma enerjisi, Δ çiftlenme düzeltmesi, $a(S_n)$ ise S_n değerindeki nükleer seviye yoğunluk parametresidir. $E1$ dışındaki tüm geçiş türleri için dev dipol rezonansı tanımlayan standart bir Lorentzian formu olan Brink-Axel formu (Brink 1957, Axel 1962) kullanılmıştır. Enerjiye bağlı gama ışınım şiddet fonksiyonu da aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$f_{Xl}(E_\gamma) = \frac{1}{(2l+1)\pi^2\hbar^2c^2}\frac{\sigma_{Xl}E_\gamma\Gamma_{Xl}^2}{(E_\gamma^2-E_{Xl}^3)+E_\gamma^2\Gamma_{Xl}^2}, \quad (6)$$

σ_{Xl}, E_{Xl} ve Γ_{Xl} sırasıyla dev rezonansın kuvveti, enerjisi ve genişliğidir.

$$K_{Xl} = \frac{1}{(2l+1)\pi^2\hbar^2c^2}. \quad (7)$$

$\boldsymbol{E1}, \boldsymbol{E2}$ ve $\boldsymbol{E2}$'den büyük çok kutuplu geçişleri için dev rezonans parametrelerinin kuvveti, enerjisi ve genişliği tablolardan alınmıştır (Plujko vd. 2011). Gama ışını şiddet fonksiyonlarının iki mikroskopik formu Stephane Goriely tarafından Hartree-Fock-BCS (HFBCS) ve Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) modellerine göre hesaplanmıştır (Capote vd. 2009). Hartree-BCS tabloları, 10 parametreli bir Skyrme kuvvetinin yanı sıra 4 parametreli bir $\boldsymbol{\delta}$ fonksiyon çiftlenme kuvveti ve 3 parametreli fenomenolojik Wigner terimini içerir ayrıca 9200 çekirdeği temsil eder. HFB modeli, etkili nucleon-nükleon etkileşimlerini içeren Gogny kuvvetine dayanmaktadır. HFBCS modelinden farklı olarak, tüm dört kutuplu korelasyon enerjilerinin kendi kendine tutarlı hesaplaması, 5D kollektif Hamiltoniyen yaklaşımına dahil edilmiştir (Goriely vd. 2009). Son olarak, Goriely'nin hibrit modeli (Goriely 1998), yüksek enerjilerdeki GDR Lorentzian tanımını, nötron ayrılma enerjisinin altındaki sonlu Fermi sistemler teorisinin (Fayans vd. 1979) analitik yaklaşımıyla bileştirir.

2.3 TALYS Bilgisayar Kodu

TALYS (Koning vd. 2007), nükleer yapı ve reaksiyon gözlenebilirlerinin tanımlanması ve analizi için bilinen en iyi programlardan bir tanesidir. 1keV ile 1GeV gelen parçacık enerji aralığındaki proton, gama, döteron, alfa gibi hafif parçacıkları içeren nükleer reaksiyonları simüle edebilir. Nükleer seviye yoğunluğu modelleri ve gama ışınım şiddet fonksiyonları TALYS kodunda opsiyonel birer girdi olarak kullanılabilir. Bu çalışmada, makroskopik (BSFGM, CTM, GSM) ve mikroskopik (Goriely's Skyrme force, Hilaire Skyrme force, HFB Gogny) nükleer seviye yoğunluk modelleri ve gama ışınım şiddet fonksiyonları (Kopecky-Uhl, Brink-Axel, Hartree-Fock BCS, Hartree-Fock Bogol., Gorielys Hybrid) kullanılmıştır.

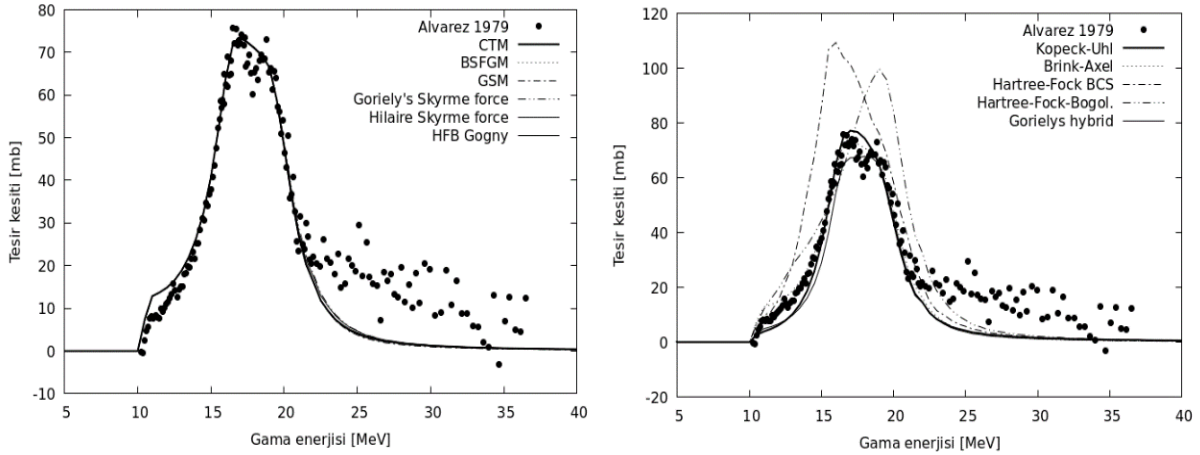
3. Bulgular

Bu çalışmada, altı farklı nükleer seviye yoğunluğu modeli (BSFGM, CTM, GSM, Goriely Skyrme, Hilaire Skyrme, HFB Gogny) ve beş farklı gama ışınım şiddet fonksiyonu (Kopack-Uhl, Brink-Axel, HFBCS, HFB, Gorieys hibrid) kullanılarak TALYS bilgisayar kodu ile ^{59}Co(g,n)^{58}Co, ^{59}Co(g,2n)^{57}Co ve ^{59}Co(g,3n)^{56}Co reaksiyonlarının fotonükleer tesir kesitleri hesaplanmıştır. Elde edilen teorik sonuçlar hem birbirleri ile hem de mevcut deneysel veriler ile karşılaştırılarak sunulmuştur.

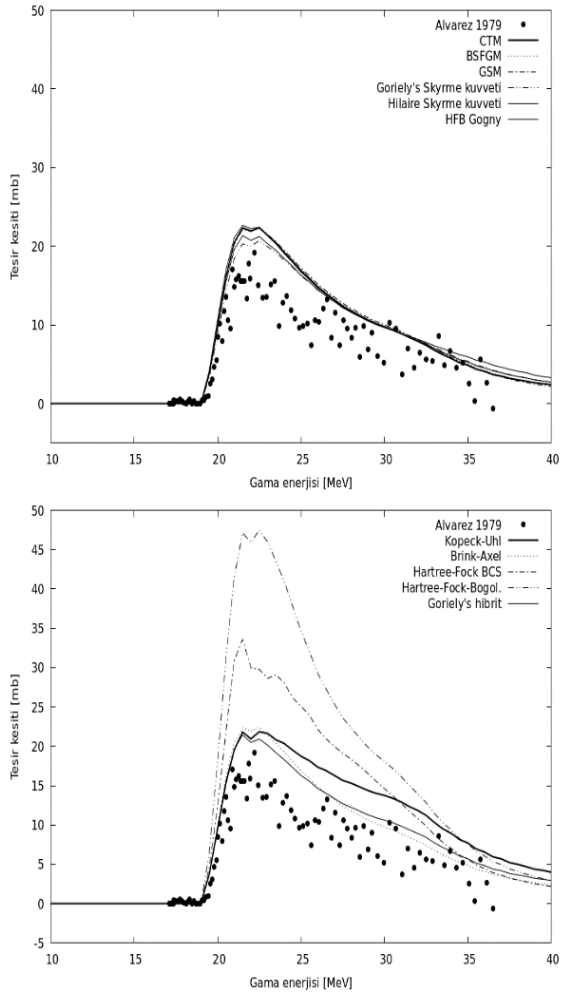
Şekil 1, ^{59}Co(g,n)^{58}Co reaksiyonu için, nükleer seviye yoğunluk modelleri (üst panel) ve gama ışınım şiddet fonksiyonları (alt panel) kullanılarak elde edilen tesir kesiti tahminlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu reaksiyonun deneysel verileri, güncel deneysel veri tabanında yer alan Alvarez ve ark. (Alvarez vd. 1979) çalışmasından alınmıştır. Reaksiyonun eşik enerjisi 10.454 MeV dir. Nükleer seviye yoğunluk modelleri Hesaplamalarda birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Gama ışınım şiddet fonksiyonlarına bakıldığında ise Kopecky-Uhl Lorentzian ve Brink-Axel formları

deneysel verileri diğer modellere kıyasla tekrar sağlamada daha başarılıdır. Yaklaşık 22 MeV gelen parçacık enerjisi üzerinde deneysel verileri elde etmede tüm modellerin yetersiz kaldığı söylenebilir.

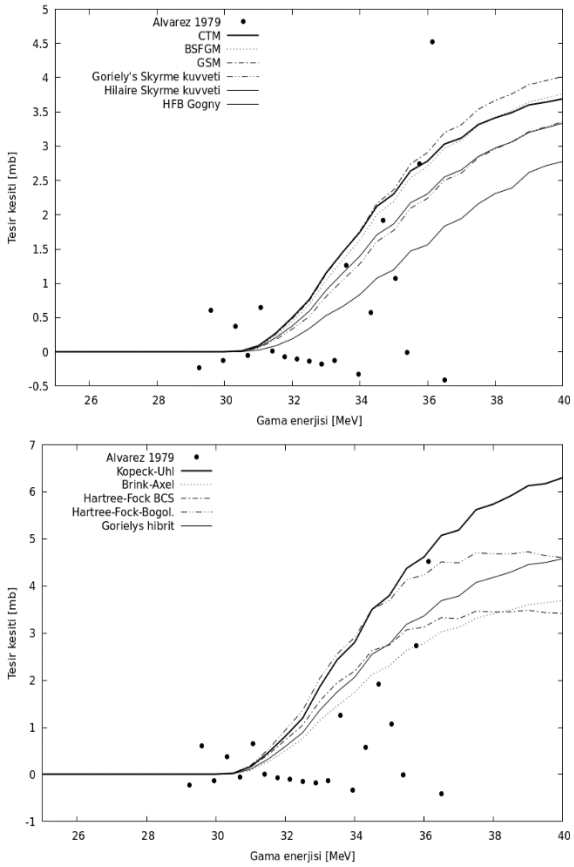
^{59}Co(g,2n)^{57}Co reaksiyonu için, altı nükleer seviye yoğunluk modeli (üst panel) ve beş gama ışınım şiddet fonksiyonu (alt panel) ile elde edilen tesir kesiti sonuçları Şekil 2 de sunulmuştur. Deneysel veriler Şekil 1'deki aynı çalışmada alınmıştır. Tüm seviye yoğunluk modelleri tüm enerji bölgesinde benzer sonuçlar sergilemektedir. Brink-Axel Lorentzian ve Goriely'nin hibrit modeli, diğer gama ışınım şiddet fonksiyonlarıyla karşılaştırıldığında en iyi sonuçları sunmaktadır.



Şekil 1. ^{59}Co(g,n)^{58}Co reaksiyonu için nükleer seviye yoğunluğu modelleri (üst panel) ve gama ışınım şiddet fonksiyonları (alt panel) kullanılarak hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel veriler (Alvarez vd. 1979) ile karşılaştırılması.



Şekil 2. ^{59}Co(g,2n)^{57}Co reaksiyonu için nükleer seviye yoğunluğu modelleri (üst panel) ve gama ışınım şiddet fonksiyonları (alt panel) kullanılarak hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel veriler (Alvarez vd. 1979) ile karşılaştırılması.



Şekil 3. ^{59}Co(g,3n)^{56}Co reaksiyonu için nükleer seviye yoğunluğu modelleri (üst panel) ve gama ışınım şiddet fonksiyonları (alt panel) kullanılarak hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel veriler (Alvarez vd. 1979) ile karşılaştırılması.

Şekil 3'te ise ^{59}Co(g,3n)^{56}Co reaksiyonunun tesir kesitini hesaplamak için farklı nükleer seviye yoğunluk modelleri (üst panel) ve gama ışınım şiddet fonksiyonları (alt panel)

kullanılmıştır. Deneysel veriler Şekil 1 ve 2'deki aynı çalışmadan alınmıştır ve oldukça dağınık bir dağılım göstermektedir. Hesaplamalarda kullanılan teorik modeller de benzer trende sahip dağılım sergilemektedir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

^{59}Co(g,n)^{58}Co, ^{59}Co(g,2n)^{57}Co ve ^{59}Co(g,3n)^{56}Co reaksiyonlarının gama parçacığı kaynaklı reaksiyon tesir kesitleri, nükleer seviye yoğunluğu modelleri ve gama ışınım şiddet fonksiyonları ile TALYS bilgisayar kodu kullanılarak hesaplanmıştır. TALYS kodunun içinde var olan makroskopik ve mikroskopik nükleer seviye yoğunlukları ve gama ışınım şiddet fonksiyonları girdi olarak kullanılmıştır. Her bir reaksiyon için ayrı elde edilen sonuçlar deneysel veriler ve birbirleri ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Şekil 1 ve 2 de, seviye yoğunluğu kullanılarak elde edilen tesir kesiti değerleri birbirine yakın sonuçlar göstermektedir. Sonuçları makroskopik veya mikroskopik model olarak ayırt etmek bu reaksiyonlar için zordur. Dolayısıyla, modeller arasındaki farklılıkların bu reaksiyonların tesir kesiti hesaplamalarında büyük önem arz etmediği yorumu yapılabilir. Bu beklenen bir durumdur çünkü gama ile indüklenen reaksiyonlarda en önemli girdi parametreleri dev dipol rezonans parametreleridir.

İncelenen üç fotonükleer reaksiyon içinde söylenebilir ki, gama ışınım şiddet fonksiyonlarının etkisi tesir kesiti sonuçlarında belirgin şekilde görülmektedir.

Şekil 1 ve 2 için gama ışınım şiddet fonksiyonlarının etkilerini ayırt etmek ve bunlardan birini seçmek daha kolaydır. Bu Şekillerde gözlenen pikler için belirgin bir GDR etkisi olduğu yorumu yapılabilir.

Şekil 3'te hem deneysel verilerin hem de teorik sonuçların birbirinden uzak olması reaksiyon sonuçlarının yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. Ancak, gama kaynaklı reaksiyonlar için nükleer seviye yoğunluğu modelleri ve gama ışınım şiddet fonksiyonlarının reaksiyon tesir kesitini belirlemek amacıyla isteğe bağlı girdiler olarak seçilebileceği söylenebilir.

GDR, 30 MeV'e kadar olan fotonükleer reaksiyon tesir kesitlerinde baskın olan bir mekanizmadır ve özellikle 1. ve 2. Şekiller de görüldüğü üzere, çekirdeğin küresel veya deforme olmasına da bağlı olarak gelen foton enerjisine karşı bir veya birkaç Lorentzian tepe noktası şeklinde karakterize edilebilir. Fotonükleer reaksiyonlar için teorik tesir kesiti hesaplamaları GDR parametrelerine odaklanır. Bu parametreleri de TALYS gibi nükleer reaksiyonları doğru ve tam olarak simüle etmeyi amaçlayan teorik reaksiyon kodlarında kullanılır.

TALYS gibi düzenli aralıklarla güncellenen hesaplama araçları ile deneysel verilere erişilemeyen yada deneysel verilerin eksik kaldığı enerji bölgelerinde daha doğru hesaplamalar yapılmasına, bu sayede de araştırmacılara geniş analiz olanakları sunabileceği öngörülmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı
Deniz Canbula: Araştırma, Yazma
Bora Canbula: Hesaplama, Biçimsel analiz, Metodoloji

Çıkar Çatışması Beyanı
Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği
Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

Alvarez, R. A., Berman, B. L., Faul, D. D., Lewis Jr, F. H., Meyer, P., 1979. Photoneutron cross sections for Mn 55 and Co 59. *Physical Review C*, 20(1), 128. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.20.128

Axel, P., 1962. Electric dipole ground-state transition width strength function and 7-MeV photon interactions. *Physical Review*, 126(2), 671. https://doi.org/10.1103/PhysRev.126.671

Barrett, R. F., Birkelund, J. R., Thomas, B. J., Lam, K. S., ve Thies, H. H., 1973. Systematics of nuclear level density parameters of nuclei deficient in one neutron. *Nuclear Physics A*, 210(2), 355-379. https://doi.org/10.1016/0375-9474(73)90308-4

Bazhanov, E.B., Komar, A.P., and Kulikov, A.V. Soviet Physics JETP, 19 1964.

Bethe, H. A., 1937. Nuclear physics B. Nuclear dynamics, theoretical. *Reviews of Modern Physics*, 9(2), 69. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.9.69

Brink, D. M., 1957. Individual particle and collective aspects of the nuclear photo effect. *Nuclear Physics*, 4,215-220. https://doi.org/10.1016/0029-5582(87)90021-6

Broeders, C. H. M., Konobeyev, A. Y., Korovin, Y. A., Lunev, V. P., ve Blann, M., 2006. *ALICE/ASH–*. FZK.

Canbula, B., 2020. 55Mn İzotopunun fotonükleer tesir kesitleri üzerinde kollektif nükleer seviye yoğunluğunun etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(1), 138-142. https://doi.org/10.19113/sdufenbed.639828

Canbula, D., 2021. Hafif Nadir Toprak Elementi 144Sm İzotopunun Fotonükleer Tesir Kesiti Hesabı. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 7(2), 314-320. https://doi.org/10.29132/ijpas.879068

Canbula, D., ve Canbula, B., 2022. A Study of Photoneutron Reactions Using Statistical Analysis. *East European Journal of Physics*, 4, 99-103. https://doi.org/10.26565/2312-4334-2022-4-08

Capote, R., Carlson, B. V., Oblozinsky, P., Sin, M., Trkov, A., Wienke, H., ve Zerkin, V., 2007. EMPIRE: Nuclear

Reaction Model Code System for Data Evaluation. *Nuclear Data Sheets*, 108(12), 2655-2715. https://doi.org/10.1016/j.nds.2007.11.003

Capote, R., Herman, M., Obložinský, P., Young, P. G., Goriely, S., Belgya, T., ... ve Talou, P., 2009. RIPL–reference input parameter library for calculation of nuclear reactions and nuclear data evaluations. *Nuclear Data Sheets*, 110(12), 3107-3214. https://doi.org/10.1016/j.nds.2009.10.004

Davydov, M. G., Khamraev, F. S., Shomurodov, É. M., 1987. Cobalt photoactivation yield and cross section. *Soviet Atomic Energy*, 63(1), 545-548.

David, P., Debrus, J., Lübke, F., Mommsen, H., Schoenmackers, R., Stein, G., 1974. Bremsstrahlung induced nuclear reactions with Eγmax= 450 MeV. *Nuclear Physics A*, 221(1), 145-162. https://doi.org/10.1016/0375-9474(74)90104-3

Demetriou, P., ve Goriely, S., 2001. Microscopic nuclear level densities for practical applications. *Nuclear Physics A*, 695(1-4), 95-108. https://doi.org/10.1016/S0375-9474(01)01095-8

Demir, B., Kaplan, A., Çapalı, V., Özdoğan, H., Sarpün, İ. H., Aydın, A., ve Tel, E., 2015. Neutron Production Cross-Section and Geant4 Calculations of the Structural Fusion Material 59 Co for (α, xn) and (γ, xn) Reactions. *Journal of Fusion Energy*, 34, 636-641. https://doi.org/10.1007/s10894-015-9860-4

Dilg, W., Schantl, W., Vonach, H., ve Uhl, M., 1973. Level density parameters for the back-shifted fermi gas model in the mass range 40< A< 250. *Nuclear Physics A*, 217(2), 269-298. https://doi.org/10.1016/0375-9474(73)90196-6

Fayans, S. A., Khodel, V. A., ve Saperstein, E. E., 1979. Self-consistent theory of finite fermi systems and low-lying collective states in spherical nuclei (I). *Nuclear Physics A*, 317(2-3), 424-446. https://doi.org/10.1016/0375-9474(79)90490-1

Fedorets, I. D., 2001. Radiative strength functions for nuclei in which the number of protons is close to the magic number of Z= 28. *Physics of Atomic Nuclei*, 64, 49-56. https://doi.org/1063-7788/01/6401

Fisher, T. R., Grench, H. A., Healey, D. C., McCarthy, J. S., Parks, D., Whitney, R., 1972. The nuclear spin-spin effect in ^{59}Co. *Nuclear Physics A*, 179(2),241-262. https://doi.org/10.1016/0375-9474(72)90367-3

Gilbert, A., & Cameron, A. G. W., 1965. A composite nuclear-level density formula with shell corrections. *Canadian Journal of Physics*, 43(8), 1446-1496. https://doi.org/10.1139/p65-139

Goriely, S., Hilaire, S., Girod, M., ve Péru, S., 2009. First gogny-hartree-fock-bogoliubov nuclear mass model. *Physical review letters*, 102(24), 242501. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.242501

Goriely, S., 1998. Radiative neutron captures by neutron-rich nuclei and the r-process nucleosynthesis. *Physics Letters B*, 436(1-2), 10-18. https://doi.org/10.1016/S0370-2693(98)00907-1

Goriely, S., Tondeur, F., ve Pearson, J. M., 2001. A Hartree–Fock nuclear mass table. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 77(2), 311-381. https://doi.org/10.1006/adnd.2000.0857

Goriely, S., Hilaire, S., ve Koning, A. J., 2008. Improved microscopic nuclear level densities within the Hartree-Fock-Bogoliubov plus combinatorial method. *Physical Review C*, 78(6), 064307. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.78.064307

Grossjean, M. K., ve Feldmeier, H., 1985. Level density of a Fermi gas with pairing interactions. *Nuclear PhysicsA*, 444(1),113-132. https://doi.org/10.1016/0375-9474(85)90294-5

Huber, M. G., Danos, M., Weber, H. J., Greiner, W., 1967. Collective treatment of the giant resonances in spherical nuclei. *Physical review*, 155(4),1073. https://doi.org/10.1103/PhysRev.155.1073

Hilaire, S., Girod, M., Goriely, S., ve Koning, A. J., 2012. Temperature-dependent combinatorial level densities with the D1M Gogny force. *Physical ReviewC*, 86(6),064317. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.86.064317

Ignatyuk, A.V., Istekov, K.K., Smirenkin, G.N. (Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Germany, 1979).

Ignatyuk, A. V., Weil, J. L., Raman, S., ve Kahane, S., 1993. Density of discrete levels in Sn 116. *Physical Review C*, 47(4), 1504. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.47.1504

A.V. Ignatyuk, Soviet Journal of Nuclear Physics-USSR, 21, 10 (1975). (in Russian)

Kavun, Y., ve Makwana, R., 2020. Study of (γ, p) reaction cross-section calculations of 52Cr, 54Fe, 60Ni and 64Zn isotopes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 472, 72-77. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.03.036

Koning, A. J., Hilaire, S., ve Duijvestijn, M. C., 2007. TALYS-1.0. In *International Conference on Nuclear Data for Science and Technology,* EDPSciences, 211-214. http://dx.doi.org/10.1051/ndata:07767

Kopecky, J., ve Uhl, M., 1990. Test of gamma-ray strength functions in nuclear reaction model calculations. *Physical Review C*, 41(5), 1941. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.41.1941

Larsen, A. C., Blasi, N., Bracco, A., Bürger, A., Camera, F., Eriksen, T. K., .ve Wiedeking, M., 2014. Low-energy enhancement of nuclear γ strength and its impact on astrophysical reaction rates. In *EPJ Web of Conferences,* EDPSciences. 66, 07014.

https://doi.org/10.1051/epjconf/20146607014

Nagamine, K., Uchida, A., Kobayashi, S., 1970. Nuclear spin-spin effect in the total cross section for 1 MeV polarized neutrons on polarized 59Co nuclei. *Nuclear Physics A*, 145(1), 203-222. https://doi.org/10.1016/0375-9474(70)90315-5

Plujko, V. A., Capote, R., ve Gorbachenko, O. M., 2011. Giant dipole resonance parameters with uncertainties from photonuclear cross sections. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 97(5),567-585. https://doi.org/10.1016/j.adt.2011.04.001

Ratkevich, S. S., Fedorets, I. D., Nemashkalo, B. A., Storizhko, V. E., 2000. Radiative strength functions for dipole transitions in 57, 59 Co. *Physics of Atomic Nuclei*, 63, 1497-1503. https://doi.org/1063-7788/00/6309

Tsubota, H., Oikawa, S., Uegaki, J., Tamae, T., 1978. Isospin effects in the giant dipole resonance region of ^{51}V and ^{59}Co. *Nuclear Physics A*, 303(3),333-344. https://doi.org/10.1016/0375-9474(78)90362-7

Tuan, S. T., Weber, H. J., Wright, L. E., 1968. Partial-Wave Analysis of Inelastic Electron Scattering on the Collective Giant Resonances of Medium and Heavy Spherical Even Nuclei. *Physical Review*, 167(4), 939. https://doi.org/10.1103/PhysRev.167.939

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1554735
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 031102 (462-470)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 031102 (462-470)

Optical Properties of Cobalt Doped TiO_2 Thin Films: Study of Degradation under Band Gap Edge of 412 nm Light Illumination

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 23.09.2024
Kabul/Accepted: 18.01.2025
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Kobalt Katkılı TiO_2 İnce Filmlerin Optik Özellikleri: 412 nm Işık Aydınlatması Altında Bant Aralığı Sınırında Bozunmanın İncelenmesi

Ayşe Nur ŞAHİN, Berke TUNCAY*, Zeynep GÜVEN ÖZDEMİR

Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, İstanbul, Türkiye

Abstract

In this study, it has been aimed to investigate the effect of Co doping on the optical properties of TiO_2 thin film and the change in optical properties of Co doped TiO_2 thin film with the widest optical band gap during illuminating by light. For this purpose, Pure and cobalt-doped TiO_2 thin films have been prepared by sol-gel technique. The optical properties of the thin films have been characterized by ultraviolet-visible (UV-Vis) light spectrometer. The optical band gap, transmittance, reflectance and refractive index have been determined. The highest optical band gap has been recorded for the 3% Co doping as 3.01 eV. Additionally, it has been determined that since cobalt exhibits absorption characteristics that differ from TiO_2, particularly at longer wavelengths, it leads to a decrease in the effective refractive index for the composites. The results indicated that the cobalt additive significantly enhanced photo-degradation. To analyze this effect, the composite having 3% Co doping has also been illuminated by 412 nm light that corresponds to 3.01 eV between 20 minutes and 1 hour. As a result, a slight increase in the absorbance has been recorded.

***Keywords**: TiO_2 thin film; Sol-gel; Cobalt dopant; Photo-degredation.*

Öz

Bu çalışmada, Co katkısının TiO_2 ince filminin optik özellikleri üzerindeki etkisi ve en geniş optik bant aralığına sahip Co katkılı TiO_2 ince filminin ışıkla aydınlatılması sırasında optik özelliklerindeki değişimin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, saf ve kobalt katkılı TiO_2 ince filmler sol-jel tekniği ile hazırlanmıştır. İnce filmlerin optik özellikleri ultraviyole-görünür (UV-Vis) ışık spektrometresi ile karakterize edilmiştir. Optik bant aralığı, geçirgenlik, yansıma ve kırılma indisi belirlenmiştir. En yüksek optik bant aralığı %3 Co katkısı için 3.01 eV olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, kobaltın özellikle uzun dalga boylarında TiO_2'den farklı soğurma özellikleri sergilemesi nedeniyle, bileşimlerin kırılma indisinde bir düşüşe yol açtığı belirlenmiştir. Sonuçlar, kobalt katkısının foto-bozunmayı önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu etkiyi analiz etmek için, %3 Co katkılı bileşimde 20 dakika ile 1 saat arasında 3,01 eV'a karşılık gelen 412 nm ışıkla aydınlatılmıştır. Sonuç olarak, absorbans değerinde nispeten bir artış görülmüştür.

***Anahtar Kelimeler:** TiO_2 ince film; Sol-Jel; Kobalt katkı; Foto-bozulma*

1. Introduction

In recent years, there has been significant interest in titanium dioxide-titania (TiO_2) materials due to their modified electronic and optical properties. These materials find extensive applications in areas such as photocatalysis (S.Scirè et al., 2021), photoelectrochemical solar cells (T.S. Bhat et al., 2021), bone implants (N. Sehrish et al.,2022) optical coatings (K. Albaidani et al., 2023) and sensors (E.A.S. Simonetti et al.,2021). In recent times, there has been a focus on studying bulk materials, nanoparticles, and thin films of TiO_2 doped with various elements to enhance their properties. Especially, the introduction of various transition metal ions into the TiO_2 lattice also induces varying strains and results in changes in the lattice parameters depending on the dopant concentration. This modification also enable to adjustment of the electronic, optic, and magnetic properties of the TiO_2 for various applications (M.Hamadanian et al. 2010, C.Stella et al. 2016).

The primary emphasis in these studies was on doping at Ti sites, with dopants such as Fe, Co, Cr, V, Ni, Cu, Mn, and Rb (J.R.Simpson and H.D.Drew 2004, G.He et al. 2008, P.C.McIntyre et al. 1997, Z.S.Cai et al.2011). Among these additives, due to the close values of atomic radii of cobalt (Co) and titanium (Ti), the seamless integration of Co atoms into the TiO_2 lattice is possible without inducing notable lattice distortions. This form of substitutional doping ensures a consistent dispersion of Co across the TiO_2 material, resulting in a uniform doping profile. Besides, as reported by (Yamada et al. 2011), it is known that ferromagnetism can be induced at room temperature with cobalt. On the other hand, it has been

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Berke Tuncay* *e-posta/e-mail: berketuncay3@gmail.com*

reported by Barakat et al. that the transition from the anastasis phase to the rutile phase for TiO_2 can be accelerated by the addition of cobalt (M.A. Barakat et al. 2005). It has been also reported by Tian et al. that cobalt doping to TiO_2 causes a change in the optical band gap (Jianjun Tian et al. 2012).

In the light of all this scientific literature, this study attempted to improve the optical properties of TiO_2 thin films with Co doping and also focused on the investigation of the photo-degradation properties of the sample with the widest optical band gap. In this context, the Co-doped TiO_2 thin film with the widest optical band gap has been exposed to light at the wavelength corresponding to its optical band gap for different time durations and the change of its optical properties has been discussed. Additionally, in the photo-degradation analysis, the Co-doped TiO_2 thin film as well as the Ruthenium -coated Co-doped TiO_2 thin film have also been taken into account.

2. Experimental

2.1 Materials

Titanium-4-isopropoxide (TTIP) used in the preparation of Co-doped TiO_2 films has been obtained from Sigma Aldrich Company with CAS number of 546-68-9. Methanol (CH3OH) and acetic acid (CH_3COOH) have been supplied from Sigma Aldrich Company with the CAS numbers of 67-56-1 and 64-19-7, respectively. Additionally, cobalt (II) chloride hexahydrate ($CoCl_2.6H_2O$) has been purchased from Acros Organics Company with the CAS number of 7791-13-1. The alcohols used for cleaning purposes are of technical quality and have been supplied by the Shell Company. The microscope slides (soda lime glass) substrates have been purchased from IsoLab Company with 50 pieces.

2.2 Preparation of Co-doped TiO_2 Thin Films

TiO_2 doped with cobalt in 1%, 2%, 3%, 4%, and 5% concentrations have been synthesized by sol-gel method at room temperature. The preparation steps of the samples in thin film form onto glass substrates have been illustrated representatively in Figure 1. Glass has been used as the substrate to be coated with films. The glasses have been cleaned ultrasonically in DI-W (deionized water) for 15 minutes, then ultrasonically cleaned in isopropyl alcohol for 15 minutes, rinsed with DI-W and dried. After mixing 3.5 mL of Titanium-4-isopropoxide with 31.5 mL of methanol in a magnetic stirrer for 1 hour, 350 µL HCl has been added and this mixture has been stirred in a magnetic stirrer for 24 hours to obtain a homogeneous mixture (TiO_2 solution). $CoCl_2.6H_2O$ has been used as the starting material for the cobalt additive. A cobalt solution has been prepared by dissolving 0.2M $CoCl_2.6H_2O$ in the appropriate volume of methanol. This solution has been added into the previously prepared TiO_2 solution at the rate of 1, 2, 3, 4, and 5% by volume of the cobalt sol solution and mixed. Un-doped (i.e. pure) TiO_2 and 1, 2, 3, 4, and 5% (V/V) Co-doped TiO_2 solutions have been coated on previously prepared substrates by spin coating method at 3000 rpm in 30 seconds. To evaporate the solution, the obtained films have been heated at 100 °C for 10 minutes. Finally, the films have been annealed at 500°C for 30 minutes.

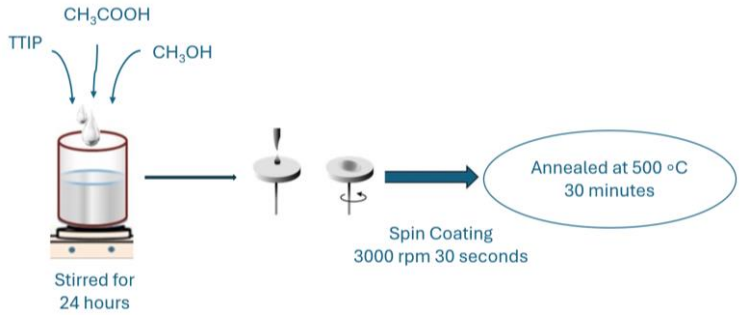


Figure 1. The preparation steps of the samples prepared onto glass substrates.

2.3 Methods

The structural analysis of the TiO_2 has been determined by X-Ray Diffraction (XRD) patterns obtained by PANalytical X'Pert PRO XRD model XRD device between 2θ=15°-70°. A CuK_α source with the wavelength of 1.54059 Å has been in an XRD device. The scanning rate was 1°/min. The surface morphology of the thin film has also been viewed by images taken from Zeiss EVO LS 10 model Scanning Electron microscope (SEM). The optical properties of the samples have been determined by using their UV-Vis spectra obtained from Perkin Elmer Lambda 35 UV/Vis spectrometer at room temperature between 350-1100 nm wavelength.

3. Results and Discussions

3.1. Structure, Morphology and FTIR Analysis

As shown in Figure 2, pure TiO_2 thin film exhibits a broad diffraction peak from $2\theta = 20°$ to 70°. These peaks

corresponding to 26.35°, 37.58°, 48.40°, 55.45° and 59.35° is attributed to (101), (004), (200), (105) and (211) planes, respectively, for the anatase phase. These XRD peaks are consistent with the characteristic XRD peaks of TiO_2 thin films (JCPDS Card No. 21-1272) (V. Mishra et al. 2019, F. Z. Haque et al. 2016, N.A. Bakr et al. 2017).

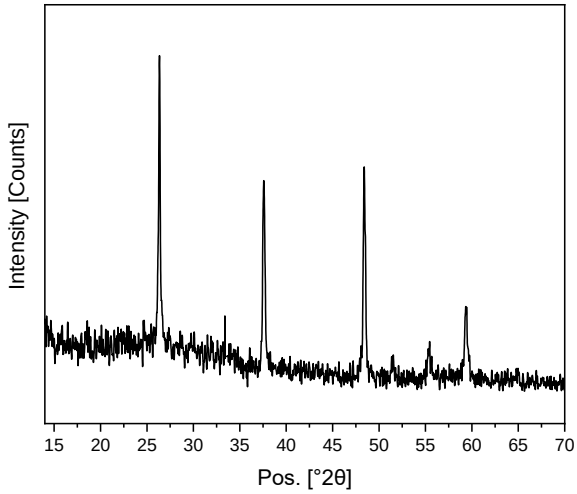


Figure 2. XRD patterns of the pure TiO_2.

Figure 3 shows an SEM image of the surface of a pure TiO_2 thin film at 50,000x magnification. The image reveals the formation of inhomogeneous particles with various geometries.

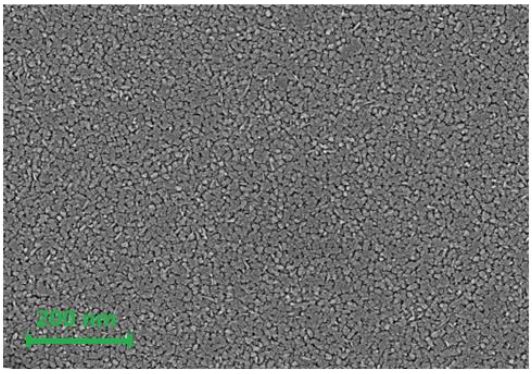


Figure 3. SEM image of the pure TiO_2.

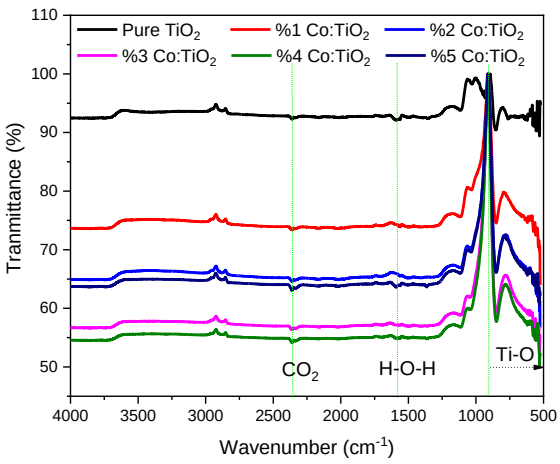


Figure 4. FTIR Spectrum of the pure and Co doped TiO_2 samples.

Fourier Transformed Infrared (FTIR) spectroscopy has also been employed to investigate the TiO_2 lattice vibrations significantly influenced by the presence of Co atoms. Figure 4 displays the FTIR spectra of pure and Co-doped TiO_2 thin films. The wide band observed between 500 cm^{-1} and 900 cm^{-1} is associated with anatase titania, and it is attributed to the Ti–O stretching and Ti–O–Ti bridging stretching modes (P. Praveen et al.,2014, C. Stella et al.,2016). In pure TiO_2, the Ti–O frequency peak has been observed at 553 and 765 cm^{-1}, while in the Co doped TiO_2 samples, the shift in this peak indicates the presence of oxygen vacancies and confirms the formation of Co–O bonds due to the substitution of Co atoms in the TiO_2 lattice. Additionally, compared to the pure sample, the doped samples show shifts towards higher wave numbers, suggesting the successful doping of Co atoms into the TiO_2 lattice (B. and A. Choudhury ,2012, K. Das et al., 2009). The peak at 1035 cm^{-1} is also attributed to Si-O-Si vibrations, likely originating from the soda-lime glass substrate (J. Wan et al., 2021). The peak at 1580 cm^{-1} corresponds to the bending vibration mode of physisorbed water molecules (H–O–H) on the sample surface (M. Hamadanian et al.,2010). Additionally, the bands at 2351 cm^{-1} and 2800 cm^{-1} confirm the presence of respectively CO_2 molecules and C-H, detectable due to the measurement being conducted in air. Finally, the peak appeared between 3200 cm^{-1} and 3400 cm^{-1} is associated with the O–H stretching vibration of the hydroxyl group (M. Hamadanian et al.,2010).

3.2 Analyzes of Optical Parameters of Samples Depending on Their Interaction with UV-Vis Light

The UV-Vis spectroscopy technique has been realized to determine the photo-activated optical features of the pure TiO_2 and TiO_2:Co thin films. The UV-Vis light absorption spectra of the samples have been shown in Figure 5(a).

As shown in Figure 5(a), the pure TiO_2 film shows typical absorption in the UV range and the optical absorption of the pure TiO_2 decreases considerably from the UV to near IR region of the electromagnetic spectrum. The same behavior with increasing wavelengths of light has been observed for the Co:TiO_2 thin films. However, the absorbance values of the Co-doped TiO_2 thin films are less than that of pure TiO_2 between the wavelength of 350 nm and 550 nm. As a result of Cobalt substitution for titanium in the TiO_2 lattice can modify the band gap of the material. The electronic structure changes associated with Co incorporation could result in a shift of the absorption edge to longer wavelengths, leading to a decrease in absorption in the specified range. Additionally, the

introduction of cobalt ions into Ti sites may lead to crystal field effects. The local environment around the Co ions can influence the energy levels of the transition metal d orbitals, impacting the electronic transitions and, consequently, the absorption spectrum. Moreover, cobalt incorporation could induce local structural distortions around the substituted sites. These distortions may alter the electronic and optical properties of the TiO_2 lattice, contributing to changes in absorption characteristics.

To evaluate the effect of Co contribution to TiO_2 on the band gap, the direct allowed transition energy band gap values of the pure TiO_2 and the Co:TiO_2 have been determined by using the $(\alpha h\nu)^2$=f(hν) Tauc's plots given in Figure 5(b). The direct optical band gap (E_g) has been calculated by Eq. (1):

$$(\alpha h\nu)^2 = A\left[E - E_g\right] \quad (1)$$

where α is the absorption coefficient, $E=h\nu$ represents the energy of incoming photon, and A is the coefficient of proportionality. The estimated direct optical band gap value of the samples has also been listed in Figure 5(b). As shown in Figure 5(b), The E_g values of all Co-doped samples are greater than the E_g value of pure TiO_2 thin film, and the highest band gap value has been recorded as 3.01 eV at the value of 3% Co doping.

The increase in the calculated optical band gap suggests a modification of the electronic band structure of the TiO_2:Co thin films. This modification could be due to the introduction of Co atoms into Ti sites, leading to changes in the energy levels and electronic transitions. On the other hand, the fluctuation in the optical band gap implies many factors may co-operate on the optical band gap (Jianjun Tian et al. 2012). According to Toyosaki et al. (H. Toyosaki et al.,2005) and Hirose et al. (Y. Hirose et al., 2006) when Ti site is substituted by Co, this can increase the optical band gap. In the increase in the optical band gap may also be attributed to the relevant substitution. Furthermore, as was reported the increase in E_g may be related to the enhancement of compressive stress due to Co doping. The possibility of occurrence of increased compressive stress had already been mentioned by Shi et al. (J. Y. Shi et al.,2006).

According to Shi et al., this could be attributed to the larger ionic radius of Co^{2+} (65 pm) compared to Ti^{4+} (60.5 pm), which creates a variable octahedral ligand field in TiO_2. Consequently, the stress resulting from lattice distortion contributes to an increase in Fermi energy and the energy of the lower edge of the conduction band (J. Y. Shi et al., 2006). Moreover, the slight decrease in absorption accompanying increasing band gap may indicate some changes in charge carier dynamics. The addition of Co might be affecting the efficiency of charge separation and migration, leading to a reduction in the number of electrons available for absorption. Furthermore, the higher band gap can be the result in a decrease in the generation of electron-hole pairs upon exposure to light. This may be attributed to changes in the electronic structure that affect the photoexcitation process in the Co:TiO_2 samples. When evaluated in terms of technological applications, the increase in the band gap value of TiO_2 due to Co doping can make TiO_2 more suitable for applications requiring UV detection.

This is important in fields such as UV sensing, imaging, and monitoring, where the ability to detect ultraviolet light is essential. Moreover, TiO_2 with an increased band gap can be used in protective coatings and films that can block harmful UV radiation while allowing visible light to pass through.

To determine the influence of Co doping on the refractive index (n) of the pure TiO_2 thin film, the transmittance and reflectance spectra of the samples shown in Figure 6(a) and (b), respectively have also been examined. While the transmittance (T) and absorbance (A) values of the samples have been measured with UV-Vis spectrometer.

Reflectance values have been calculated according to Eq. (2):

$$R = 1 - A - T \quad (2)$$

While all other Co-doped thin films, except 4% Co-doped TiO_2, have higher transmittance values than pure TiO_2 in the 350-700 nm wavelength range; it has lower transmittance values at wavelengths larger than 700 nm. However, higher transmittance was observed in the 4% Co doped sample than pure TiO_2 in the entire wavelength range studied. Based on this point, it can be thought that 4% Co contribution is the most suitable concentration for better transparency for TiO_2 compared to other additives. On the other hand, except for 4% Co doping, the decrease in transmittance values and increase in absorbance values of TiO_2 thin film in the 700-1100 nm range with Co doping can be attributed to the increased optical density in the crystal lattice with the doping. Namely, the presence of Co ions in the TiO_2 lattice may increase the optical density of the material, particularly in the near-IR region. This increased optical density can result in higher absorption and lower transmittance. Additionally, the transmittance values of all samples tended to increase when changing from the UV region to the near-IR region.

Considering the reflectance changes given in Figure 6(b), while the 1% Co-doped sample received reflectance

values almost close to pure TiO_2 in the 350-700 nm range; with increasing Co contribution, lower reflectance values were recorded in the same wavelength range compared to the pure TiO_2. At lower Co concentrations (1% doping), the influence of Co on the band structure of TiO_2 can be minimal, resulting in reflectance values similar to pure TiO_2.

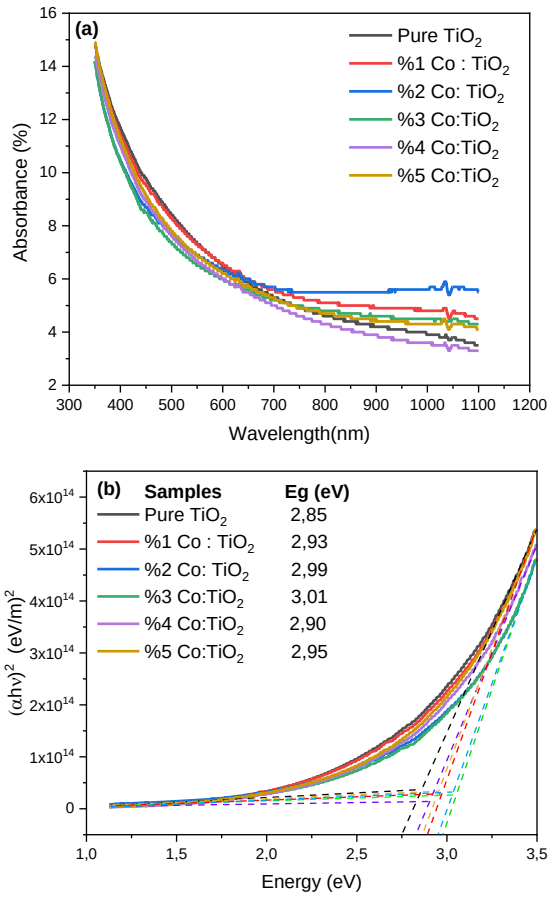


Figure 5 (a). UV-Vis light absorption spectra and **(b)** versus Energy curves of the samples

As Co concentration increases, the change of the band structure can become more important, leading to changes in optical properties and lower reflectance. When shifting to the near-IR region, reflectance values continued to decrease with increasing wavelength for all samples; however, except for the 4% Co added sample, the reflectance values for the other samples were higher than the pure TiO_2. The decrease in reflectance values in the near-infrared (NIR) region for most samples, except the 4% Co-doped sample, may be related to the introduction of energy levels by Co dopants that enhance NIR transparency.

By using reflectance values (*R*), the refractive index of the samples has been calculated by Eq. (3) (Thombare J.V. et al. 2013, Lohar G.M. et al. 2014).

$$n = \frac{1 + R + \sqrt{R}}{1 - R} \tag{3}$$

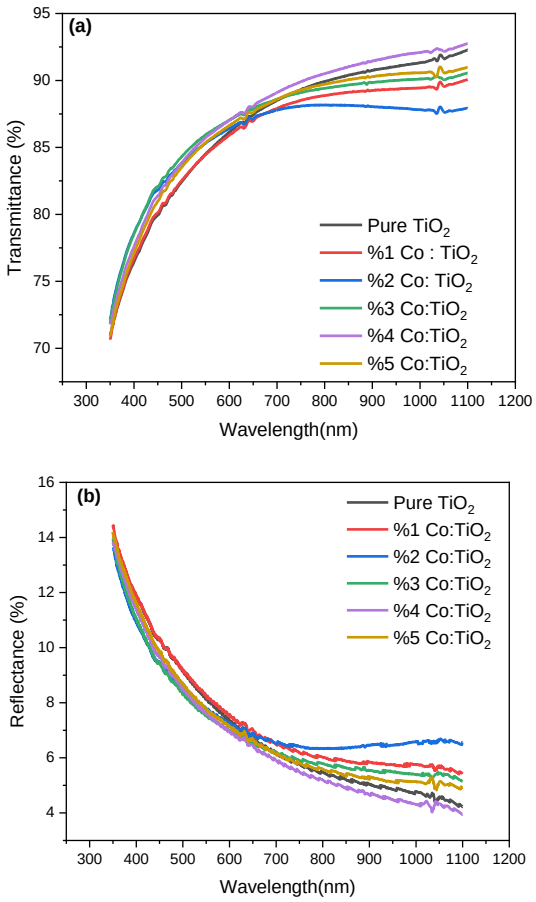


Figure 6. UV-Vis light **(a)** transmission and **(b)** reflectance spectra of the samples.

As shown in Figure 7, due to the Co contribution to the TiO_2, refractive indices higher than those of the pure TiO_2 film have been experimentally determined for light up to 500 nm wavelength. However, when the incident light is 800 nm and above, the refractive indexes for Co contributions excluding the 4% Co contribution, have been determined to be lower than the value of pure TiO_2. This behavior can be explained by the fact that the presence of cobalt could induce structural changes in the TiO_2 lattice, affecting its optical properties differently at various wavelengths. These changes may result in a wavelength-dependent refractive index behavior. Additionally, since cobalt may exhibit absorption characteristics that differ from TiO_2, particularly at longer wavelengths, this absorption could lead to a reduction in the effective refractive index.

3.3. Photo-degradation Properties of the 3% Co-doped TiO_2 thin films with Ruthenium dye coating under 412 nm Light Illumination

In the first part of the experimental study, the widest optical band gap was detected as 3.01 eV in the Co:TiO_2 thin film samples with 3% Co doping. Starting from this point, the second part of the experimental study is devoted to examining the optical properties of 3% Co:TiO_2

thin film by photo-degradation. For photo-degradation, the relevant sample has been aged by light with a wavelength of 412 nm, which corresponds to the bad gap energy of the sample, for a period ranging from 20 minutes to 1 hour.

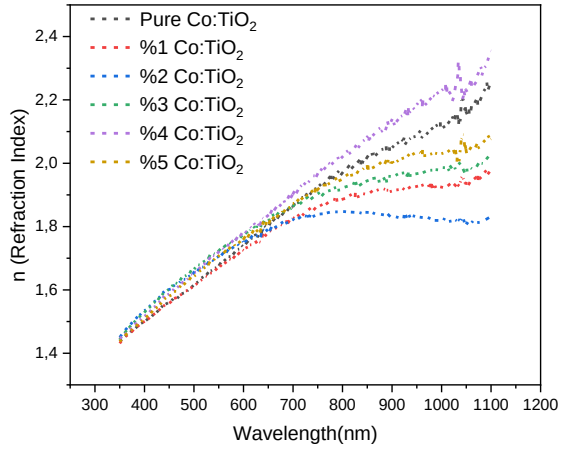


Figure 7. The variations of refractive index of the samples with wavelength.

For comparison, photo-degradation processes have been carried out for three different samples: glass coated with ruthenium dye as a thin film (coded as RD), glass coated with 3% Co:TiO_2 thin film (coded as 3% Co:TiO_2), and glass coated with ruthenium dye on 3% Co:TiO_2 thin film (coded as 3% Co:TiO_2/RD). Then the absorbance and transmittance spectra of the samples aged with 412 nm light for 20, 30, 40, and 60 minutes have been measured between 350-1100 nm wavelength range by UV-Vis spectrometer. The absorbance spectra of the three samples aged with 412 nm light for 20, 30, 40, and 60 minutes along with non-aged ones have been shown in the panels of Figure 8.

As shown in Figure 8(a), before the ruthenium dye-coated glass is illuminated with 412 nm light, it has two absorption peaks in the absorbance spectrum, one centered at 390 nm and the other centered at 540 nm. The absorption bands observed at 390 nm and 540 nm can be attributed to a metal-to-ligand charge transfer (Abdulraheem S. A. Almalki et al. 2021, Puhong Wen et al. 2012).

On the other hand, it has been determined that the center of the absorbance peaks did not change in the absorbance spectrum obtained after illumination with 412 nm light for 20 minutes. Still, the absorbance intensity increased for both peaks (see Figure 8(a)).

The transmittance spectra of the three samples aged with 412 nm light for 20, 30, 40, and 60 minutes along with non-aged ones have been shown in the panels of Figure 9. As shown in Figure 9(a), before the ruthenium dye-coated glass is illuminated with 412 nm light, the transmittance spectrum has two troughs, one at 390 nm and the other at 540 nm, due to charge transfer. After 20 minutes of illumination, the transmittance slightly decreases across the entire wavelength range, indicating easier electron excitation. Figure 9(c) demonstrates that the transmittance of the 3% Co-doped TiO2/RD thin films rises when exposed to 412 nm light, in contrast to the films that remain unexposed.

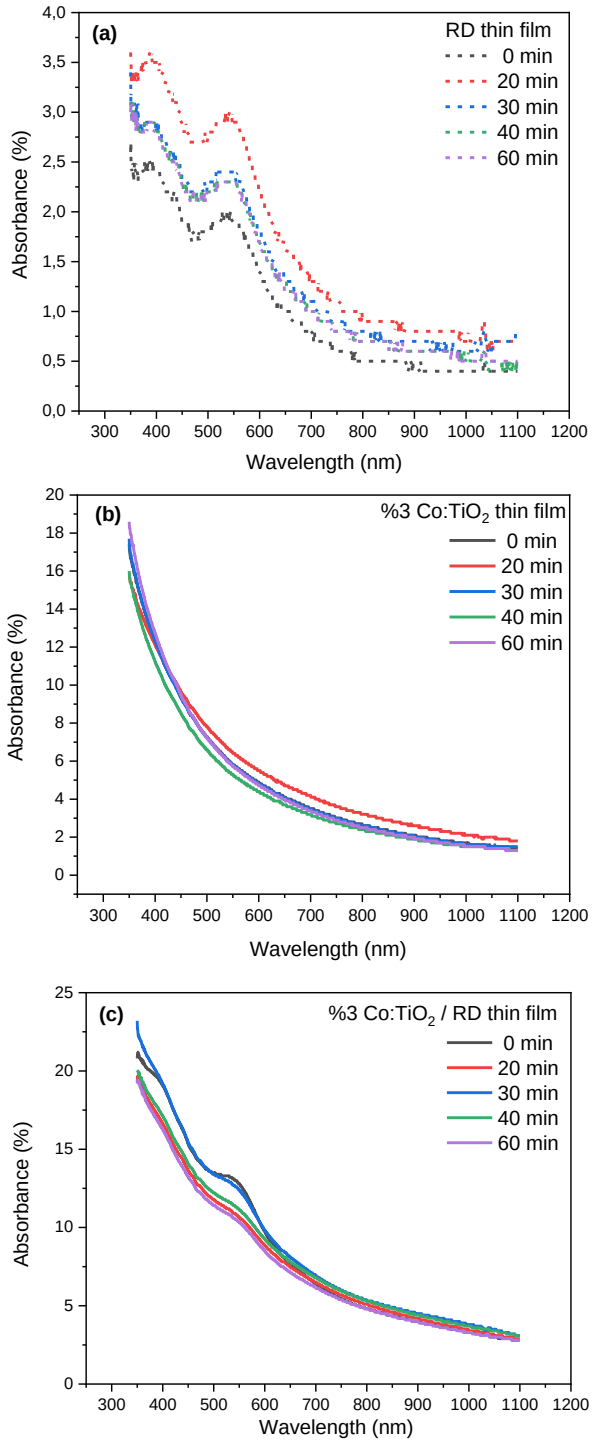


Figure 8. The variations of absorbance spectra of the samples (a) RD thin film (b) %3 Co:TiO_2 thin film (c) %3 Co:TiO_2/RD thin film under 412 nm light illumination at different time durations.

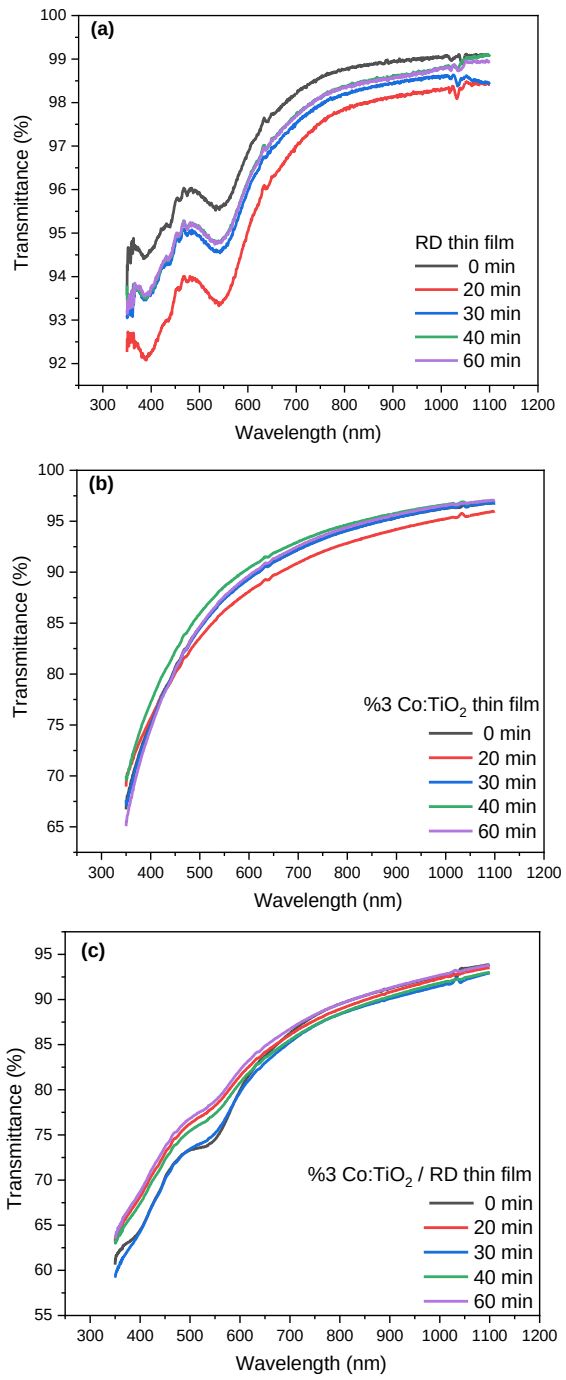


Figure 9. The variations of transmittance spectra of the samples (a) RD thin film (b) %3 Co:TiO_2 thin film (c) %3 Co:TiO_2/RD thin film under 412 nm light illumination at different time durations.

4.Conclusions

Pure and cobalt-doped TiO_2 thin films have been synthesized by using the sol-gel method at room temperature.

The increase in absorbance values means that electrons are excited more easily after illuminating the film with 412 nm light. Considering the absorbance spectrum of 3% Co:TiO_2 coated thin films on glass given in Figure 8(b), it has been observed that the absorbance increased slightly in the entire measured wavelength range after 20 minutes of light illumination. Figure 8(c) clearly shows that the absorption values of the 3% Co-doped TiO_2/RD thin films decrease in the range of 390 nm to 540 nm compared to both the films that were not exposed to light and those exposed to 412 nm light.

The synthesis involved the acid hydrolysis of TTIP and cobalt chloride, with cobalt concentrations varying at 1%, 2%, 3%, 4%, and 5%. It has been shown that pure TiO_2 thin films crystallize in the anatase phase and granules of different geometries are formed on the film surface. The optical parameters of the pure and cobalt-doped TiO_2 thin films have been characterized by UV-Vis spectroscopy. The study demonstrated that as the concentration of cobalt dopant increased, the absorption, transmission, and reflection of the TiO_2 thin films also changed. Moreover, an increase in cobalt concentration led to a reduction in the band gap. All thin films showed increased transmittance when moving from the UV to the NIR region. The results indicated that the cobalt additive significantly enhanced photo-degradation. To optimize this effect, thin films have been exposed to 412 nm light, matching the band gap edge, for durations between 20 minutes and 1 hour. It has been observed that the positions of absorbance peaks remained stable in the spectrum, while a slight increase in absorbance occurred after 20 minutes of illumination at 412 nm.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Experimental Design, Investigation, Methodology and Experiment, Writing – original draft, Verification, Visualization Analysis, Review and Editing – original draft, References.

Author-2: Experiment, Writing – original draft, Visualization, Writing – original draft, References.

Author-3: Investigation, Project Management, Visualization, Writing – original draft, Review and Editing – original draft, References.

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

5.References

Abdulraheem, S. A., Almalki, A., Shoair, A. G., Badawi, A., Al-Baradi, A. M., Atta, A. A., Algarni, S. A., Khalifa, M. E., & Alfaifi, S. Y. M. (2021). Enhancement of the open-circuit voltage of the dye-sensitized solar cells using a modified ruthenium dye. *Applied Physics A*, 127, 171. https://doi.org/10.1007/s00339-021-04952-7

Albaidani, K., Timoumi, A., Belhadj, W., Alamri, S. N., Ahmed, S. A. (2023). Structural, electronic, and optical characteristics of TiO2 and Cu-TiO2 thin films produced by sol-gel spin coating. *Ceramics International,* 49(22, Part B), 36265-36275. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.309

Bhat T.S., Shinde S.S., Bhat V.S., Patil P.S. (2021). Hydrothermal synthesis of one-dimensional, rutile TiO_2 nanograss arrays for photoelectrochemical solar cell. *Materials Today: Proceedings*, 43, 4, 2814-2819. ISSN 2214-7853. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.556

Bakr N.A., Ali A.K., & Jassim M.S. (2017). Fabrication and Efficiency Enhancement of Z907 Dye Sensitized Solar Cell Using Gold Nanoparticles. *Journal of Advanced Physics,* 6, 370-374. https://doi.org/10.1166/jap.2017.1336

Barakat M.A., G. Hayes, S. Ismat Shah, (2005). Photocatalytic and optical properties of TiO2 thin films. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology,* 5, 759. https://doi.org/10.1166/jnn.2005.190

Cai, Z. S., Jing, X. H., & Ding, X. Y. (2011). Structural and optical characteristics of TiO2 and Cu-TiO2 thin films produced by sol-gel spin coating. *Spectroscopy Letters*, 44, 203. https://doi.org/10.1080/00387010701311762

Choudhury, B., & Choudhury, A. (2012). Luminescence characteristics of cobalt doped TiO2 nanoparticles. *Journal of luminescence*, *132*(1), 178-184. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2011.08.020

Das, K., Sharma, S. N., Kumar, M., & De, S. K. (2009). Morphology dependent luminescence properties of Co doped TiO2 nanostructures. *The Journal of Physical Chemistry C*, *113*(33), 14783-14792. https://doi.org/10.1021/jp9048956

Toyosaki, H., Fukumura, T., Yamada, Y., & Kawasaki, M. (2005). Evolution of ferromagnetic circular dichroism coincident with magnetization and anomalous Hall effect in Co-doped rutile TiO2. Applied Physics Letters, 86(18). https://doi.org/10.1063/1.1922569

Hamadanian, M., Reisi Vanani, A., & Majedi, A. (2010). Optical properties and photocatalytic activity of TiO2 thin films. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 7, 52. https://doi.org/10.1007/s13738-020-01976-8

He, G., Zhang, L. D., Li, G. H., Liu, M., Wang, X. J. (2008). Structural and optical properties of TiO2 thin films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41, 045304. https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/4/045304

Hirose, Y., Hitosugi, T., Furubayashi, Y., Kinoda, G., Inaba, K., Shimada, T., Hasegawa, T. (2006). Intrinsic Faraday spectra of ferromagnetic rutile $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$. *Applied physics letters*, *88, 252508*. https://doi.org/10.1063/1.2213517

Jianjun, T., Hongmei, D., Lin, S., Hui, K., Pingxiong, Y., & Junhao, C. (2012). Effects of Co doping on structure and optical properties of TiO2 thin films prepared by sol-gel method. *Thin Solid Films*, 520, 5179–5183. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.11.091

Lohar, G. M., et al. (2014). Structural, morphological, optical and photoluminescent properties of spray-deposited ZnSe thin film. *Journal of Semiconductors, 35*, 113001. https://doi.org/10.1088/1674-4926/35/11/113001

McIntyre, P. C., Summerfelt, S. R., & Maggiore, C. J. (1997). Photoelectric properties of TiO2 thin films. *Applied Physics Letters*, 70, 711. https://doi.org/10.1063/1.118674

Mishra V., Warshi M.K., Sati A., Kumar A., Mishra V., Kumar R., & Sagdeo P.R. (2019). Investigation of temperature-dependent optical properties of TiO2 using diffuse reflectance spectroscopy. *SN Applied Sciences,* 1:241. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0253-6

Praveen, P., Viruthagiri, G., Mugundan, S., & Shanmugam, N. (2014). Structural, optical and morphological analyses of pristine titanium di-oxide nanoparticles–Synthesized via sol–gel route. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 117, 622-629. https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.09.037

Scirè S.,Fiorenza R., Bellardita M., Palmisano L., (2021). Catalytic applications of TiO_2, In Metal Oxides, Titanium Dioxide (TiO_2) and Its Applications. *Elsevier,* Pages 637-679, ISBN 9780128199602, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819960-2.00006-7

Sehrish N., Wang E., Feng H., and Li Z. (2022). Functionalization of TiO_2 for Better Performance as Orthopedic Implants. *Materials* 15, 19: 6868. https://doi.org/10.3390/ma15196868

Shi, J. Y., Leng, W. H., Zhu, W. C., Zhang, J. Q., & Cao, C. N. (2006). Electrochemically Assisted Photocatalytic Oxidation of Nitrite over Cr-Doped TiO2 under Visible Light. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, *29*(1), 146-154. https://doi.org/10.1002/ceat.200500236

Stella, C., Prabhakar, D., Prabhu, M., Soundararajan, N., & Ramachandran, K. (2016). Oxygen vacancies induced room temperature ferromagnetism and gas sensing properties of Co-doped TiO2 nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27, 1636–1644. https://doi.org/10.1007/s10854-016-4168-2

Simonetti E.V.N, Oliveira T.C., Machado A.C.E., Silva A.A.C., Santos A.S., Cividanes L.S. (2021). TiO_2 as a gas sensor: The novel carbon structures and noble metals as new elements for enhancing sensitivity – A review, *Ceramics International*, 47, 13,17844-17876 https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.189

Simpson, J. R., & Drew, H. D. (2004). Magnetic properties of TiO2 thin films. *Physical Review B*, 69, 193205.

https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.193205

Thombare, J. V., et al. (2013). The effects of electron irradiation on the optical properties of the organic semiconductor polypyrrole. *Journal of Semiconductors, 34*(9), 093001. https://doi.org/10.1088/1674-4926/34/9/093001

Wen, P., Han, Y., & Zhao, W. (2012). Influence of TiO2 nanocrystals on the absorption spectra of N719 sensitizer in dye-sensitized solar cells. International Journal of Photoenergy, 2012, Article ID 906198. https://doi.org/10.1155/2012/906198

Wan, J., Xu, L. H., Pan, H., Wang, L. M., & Shen, Y. (2021). Green water-based fabrication of SiO2–TiO2 aerogels with superhydrophobic and photocatalytic properties and their application on cotton fabric. *Journal of Porous Materials*, *28*(5), 1501-1510. https://doi.org/10.1007/s10934-021-01089-x

Yamada, Y., Ueno, K., Fukumura, T., Yuan, H. T., Shimotani, H., Iwasa, Y., Gu, L., Tsukimoto, S., Ikuhara, Y., & Kawasaki, M. (2011). Optical properties of TiO2 thin films. *Science*, 332, 1065. https://doi.org/10.1126/science.1198047

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1597059
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 031201 (471-476)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 031201 (471-476)

Alüminyum Tespiti için Kullanılabilecek Kinolin Temelli Yeni Schiff Bazı Sentezi, Karakterizasyonu ve Florimetrik Çalışmaları

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 06.12.2024
Kabul/Accepted: 16.01.2025
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Synthesis, Characterization and Fluorimetric Studies of a New Quinoline Based Schiff Base Using for Detection Al^{3+}

Meliha KUTLUCA ALICI*
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, BOR Meslek Yüksekokulu, Laborant Veteriner Sağlık Bölümü, Niğde, Türkiye

Öz
Bu çalışmada ilk olarak fluoresans sensör özelliği incelenecek yeni bir Schiff bazı (HQ-BT) bileşiğinin sentezi gerçekleştirilmiş ve yapısı ^{1}H-NMR ve ^{13}C-NMR yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Daha sonra bu Schiff bazı türü HQ-BT bileşiğinin çeşitli metal iyonları (Al^{3+}, Cd^{2+}, Li^{+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Fe^{2+}, Zn^{2+}, Mn^{2+}, Ba^{2+}, Hg^{2+}, Fe^{3+}, Mg^{2+}, Cu^{2+}, Ag^{+}) ile fluoresans emisyon özellikleri incelenmiştir. Çalışılan metal iyonları içerisinde sadece Al^{3+} metaline karşı önemli derecede fluoresans emisyon (yaklaşık 100 kat artış) verdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak HQ-BT bileşiği ile Al^{3+} metalinin 1:1 oranında kompleksleşme yaptığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler *Schiff bazı; NMR; Al^{3}; Fluoresans sensör*

Abstract
In this study, firstly, the synthesis of a new Schiff base (**HQ-BT**) compound, to be used as a fluorescence sensor, was carried out and its structure was characterized by 1H-NMR and 13C-NMR methods. Then, the fluorescence emission properties of this Schiff base HQ-BT compound with various metal ions (Al^{3+}, Cd^{2+}, Li^{+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Fe^{2+}, Zn^{2+}, Mn^{2+}, Ba^{2+}, Hg^{2+}, Fe^{3+}, Mg^{2+}, Cu^{2+}, Ag^{+}) were investigated. The metal ions studied; it was determined that only Al^{3+} metal gave significant fluorescence emission (approximately 100-fold increase). It was then found that the new HQ-BT compound gave a significant fluorescence emission (about 100-fold increase) only towards Al^{3+} metal among the metal ions used. Consequently, it was determined that HQ-BT compound and Al^{3+} metal complexed at a ratio of 1:1.

Keywords *Schiff base; NMR; Al^{3}; Fluorescence sensor*

1. Giriş

Alüminyum metali yer kabuğunda bol miktarda bulunan metal iyonlarından biridir (Baral *et al.* 2008, Jali and Baruah 2014, Anand *et al.* 2018, Das *et al.* 2013, Sahana et al. 2013, Bhardwaj *et al.* 2021). Bu sebepten dolayı; havacılık, otomobil, bilgisayar, paketleme malzemeleri, elektrik ekipmanları, gıda katkı maddeleri, bina inşaatı, klinik ilaçlar ve su arıtma gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Gupta and Kumar 2016, Kim *et al.* 2012, Liu *et al.* 2016, Pu *et al.* 2016, Xing *et al.* 2022, Mohanty *et al.* 2022, Khan *et al.* 2021, Krewski *et al.* 2007). Aşırı alüminyum maruziyetinin insanlarda Parkinson, Alzheimer, kronik böbrek yetmezliği, böbrek hasarı ve kemik yumuşaması gibi çeşitli rahatsızlıklara neden olduğu literatürde bulunmaktadır (Silva *et al.* 1997, Jeong and Yoon 2012, Bissell *et al.* 1992, Krewski *et al.* 2007, Exley 2013). Dolayısıyla alüminyum metalinin varlığının tespit edilmesi oldukça önemlidir. Alüminyum metalinin tespit edilmesi için elektrokimyasal yöntemler, kütle spektroskopisi (MS), izotop kromotografisi gibi geleneksel yöntemler vardır (Xing *et al.* 2022, Chen *et al.* 2017). Bu geleneksel yöntemler her ne kadar doğru sonuçlar verse de bazı zorluklar içermekle beraber yetersiz tespit limiti gibi sınırlamalarda oluşturmaktadır. Ayrıca bu geleneksel yöntemlerin işlemlerinin zahmetli ve maliyetli olmasının yanında nitelikli personele, pahalı cihazlara ihtiyaç duyması en büyük olumsuzluklarındandır (Peng *et al.* 2022, Roy *et al.* 2021, Sidqi *et al.* 2022, Li *et al.* 2021). Son yıllarda bu geleneksel yöntemlere alternatif olarak fluoresans sensörler bilim insanları tarafından oldukça ilgi görmektedir. Diğer yöntemler ile kıyaslandığında fluoresans sensörler kimyasal modifikasyon kolaylığı, düşük maliyeti, kolay uygulanabilirliği, kalitatif ve kantitatif veri sağlaması gibi avantajlar sağlamaktadır (Peng *et al.* 2022, Liang *et al.* 2015, Kang *et al.* 2016, Erdemir *vd.* 2020, AL-Saeedi *et al.* 2023). Bu çalışmada, ilk olarak 8-hidroksi kinolin kullanılarak 7-karbaldehit-8-hidroksikinolin (HQA) sentezi literatüre uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Zeng *et al.* 2006). Sentezi gerçekleştirilen HQA bileşiği ile 2-aminotiyofenol arasında gerçekleştirilen kondensasyon reaksiyonu sonucu yeni 8-hidroksikinolin temelli Schiff bazı türevi (HQ-BT) elde edilmiştir. Elde edilen yeni bileşiğin kimyasal yapısı ^{1}H-NMR ve ^{13}C-NMR spektroskopik yöntemler kullanılarak

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Meliha Kutluca ALICI
e-posta / e-mail: melihakutlucaalici@gmail.com

aydınlatılmıştır. Kimyasal yapısı doğrulanan yeni Schiff bazı türevi (HQ-BT) bileşiğinin fluoresans çalışmaları DMSO/H_2O (v/v; 3/7) ortamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda bazı metal katyonları (Al^{3+}, Cd^{2+}, Li^{+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Fe^{2+}, Zn^{2+}, Mn^{2+}, Ba^{2+}, Hg^{2+}, Fe^{3+}, Mg^{2+}, Cu^{2+}, Ag^{+}) arasından sadece Al^{3+} katyonuna karşı renksizden parlak yeşil renge doğru bir fluoresans emisyonu verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda HQ-BT bileşiğinin Al^{3+} tespit limiti (LOD) 2.61 µM gibi düşük bir değer bulunmuştur. Sonuç olarak bu çalışmada ortamlardaki Al^{3+} metalinin tespiti için kolay ve basit bir floresans probun sentezi gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Analitik kalitede ticari olarak temin edilebilen 8-hidroksi kinolin ve 2-aminotiyofenol Sigma-Aldrich'ten satın alınmıştır. Çalışmada katyonların perklorat tuzları kullanılmıştır. 7-karbaldehit-8-hidroksikinolin (HQA) bileşiğinin sentezi literatür bilgilerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Zeng, et al., 2006). Sentezlenen bileşiklerin yapıları NMR (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, Bruker Ascend™ 400) spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Emisyon spektrumları Edinburgh Instruments FS5 floresan spektrofotometre ile elde edilmiştir. Erime noktası Stuars SMP3 melting point cihazı kullanılarak tespit edilmiştir.

2.1 7-(((2-merkaptofenil)imino)metil)kinolin-8-ol (HQ-BT) Sentezi

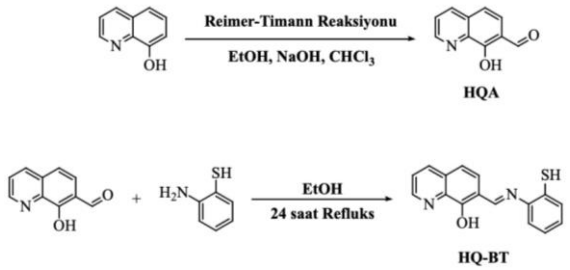
50,00 mg (0,288 mmol) HQA bileşiği 30 mL susuz etanol içerisinde çözüldü. Bu çözelti üzerine 44 mg (0,35 mmol) 2-aminotiyofenol bileşiğinin 10 mL etanol içerisindeki çözeltisi ilave edildi. Elde edilen karışım 24 saat geri soğutucu altında karıştırıldı. Reaksiyon süresi tamamlandıktan sonra karışım oda koşullarına kadar soğutuldu. Oluşan sarı çökelti süzüldü ve etanol ile iyice yıkandıktan sonra vakumlu etüvde kurutuldu.

Verim: 44%; 36 mg.
Erime Noktası: 272-273 ^{o}C;
^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$): δ 9.63 (dd, *J* = 8.7, 1.5 Hz, 1H, OH), 8.78 (dd, *J* = 4.2, 1.5 Hz, 1H, CH=N), 8.06 (m, 1H, Aromatik CH), 7.94 (dd, *J* = 7.8, 4.5 Hz, 1H, Aromatik CH), 7.87 (m, 1H, Aromatik CH), 7.55 (dd, *J* = 8.7, 4.2 Hz, 1H, Aromatik CH), 7.44 (m, 1H, Aromatik CH), 7.35 (m, 1H, Aromatik CH), 7.08 (d, *J* = 0.6 Hz, 1H, Aromatik CH), 7.06 (d, *J* = 1.6 Hz, 1H, Aromatik CH), 6.64 (m, 1H, Aromatik CH).

^{13}C NMR (100 MHz, $CDCl_3$): δ 167.33 (CH=N), 156.76 (Arm. C), 149.22(Arm. C), 138.90(Arm. C), 135.07(Arm C.), 134.38(Arm C.), 132.46(Arm. C), 131.61(Arm. C), 127.01(Arm. C), 126.60(Arm. C), 125.87(Arm. C), 123.93(Arm. C), 122.39(Arm. C), 116.89(Arm C.), 111.63(Arm. C).

3. Bulgular

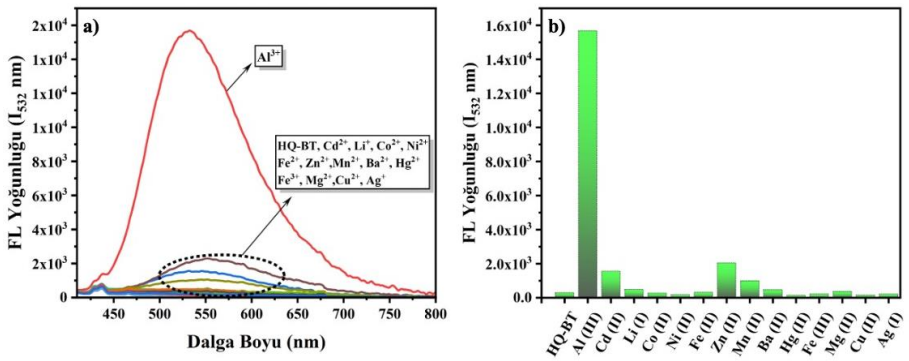
Bu çalışmada ilk olarak fluoresans çalışmalarında kullanılacak olan başlangıç maddesi 7-karbaldehit-8-hidroksikinolin (HQA) bileşiğinin sentezi literatür bilgilerine göre gerçekleştirilmiştir. Daha sonra son ürün olan Schiff bazı bileşiği 7-(((2-merkaptofenil)imino)metil)kinolin-8-ol (HQ-BT) sentezi uygun şartlar altında gerçekleştirilmiştir. HQ-BT bileşiğinin kimyasal yapısı spektroskopik yöntemler (^{1}H-NMR ve ^{13}C-NMR) kullanılarak aydınlatılmıştır. HQ-BT bileşiğinin ^{1}H-NMR spektrumu incelendiğinde HQA bileşiğinin 10.14 ppm' de çıkan aldehit (CHO) pikinin kaybolması ve bunun yerine 8.78 ppm' de Schiff bazı (CHN) pikinin varlığı gözlenmiştir. Tüm sentez şeması şekil 1 de verilmiştir.



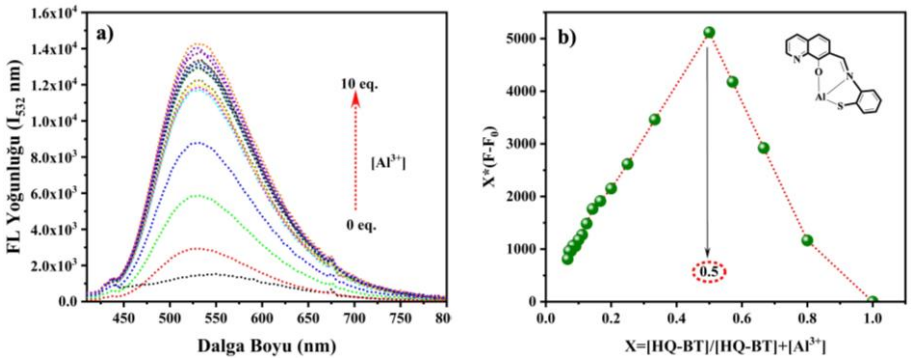
Şekil 1. Bileşik HQA ve HQ-BT Sentezi

Sentezlerin başarılı şekilde gerçekleştirilmesinden sonra HQ-BT Schiff bazı bileşiğinin fluoresans çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaları gerçekleştirmek için ilk olarak HQ-BT bileşiğinin ve kullanılan tüm metallerin (Al^{3+}, Cd^{2+}, Li^{+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Fe^{2+}, Zn^{2+}, Mn^{2+}, Ba^{2+}, Hg^{2+}, Fe^{3+}, Mg^{2+}, Cu^{2+}, Ag^{+}) stok çözeltileri hazırlanmıştır. Fluoresans çalışmalarının hassasiyetinden dolayı hazırlanan stok çözeltiler direkt olarak kullanılmamıştır. Fluoresans çalışmalarında HQ-BT bileşiğinin 10 µM çözeltisi DMSO/H_2O (v/v:3/7) karışımda hazırlanarak kullanılmıştır. Fluoresans çalışmalarında ilk olarak HQ-BT bileşiğinin herhangi bir metal iyonuna karşı seçici olup olmadığının çalışması yapılmıştır. Bunun için tüm metal iyonları ile ayrı ayrı olarak fluoresans çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada görüldüğü üzere tüm metal iyonları varlığında sadece Al^{3+} metal iyonuna karşı bir fluoresans emisyonu görülmektedir (Şekil 2). Bu durum HQ-BT bileşiğinin sadece Al^{3+} metaline karşı fluoresans seçicilik gösterdiğinin kanıtıdır.

HQ-BT bileşiğinin Al^{3+} metal iyonlarına karşı fluoresans olarak seçiciliğinin tespitinden sonra HQ-BT ile Al^{3+} arasındaki etkileşimi daha ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bunun için HQ-BT ile Al^{3+} metalinin fluoresans titrasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

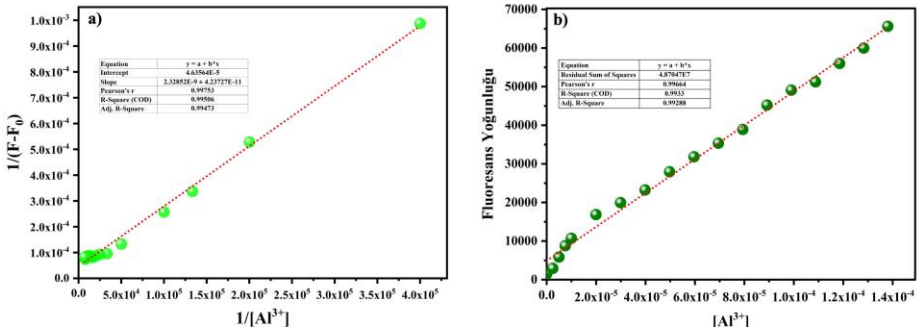


Şekil 2. a) HQ-BT'nin farklı metal iyonları varlığında fluoresans grafiği (λ_{ex}: 380 nm; Ex-Slit: 2, Em-Slit: 2; λ_{em}: 532 nm) b) HQ-BT'nin farklı metaller varlığında fluoresans seçicilik kolon grafiği.



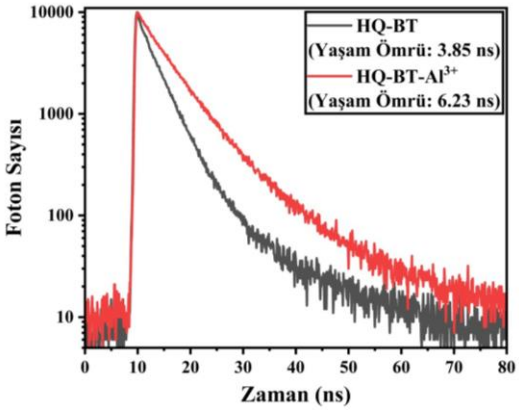
Şekil 3. a) HQ-BT'nin farklı konsantrasyonlarda Al^{3+} varlığında fluoresans titrasyon grafiği (λ_{ex}: 380 nm; Ex-Slit: 2, Em-Slit: 2; λ_{em}: 532 nm) b) HQ-BT-Al^{3+} kompleksinin JOB Plot's Grafiği.

(Şekil 3a). Titrasyon grafiğinden de görüldüğü gibi belli bir konsantrasyonda (10 eşdeğer) Al^{3+} ilavesi sonucu kompleksleşmenin doyuma ulaştığı görülmektedir. Bu noktadan sonra ilave edilen Al^{3+} metali HQ-BT bileşiğinin emisyon yoğunluğunda ciddi bir değişime neden olmadığı görülmektedir. HQ-BT ile Al^{3+} arasındaki kompleksleşme oranının ne olduğunu belirlemek için fluoresans titrasyon verileri kullanılmış ve Sürekli Değiştirme Metodu (JOB Metodu) ile gerçekleştirilmiştir. JOB yöntemine göre grafiğin tepe noktası 0,33 değerine karşılık gelmesi L-M (1:2), 0,5 değeri L-M (1:1), 0,66 değeri ise L-M (2:1) kompleksleşmeyi göstermektedir. Çalışmanın JOB grafiğinden de görüldüğü gibi HQ-BT-Al^{3+} arasındaki kompleksleşmenin (1:1) olduğu görülmektedir (Şekil 3b). Yine fluoresans titrasyon verileri kullanılarak HQ-BT ile Al^{3+} metal iyonunun bağlanma sabiti Benesi-Hildebrand eşitliği kullanılarak hesaplanmış ve bağlanma sabiti Ka değeri 1.99 x 10^4 M^{-2} olarak bulunmuştur (Şekil 4a). Ayrıca HQ-BT' nin Al^{3+} metal iyonlarını tespit limiti (LOD) 3s/k eşitliği kullanılarak hesaplamıştır. Bu eşitlikte s: standart sapma, k: fluoresans titrasyon grafiğinin eğimini ifade etmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda HQ-BT' nin Al^{3+} iyonlarını tespit limiti (LOD) 2.91 µM olarak bulunmuştur (Şekil 4b). Dünya sağlık örgütüne (WHO) göre içme sularında Al^{3+} iyon konsantrasyonunun maksimum 7.41 µM olması gerekmektedir (Carlos *et al.* 2020, Boonkitpatarakul *et al.* 2016). Sentezlenen yeni fluoresans sensör HQ-BT WHO'nun kabul ettiği konsantrasyonların çok daha altında olan konsantrasyonlardaki Al^{3+} iyonlarını dahi tespit edebilme özelliğine sahiptir.



Şekil 4. a) HQ-BT-Al^{3+} (1:1) kompleksine ait Benesi-Hildebrand grafiği b) Farklı konsantrasyonlarda Al^{3+} metaline karşı 532 nm' de HQ-BT' nin fluoresans emisyon şiddet grafiği.

Tüm bu çalışmalar ek olarak fluoresans sensör bileşikleri için çok önemli olan yaşam ömrü (Lifetime) çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 5' de görüldüğü gibi hem HQ-BT bileşiğinin hem de HQ-BT-Al^{3+} kompleksinin yaşam ömrü grafiği birlikte verilmiştir. Buradaki veriler ışığında HQ-BT için yaşam ömrü 3.85 ns, HQ-BT-Al^{3+} için yaşam ömrü ise 6.23 ns olarak hesaplanmıştır. Buna göre HQ-BT-Al^{3+} kompleksinin daha kararlı bir yapıda olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. HQ-BT ve HQ-BT-Al^{3+} nın Yaşam Ömrü (Lifetime) grafiği

4. Sonuçlar ve Tartışma

Sonuç olarak bu çalışmada yeni bir florimetrik sensör (HQ-BT) bileşiğinin sentezi kolay ve basit bir şekilde başarıyla gerçekleştirilmiş ve yapısı karakterize edilmiştir. ^{1}H-NMR spektrumları incelemesi sonucu HQA bileşiğinde gözlenen 10.14 ppm' deki aldehit piki HQ-BT bileşiğinin ^{1}H-NMR spektrumunda gözlenmemiştir. Aldehit pikinin yerine 8.64 ppm' de Schiff bazı pikinin varlığı da HQ-BT bileşiğinin başarılı şekilde sentezlendiğinin kanıtıdır. Sentez aşamasının kolaylığı ve hızla elde edilebilmesi başlı başına bir avantaj sağlamaktadır. Özellikle birçok katyonun içerisinde sadece Al^{3+} metaline karşı ciddi bir emisyon artışı (yaklaşık 100 kat) göstermiştir. Ayrıca HQ-BT Schiff bazının Al^{3+} metal iyonları için çok düşük bir fluoresans tespit limitine (2.91 µM) sahip olması da oldukça önemlidir. Çalışmada çözelti ortamı olarak DMSO/H_2O (v/v 3/7) karışımın kullanılması HQ-BT fluoresans sensörün farklı ortamlarda (su, gıda, hücre vb.) bulunabilecek Al^{3+} metal iyonlarını tespit etmekte geleneksel yöntemlere nazaran daha fazlaca tercih edilmesine neden olacaktır. Son olarak bu çalışma sonuçlarının diğer bilim dallarındaki (mühendislik, tıp vb.) araştırmacılar tarafından farklı uygulamalarda kullanılmasına öncülük edebilecektir.

Etik Standartlar Beyanı

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmayı destekleyen Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi' ne teşekkür ederim.

5. Kaynaklar

AL-Saeedi, A., Aydin, D., & Alici, O. (2023). "Lighting up" fluorescence precise recognition of Al^{3+} with an effective fluorescence detection using a Bisphenol A-based sensor. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,* **294**, 122532. https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.122532.

Anand, T., Ashok Kumar, S., & Sahoo, S. K. (2018). A new Al^{3+} selective fluorescent turn-on sensor based on hydrazide-naphthalic anhydride conjugate and its application in live cells imaging. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,* **204**, 105-112. https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.06.033.

Baral, M., Sahoo, S., & Kanungo, B. (2008). Tripodal amine catechol ligands: A fascinating class of chelators for aluminium(III). *Journal of Inorganic Biochemistry,* **120** (8), 1581-1588. https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2008.02.006.

Bhardwaj, V., Bothra, S., Upadhyay, Y., & Sahoo, S. (2021). Cascade Detection of Pyridoxal 5'-Phosphate and Al^{3+} Ions Based on Dual-Functionalized Red-Emitting Copper Nanoclusters. *ACS Appl. Nano Mater.,* **4** (6), 6231–6238. https://doi.org/10.1021/acsanm.1c01019.

Bissell, R., Silva, A., Gunaratne, H., Lynch, P., Maguire, G., & Sandanayake, K. (1992). Molecular fluorescent signalling with 'fluor–spacer–receptor' systems: approaches to sensing and switching devices via supramolecular photophysics. *Chem. Soc. Rev.,* **21**, 187-195. https://doi.org/10.1039/CS9922100187.

Boonkitpatarakul, K., Wang, J., Niamnont, N., Liu, B., Mcdonald, L., Pang, Y., & Sukwattanasinitt, M. (2016). Novel Turn-On Fluorescent Sensors with Mega Stokes Shifts for Dual Detection of Al^{3+} and Zn^{2+}. *ACS Sensors,* **1**, 144-150, https:// doi.org/10.1021/acssensors.5b00136.

Carlos, F., Monteiro, R., Silva, L., Zanlorenzi, C., & Nunes, F. (2020). A highly selective acridine-based fluorescent probe for detection of Al^{3+} in alcoholic beverage samples. *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.,* **231**, 118119.

https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118119.

Chen, Y., Wei, T., Zhang, Z., Chen, T., Li, J., Qiang, J., . . . Chen, X. (2017). A Benzothiazole-Based Fluorescent Probe for Ratiometric Detection of Al^{3+} in Aqueous Medium and Living Cells. *nd. Eng. Chem. Res.,* **56** (43), 12267–12275. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02979.

Das, S., Dutta, M., & Das , D. (2013). Fluorescent probes for selective determination of trace level Al^{3+}: recent developments and future prospects. *Anal. Methods,* **5**, 6262-6285. https://doi.org/10.1039/C3AY40982A.

Erdemir, S., Malkondu, S., & Kararkurt, S. (2020). Synthesis and cell imaging studies of an unusual "OFF–ON" fluorescent sensor containing a triazole unit for Al^{3+} detection via selective imine hydrolysis. *Analyst,* **145**, 3725-3731. https://doi.org/10.1039/C9AN02500F.

Exley, C. (2013). Human exposure to aluminium. *Environ. Sci.: Processes Impacts,* **15**, 1807-1816. https://doi.org/10.1039/C3EM00374D.

Gupta, A., & Kumar, N. (2016). A review of mechanisms for fluorescent "turn-on" probes to detect Al^{3+} ions. *RSC Adv.,* **6**, 106413–106434. https://doi.org/10.1039/c6ra23682k.

Jali, B., & Baruah, J. (2014). Fluorescence properties, aluminium ion selective emission changes and self-assemblies of positional isomers of 4-(hydroxyphenylthio)naphthalene-1,2-diones. *Dyes and Pigments,* **110**, 56-66. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2014.05.023.

Jeong, Y., & Yoon, J. (2012). Recent progress on fluorescent chemosensors for metal ions. *Inorganica Chimica Acta,* **381**, 2-14. https://doi.org/10.1016/j.ica.2011.09.011.

Kang, L., Xing, Z.-Y., Ma, X.-Y., Liu, Y.-T., & Zhang, Y. (2016). A highly selective colorimetric and fluorescent turn-on chemosensor for Al^{3+} based on naphthalimide derivative. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,* **167**, 59-65. https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.05.030.

Khan, S., Chen, X., Almahri, A., Allehyani, E., Alhumaydhi, F., Ibrahim, M., & Ali, S. (2021). Recent developments in fluorescent and colorimetric chemosensors based on schiff bases for metallic cations detection: A review. *J. Environ. Chem. Eng.*, **9**, 106381. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106381.

Kim, S., Noh, J., Kim, K., Kim, J., Kang, H., Nam, S., . . . Kim, J. (2012). Salicylimine-based fluorescent chemosensor for aluminum ions and application to bioimaging. *Inorg. Chem.*, **51**, 3597–3602. https://doi.org/10.1021/ic2024583.

Krewski, D., Yokel, R., Nieboer, E., Borchelt, D., Cohen, J., Harry, J., . . . Ron, V. (2007). Human Health Risk Assessment for Aluminium, Aluminium Oxide, and Aluminium Hydroxide. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B Critical Reviews,* **10** (1), 1-269. https://doi.org/10.1080/10937400701597766.

Li, R.-Y., Wei, Z.-L., Wang, L., Zhang, Y., & Ru, J.-X. (2021). A new salamo-based fluorescence probe to visually detect aluminum(III) ion and bio-imaging in zebrafish. *Microchemical Journal,* **162**, 105720. https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105720.

Liang, C., Bu, W., Li, C., Men, G., Deng, M., Jiangyao, Y., . . . Jiang, S. (2015). A highly selective fluorescent sensor for Al^{3+} and the use of the resulting complex as a secondary sensor for PPi in aqueous media: its applicability in live cell imaging. *Dalton Trans.,* **44**, 11352-11359. https://doi.org/10.1039/C5DT00689A.

Liu, B., Wang, P., Chai, J., Hu, X., Gao, T., Chao, J., . . . Yang, B. (2016). Naphthol-based fluorescent sensors for aluminium ion and application to bioimaging. *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, **168**, 98–103. https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.06.002.

Mohanty, P., Behura, R., Bhardwaj, V., Dash, P., Sahoo, S., & Jali, B. (2022). Recent advancement on chromo-fluorogenic sensing of aluminum(III) with Schiff bases. *Trends Environ. Anal. Chem.*, **34**, e00166. https://doi.org/10.1016/j.teac.2022.e00166.

Peng, S., Wang, H., Ding, H., Fan, C., Liu, G., & Pu, S. (2022). A high selective chemosensor for detection of Al^{3+} based on diarylethene with a hydrazide unit. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry,* **425**, 113718. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113718

Pu, S., Zhang, C., Fan, C., & Liu, G. (2016). Multi-controllable properties of an antipyrine-based diarylethene and its high selectivity for recognition of Al^{3+}. *Dye. Pigment.,* **129**, 24–33. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2016.02.001.

Roy, A., Nandi, M., & Roy, P. (2021). Dual chemosensors for metal ions: A comprehensive review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry,* **138**, 116204. https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116204.

Sahana, A., Banerjee, A., Lohar, S., Banik, A., Mukhopadhyay, S., Safin, D., . . . Das, D. (2013). FRET based tri-color emissive rhodamine–pyrene conjugate as an Al^{3+} selective colorimetric and fluorescence sensor for living cell imaging. *Dalton Trans.,* **42**, 13311-13314. https://doi.org/10.1039/C3DT51752G.

Sidqi, M., Abdel Aziz, A., Abolehasan, A., & Sayed, M. (2022). Photochemical processing potential of a novel Schiff base as a fluorescent probe for selective

monitoring of Al^{3+} ions and bioimaging in human cervical cancer HeLa cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry,* **424**, 113616. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.11361.

Silva, A., Gunaratne, H., Gunnlaugsson, T., Huxley, A., McCoy, C., Rademacher, J., & Rice, T. (1997). Signaling Recognition Events with Fluorescent Sensors and Switches. *Chem. Rev.,* **5**, 1515–1566. https://doi.org/10.1021/cr960386p.

Xing, Z., Wang, J., Huang, J., Chen, X., Zong, Z., Fan, C., & Huang, G. (2022). A Significant Fluorescence Turn-On Probe for the Recognition of Al^{3+} and Its Application. *Molecules,* **27**, 2569. https://doi.org/10.3390/molecules27082569.

Zeng, H.-P., OuYang, X.-H., Wang, T.-T., Yuan, G.-Z., Zhang, G.-H., & Zhang, X.-M. (2006). Synthesis, Crystal Structure, and Prediction of Hole Mobilities of 2,7'-Ethylenebis(8-hydroxyquinoline). *Crystal Growth & Design,* **6** (7), 1697-1702. https://doi.org/10.1021/cg060197s.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1511776
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 031301 (477-482)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 031301 (477-482)

Barnes-Mittag-Leffler Fonksiyonu ile İlişkili Spirallike Fonksiyonlar Sınıfının Sabordinasyon Özellikleri

***Makale Bilgisi / Article Info**
Alındı/Received: 10.07.2024
Kabul/Accepted: 05.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Subordination Properties of the Class of Spirallike Functions Associated with the Barnes-Mittag-Leffler Function

Şahsene ALTINKAYA*

İstanbul Beykent Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Mittag-Leffler fonksiyonunun ve genelleştirmelerinin mühendislik, fizik, biyoloji ve diğer uygulamalı bilimlerdeki doğrudan kullanımları daha fazla tanınmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra bu fonksiyonun analitik özelliklerinin araştırılmasına yönelik de birçok araştırma mevcuttur. Bu çalışmada, Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonu, Mittag-Leffler fonksiyonun bir genelleştirmesi, $E_{K,v}^{a}(z;s)=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{z^n}{\Gamma(Kn+v)(n+a)^s}$ $(z,s\in\mathbb{C},a,v\in\mathbb{C}\backslash\mathbb{Z}_0^-$ ve $Re(K)>0)$ araştırılmıştır. Ayrıca, Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonunu içeren spirallike fonksiyonlar sınıfının yeni bir alt sınıfı $S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ tanımlanmıştır. Tanımlanan $S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ sınıfı için sabordinasyon özellikleri incelenmiştir ve bu sınıfa ait fonksiyonlar için katsayı eşitsizlikleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Spirallike fonksiyon; Sabordinasyon; Konvolüsyon; Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonu*

Abstract

The applications of the Mittag-Leffler function and its generalizations in engineering, physics, biology, and other applied sciences have led to its increased recognition. In addition, numerous studies investigate the analytical properties of this function. In this study, we examine the Barnes-Mittag-Leffler function, a generalization of the Mittag-Leffler function, defined as $E_{K,v}^{a}(z;s)=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{z^n}{\Gamma(Kn+v)(n+a)^s}$, where $z,s\in\mathbb{C},a,v\in\mathbb{C}\backslash\mathbb{Z}_0^-$ and $Re(K)>0$. Further, a new subclass $S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ of spirallike functions involving the Barnes-Mittag-Leffler function is defined. Subordination properties are investigated for the newly defined class, and coefficient inequalities are obtained for functions belonging to this class.

Keywords: *Spirallike function; Subordination; Convolution; Barnes-Mittag-Leffler function*

1. Giriş

$\mathbb{C}$ kompleks düzlem olmak üzere, açık birim disk

$$\mathbb{D}=\{z\in\mathbb{C}:\ |z|<1\}$$

şeklinde tanımlanır. Bir D bölgesinde $f:D\to\mathbb{C}$ dönüşümü birebir ise f fonksiyonuna yalınkat fonksiyon denir. Geometrik olarak, düzlemde görüntü bölgesinin katlı bölge olmaması şeklinde yorumlanır.

Sürekli bir $f:D\to\mathbb{C}$ dönüşümü için aralarında α açısı bulunan, $z_0\in D$ noktasından geçen herhangi iki düzgün γ_1 ve γ_2 eğrilerinin; $f(\gamma_1)$ ve $f(\gamma_2)$ resim eğrilerinin de $W_0=f(z_0)$ noktasında aralarında yön ve büyüklük bakımından α açısı varsa f fonksiyonuna z_0 noktasında bir konform dönüşüm denir. Her $z_0\in D$ noktası için konformluk sağlanıyor ise f fonksiyonuna D bölgesinde konform dönüşüm denir.

Geometrik Fonksiyonlar Teorisi (GFT), 1851 yılında Riemann'ın kompleks düzlemin basit bağlantılı bir öz alt kümesini birim diske konform olarak resmeden bir f analitik fonksiyonunun varlığını ispat eden; "Riemann Dönüşüm Teoremi" olarak bilinen teoremiyle ortaya çıkmıştır (Riemann 1851). Analitik yalınkat fonksiyon, sıfırdan farklı türev değerlerine sahip olduğunda, geometrik olarak da basit eğrileri basit eğrilere dönüştürür. Bu durum, analitik yalınkat fonksiyonların, basit bağlantılı bölgeleri yine basit bağlantılı bölgelere dönüştürdüğü anlamına gelir. Dolayısıyla, Riemann Dönüşüm Teoremi gereği, yalınkat bir f fonksiyonunu herhangi bir basit bağlantılı bölgede incelemek yerine, $\mathbb{D}$ birim diskinde incelemek yeterlidir. Bu durumda $f(0)=0$ ve $f'(0)=1$ normalizasyon şartlarını sağlayan, $\mathbb{D}$ diskinde analitik f fonksiyonuna normalize edilmiş analitik fonksiyon denir. Normalize edilmiş analitik

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Şahsene Altınkaya e-posta / email: sahsenealtinkaya@gmail.com

fonksiyonlar sınıfı $\mathcal{A}$ ile gösterilir. Diğer yandan, her $f \in \mathcal{A}$ için

$$f(z) = z + a_2 z^2 + \cdots = z + \sum_{n=2}^{\infty} a_n z^n \quad (1)$$

şeklinde Taylor seri açılımı mevcuttur. Seri açılımındaki katsayıların fonksiyonun geometrik davranışı üzerinde etkili olması bu teoriyi önemli kılan en temel özelliklerinden biridir.

$\mathbb{D}$ diskinde normalize edilmiş yalınkat fonksiyonlar sınıfı $\mathcal{S}$ ile gösterilir. Aynı zamanda $\mathcal{S} \subset \mathcal{A}$ özelliği sağlanır. $\mathcal{S}$ sınıfına ait her analitik fonksiyon, kompleks düzlemde $\mathbb{D}$ diskini basit bağlantılı bir bölge üzerine konform ve birebir olarak dönüştürür. $\mathcal{S}$ sınıfının alt sınıflarının en önemlileri; yıldızıl, konveks, konvekse yakın, α-mertebeli yıldızıl, α-mertebeli konveks, spirallike fonksiyon sınıflarıdır.

$W_0 \neq 0$ karmaşık sayısı, $-\infty < p < \infty$ ve $\lambda \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ için logaritmik λ-spiral $\omega = W_0 exp(-e^{-i\lambda} p)$ şeklinde tanımlanan bir eğridir. Dolayısıyla $\omega = \omega(p)$ logaritmik λ-spiral ise $Im[e^{-i\lambda} log\omega(p)] = sabit$ olur. D orijini içeren bir bölge olmak üzere, her $\omega \neq 0$ için ω'dan çıkan λ-spiral yay orijinle birleşirse D bölgesine λ-spirallike bölge denir. Bu durumda, f fonksiyonu $\mathbb{D}$ diskinde yalınkat ve $f(\mathbb{D})$ λ-spirallike bölge olduğunda f fonksiyonu λ-spirallike olur. λ-spirallike fonksiyonlar sınıfı $\mathcal{S}_\lambda$ ile gösterilir ve $\mathcal{S}_\lambda \subset \mathcal{S}$ özelliği sağlanır. Bu tanım analitik olarak "$f \in \mathcal{A}$ fonksiyonunun $\mathcal{S}_\lambda$ sınıfına ait olması için gerek ve yeter şart $Re\left(e^{i\lambda} \frac{zf'(z)}{f(z)}\right) > 0$ olmasıdır" şeklinde ifade edilir (Spacek 1933). A-mertebeli λ-spirallike fonksiyonlar ise $Re\left(e^{i\lambda} \frac{zf'(z)}{f(z)}\right) > A\cos\lambda$ eşitsizliği ile tanımlanır ve bu fonksiyonlar sınıfı $\mathcal{S}_\lambda(A)$ ile gösterilir (Libera 1967).

Bazı özel fonksiyonlarla ilişkili analitik fonksiyon sınıflarının geometrik özelliklerinin incelenmesi, matematiksel araştırmalar için önemli bir alandır. Özellikle Mittag-Leffler fonksiyonu bu alanda geniş çapta incelenmiş ve birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Daha sonra yapılan çalışmalarda Mittag-Leffler fonksiyonu ve genelleştirmeleri kesirli mertebeden diferansiyel denklemler veya kesirli mertebeden integral denklemlerin çözümünde ortaya çıkmıştır (Gorenflo *et al*. 2018). Bu alandaki en bilinen sonuç 1930 yılında Hille ve Tamarkin tarafından kanıtlanan, Mittag-Leffler fonksiyonunun Riemann-Liouville kesirli integralini çözen açık bir formülüdür. Dolayısıyla, bu fonksiyon uygulamalı matematik ve mühendislik bilimlerinin çeşitli dallarında etkin rol oynar (Gorenflo and Mainardi 1997, Kilbas and Saigo 1996, Mehrez *et al*. 2023, Srivastava and Tomovski 2009).

Mittag-Leffler fonksiyonunun Geometrik Fonksiyonlar Teorisi'nde kullanımı 2016 yılına dayanmaktadır. Fonksiyon, Bansal ve Prajabat tarafından normalize edilerek $\mathbb{D}$ diskinde yalınkatlık, yıldızıllık ve konvekslik gibi bazı geometrik özellikleri incelenmiştir (Bansal ve Prajabat 2016). Daha sonra, Mittag-Leffler fonksiyonunu içeren yalınkat fonksiyon sınıfları tanımlanmıştır. Bu sınıflara ait fonksiyonlar için sabordinasyon ve konvolüsyon koşulları, katsayı tahminleri gibi problemler incelenmiştir.

Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonu, Mittag-Leffler fonksiyonu ile yakından ilişkilidir ve bu fonksiyonlar kesirli analiz, yaklaşım teorisi ile bilimin ve mühendisliğin çeşitli dallarında kritik bir rol oynar. Giriş bölümünde, ilgili literatürde bu konunun önemi, Mittag-Leffler fonksiyonununn matematiksel ve uygulamalı alanlardaki rolü ifade edilmiştir. Materyal ve Metot bölümünde, Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonu, çalışmada kullanılan yöntemler, ihtiyaç duyulan lemmalar detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Ayrıca Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonunu içeren $\mathcal{E}_{K,v}^{a} f$ operatörü yardımıyla spirallike fonksiyonların yeni bir alt sınıfı $S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ tanımlanmıştır. Bulgular bölümünde, $f \in \mathcal{A}$ fonksiyonunun $S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ sınıfına ait olma şartları, katsayı eşitsizlikleri ve bu sınıf için sabordinasyon özellikleri verilmiştir. Sonuçlar ve Tartışma bölümünde ise, elde edilen bulgular literatürdeki mevcut bilgilerle karşılaştırılmıştır. Bulguların uygulamaları ve gelecekteki çalışmalar için matematiksel öneriler sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde, normalize edilmiş Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonunun tanımı verilecek ve bu fonksiyonun özelliklerini incelemek için kullanılan matematiksel yöntemler ayrıntılı olarak sunulacaktır.

Tanım 2.1 $\mathbb{D}$ diskinde analitik ve $\forall z \in \mathbb{D}$ için $w(0) = 0$, $|w(z)| < 1$ şartlarını sağlayan w fonksiyonuna Schwarz fonksiyonu denir (Goodman 1984).

Schwarz fonksiyonlarının sınıfı Ω ile gösterilir.

Tanım 2.2 $\mathbb{D}$ diskinde analitik f_1 ve f_2 fonksiyonları için

$$f_1(z) = f_2(w(z)), \quad (z \in \mathbb{D})$$

eşitliğini sağlayan bir $w \in \Omega$ fonksiyonu varsa f_1, f_2 fonksiyonuna sabordinedir denir (Goodman 1984).

Bu sabordinasyon işlemi $f_1 \prec f_2$ ile gösterilir.

Tanım 2.3 f_1 fonksiyonu (1) formunda ve $f_2(z) = z + \sum_{n=2}^{\infty} b_n z^n \in \mathcal{A}$ olmak üzere

$$f_1(z) * f_2(z) = (f_1 * f_2)(z) = z + \sum_{n=2}^{\infty} a_n b_n z^n$$

ifadesine Hadamard çarpımı (konvolüsyon) denir.

Tanım 2.4 $D \subset \mathbb{C}$ olmak üzere her $z_1, z_2 \in D$ için z_1 noktasını z_2 noktasına birleştiren doğru parçası tamamen D kümesi içinde kalıyorsa D kümesine konveks küme denir. $\mathbb{D}$ diskini konveks bir kümeye resmeden fonksiyona konveks fonksiyon denir (Pommerenke 1975).

Konveks fonksiyonlar sınıfı C ile gösterilir.

Teorem 2.5 $f_2 \in \mathcal{S}$ olsun. Bu durumda

$$f_2(z) \in C \Leftrightarrow Re\left(1 + \frac{zf_2''(z)}{f_2'(z)}\right) > 0$$

dir (Pommerenke 1975).

Tanım 2.6 Kompleks sayıların bir $\{t_n\}_{n=1}^{\infty}$ dizisine, eğer f_2 fonksiyonu $f_2(z) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n z^n$, $(b_1 = 1)$ şeklinde verilmişse ve $\mathbb{D}$ diskinde analitik, yalınkat ve konveks ise

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n t_n z^n \prec f(z),$$

koşulunu sağlayan bir sabordine faktör dizisi denir (Wilf 1961).

Lemma 2.7 $\{t_n\}_{n=1}^{\infty}$ dizisinin bir sabordine faktör dizisi olması için gerek ve yeter şart

$$Re\left(1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} t_n z^n\right) > 0$$

eşitsizliğinin sağlanmasıdır (Wilf 1961).

Mittag-Leffler fonksiyonu

$$E_K(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{\Gamma(Kn+1)}, \quad (z, K \in \mathbb{C}; K \geq 0)$$

şeklinde tanımlanır (Mittag Leffler 1903). Üstel fonksiyonun McLaurin seri açılımı göz önünde bulundurulduğunda, $E_K(z)$ üstel fonksiyonun bir genellemesidir. Dolayısıyla, $K = 1$ için üstel fonksiyon elde edilir. Ayrıca $E_K(z)$ bir parametreli Mittag-Leffler fonksiyonu olarak da adlandırılır. İki parametreli Mittag-Leffler fonksiyonu, Wiman tarafından $z, K, v \in \mathbb{C}, Re(K) > 0$ ve $Re(v) > 0$ olmak üzere

$$E_{K,v}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{\Gamma(Kn+v)}$$

olarak tanımlanmıştır (Wiman 1905). Yıllar içinde Mittag-Leffler fonksiyonu farklı şekillerde genelleştirilmiştir (Dorrego and Cerutti 2012, Garg *et al*. 2013, Gehlot 2018, Prabhakar 1997, Shukla and Prajapati 2007). $z, s \in \mathbb{C}$, $a, v \in \mathbb{C} \backslash \mathbb{Z}_0^-$ ve $Re(K) > 0$ olmak üzere, Mittag-Leffler fonksiyonunun en önemli genelleştirmelerden biri

$$E_{K,v}^a(z;s) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{\Gamma(Kn+v)(n+a)^s}$$

olarak tanımlanan Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonudur (Barnes 1906).

Bu fonksiyonların aralarındaki ilişki $E_{K,v}^a(z;0) = E_{K,v}(z)$, $E_{K,1}(z) = E_K(z)$ ve $E_1(z) = e^z$ eşitlikleri ile ifade edilir.

Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonu $E_{K,v}^a(z;s)$, $\mathcal{A}$ sınıfına ait olmadığından

$$\mathbb{E}_{K,v}^a(z;s) = a^s \Gamma(v) z E_{K,v}^a(z;s)$$
$$= z + \sum_{n=2}^{\infty} h_n^a(K,v,s) z^n$$

şeklinde normalize edilir (Alenazi and Mehrez 2023). Burada

$$h_n^a(K,v,s) = \frac{a^s \Gamma(v)}{\Gamma(Kn+v-K)(n+a-1)^s}$$

dir ve $\Gamma(.)$ notasyonu Gama fonksiyonunu belirtir. Böylece $f \in \mathcal{A}$ fonksiyonu için $\mathcal{E}_{K,v}^a f: \mathcal{A} \to \mathcal{A}$ operatörü

$$\mathcal{E}_{K,v}^a f(z;s) = \mathbb{E}_{K,v}^a(z;s) * f(z)$$
$$= z + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{a^s \Gamma(v)}{\Gamma(Kn+v-K)(n+a-1)^s} a_n z^n \tag{2}$$

elde edilir.

Bu çalışmada pozitif reel değerli a, K, s, v parametreleri ve $z \in \mathbb{D}$ koşulları ele alınmıştır. Bu bağlamda, $\mathcal{E}_{K,v}^a f$ operatörü ile spirallike fonksiyonların yeni bir alt sınıfı aşağıdaki şekilde tanımlanır.

Tanım 2.8 $0 \leq A < 1$ ve $|\lambda| < \frac{\pi}{2}$ olmak üzere

$$Re\left(e^{i\lambda} \frac{z(\mathcal{E}_{K,v}^a f(z;s))'}{\mathcal{E}_{K,v}^a f(z;s)}\right) > A cos\lambda$$

eşitsizliği sağlanırsa $f \in \mathcal{A}$ fonksiyonuna $S_{K,v}^a(A,\lambda)$ sınıfına ait denir.

3. Bulgular

Bu bölümde bir $f \in \mathcal{A}$ fonksiyonunun $S_{K,v}^a(A,\lambda)$ sınıfına ait olma koşulları, katsayı eşitsizlikleri ve bu sınıf için sabordinasyon özellikleri verilecektir.

Lemma 3.1 $f \in \mathcal{A}$, $0 \leq A < 1$, $|\lambda| < \frac{\pi}{2}$ ve $0 \leq \beta < 1$ şartını sağlayan bir β reel sayısı için

$$\left|\frac{z\left(\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)\right)'}{\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)} - 1\right| \leq 1 - \beta, \quad (z \in \mathbb{D}) \tag{3}$$

olsun. Bu durumda

$$|\lambda| \leq \cos^{-1}\left(\frac{1-\beta}{1-A}\right)$$

ise $f \in S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ dir.

İspat. Pozitif reel değerli a, K, s, v parametreleri, $0 \leq \beta < 1$ ve $z \in \mathbb{D}$ için (3) eşitsizliğinden

$$\frac{z(\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s))'}{\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)} = 1 + (1-\beta)w(z)$$

elde edilir. Bu eşitliğin her iki tarafı $e^{i\lambda}$ ile çarpılıp reel kısmı alınırsa

$$Re\left(e^{i\lambda}\frac{z\left(\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)\right)'}{\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)}\right) = Re\{e^{i\lambda}[1+(1-\beta)w(z)]\}$$
$$= cos\lambda + (1-\beta)Re\{e^{i\lambda}w(z)\}$$

bulunur. Tanım 2.1 kullanılarak

$$\geq cos\lambda - (1-\beta)\left|e^{i\lambda}w(z)\right|$$
$$> cos\lambda - (1-\beta)$$

eşitsizliği elde edilir. Tanım 2.8 göz önünde bulundurulduğunda eşitsizliğin sağ tarafından $cos\lambda - (1-\beta) = Acos\lambda$ elde edilir. Dolayısıyla, $|\lambda| \leq \cos^{-1}\left(\frac{1-\beta}{1-A}\right)$ sonucuna ulaşılır.

Lemma 3.2 $\left|\frac{z\left(\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)\right)'}{\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)} - 1\right| \leq (1-A)cos\lambda$ eşitsizliği sağlanırsa $f \in S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ dir.

İspat. Lemma 3.1'de $\beta = 1-(1-A)cos\lambda$ olarak alınırsa ispat tamamlanır.

Teorem 3.3 $f \in \mathcal{A}$, $0 \leq A < 1$ ve $|\lambda| < \frac{\pi}{2}$ olsun. Bu durumda

$$\sum_{n=2}^{\infty}\left(1+\frac{n-1}{1-A}\sec\lambda\right)h_n^a(K,v,s)|a_n| \leq 1 \tag{4}$$

ise f fonksiyonu $S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ sınıfındadır.

İspat. (4) ile verilen katsayı eşitsizliğini göstermek için Lemma 3.2 kullanılarak

$$\left|\frac{z\left(\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)\right)'}{\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)} - 1\right| = \left|\frac{z\left(\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)\right)' - \mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)}{\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)}\right|$$

eşitliği yazılır. (2) ile verilen $\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)$ operatörü yukarıdaki eşitlikte yerine yazılırsa

$$\left|\frac{z\left(\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)\right)' - \mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)}{\mathcal{E}_{K,v}^{a} f(z;s)}\right|$$

$$= \left|\frac{\sum_{n=2}^{\infty}(n-1)h_n^a(K,v,s)a_n z^{n-1}}{1-\sum_{n=2}^{\infty}h_n^a(K,v,s)a_n z^{n-1}}\right|$$

$$< \frac{\sum_{n=2}^{\infty}(n-1)h_n^a(K,v,s)|a_n||z|^{n-1}}{1-\sum_{n=2}^{\infty}h_n^a(K,v,s)|a_n||z|^{n-1}}$$

$$< \frac{\sum_{n=2}^{\infty}(n-1)h_n^a(K,v,s)|a_n|}{1-\sum_{n=2}^{\infty}h_n^a(K,v,s)|a_n|}$$

elde edilir. Lemma 3.2 yardımıyla, bu eşitsizlik

$$\sum_{n=2}^{\infty}(n-1)h_n^a(K,v,s)|a_n|$$
$$\leq (1-A)cos\lambda\left\{1-\sum_{n=2}^{\infty}h_n^a(K,v,s)|a_n|\right\}$$

olarak yazılır ve buradan

$$\sum_{n=2}^{\infty}\left(1+\frac{n-1}{1-A}\sec\lambda\right)h_n^a(K,v,s)|a_n| \leq 1$$

dir. Böylece ispat tamamlanır.

Sonuç 3.4 $f \in S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ olsun. Bu takdirde $H_n = [1-A+(n-1)\sec\lambda]h_n^a(K,v,s)$ olmak üzere

$$|a_n| \leq \frac{1-A}{H_n}, \quad (n \geq 2)$$

dir. $f(z) = z + \frac{1-A}{H_n}z^n$ fonksiyonu için eşitlik sağlanır.

Teorem 3.5 $f \in S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ ve $f_2 \in C$ olsun. Bu durumda

$H_2 = [1-A+\sec\lambda]h_2^a(K,v,s)$ olmak üzere

$$Re(f(z)) > -\frac{1-A+H_2}{H_2} \tag{5}$$

ve

$$\frac{H_2}{2(1-A+H_2)}(f*f_2)(z) \prec f_2(z) \tag{6}$$

dir.

İspat. $a_1 = 1$ olmak üzere Tanım 2.6 yardımıyla

$$\left\{\frac{H_2}{2(1-A+H_2)}a_n\right\}_{n=1}^{\infty}$$

dizisi ele alınsın. Bu dizi bir sabordine faktör dizisi ise denklem (6) sağlanır. Dolayısıyla Lemma 2.7 kullanılarak

$$Re\left(1+2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{H_2}{2(1-A+H_2)}a_n z^n\right) > 0$$

eşitsizliğini ispat etmek gereklidir. $|z| = r < 1$ için

$$Re\left(1+\frac{H_2}{1-A+H_2}\sum_{n=1}^{\infty}a_n z^n\right)$$

$$= Re\left\{1+\frac{H_2}{1-A+H_2}z+\frac{1}{1-A+H_2}\sum_{n=2}^{\infty}H_2 a_n z^n\right\}$$

$$\geq 1-\frac{H_2}{1-A+H_2}r$$

$$-\frac{1-A}{1-A+H_2}\sum_{n=2}^{\infty}\left(1+\frac{n-1}{1-A}\sec\lambda\right)h_n^a(K,v,s)|a_n|\,r^n$$

bulunur. Şimdi, denklem (4) yardımıyla

$$= 1-\frac{1-A+H_2}{1-A+H_2}r > 0$$

elde edilir. Böylece (6) denklemi sağlanır. Diğer yandan (6) denkleminde, özel olarak

$$f_2(z) = \frac{z}{1-z} = z+\sum_{n=2}^{\infty}z^n$$

konveks fonksiyonu alınırsa (5) eşitsizliği elde edilir. Yani,

$$\frac{H_2}{2(1-A+H_2)}f(z) \prec f_2(\mathrm{z})$$

$$\frac{H_2}{2(1-A+H_2)}Re\big(f(z)\big) > Re(f_2(\mathrm{z}))$$

$$\frac{H_2}{2(1-A+H_2)}Re\big(f(z)\big) > -\frac{1}{2}.$$

Şimdi, eşitlik için

$$F(z) = z-\frac{1-A}{1-A+H_2}z^2$$

fonksiyonu göz önüne alındığında, (6) denklemi yardımıyla

$$\frac{H_2}{2(1-A+H_2)}F(z) \prec \frac{z}{1-z}, \qquad (z \in \mathbb{D})$$

sabordinasyonu elde edilir. Buradan

$$\min_{|z|\leq r}\left[Re\left(\frac{H_2}{2(1-A+H_2)}F(z)\right)\right] = -\frac{1}{2}$$

dir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonunu içeren $\mathcal{E}_{K,v}^{a}f$ operatörü yardımıyla spirallike fonksiyonların yeni bir alt sınıfı $S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ tanımlanmıştır. Daha sonra $f \in \mathcal{A}$ fonksiyonunun bu yeni sınıfa ait olma şartları ve katsayı eşitsizlikleri incelenmiştir. Ayrıca, bu sınıf için sabordinasyon özellikleri de sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar, mevcut literatürdeki bulgularla karşılaştırıldığında önemli bir katkı sağlamaktadır. Literatürdeki çalışmalar (Alenazi and Mehrez 2023, Mehrez *et al*. 2023) $\mathbb{D}$ diskinde Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonunun yıldızıllık, düzgün yıllızıllık, güçlü yıldızıllık, konvekslik ve konvekslığe yakınlık gibi geometrik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada ise mevcut olan literatüre ek olarak $\mathcal{S}$ sınıfının bir alt sınıfı olan Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonunu içeren spirallike fonksiyonlar sınıfı tanımlanmış ve bu sınıfın çeşitli özellikleri incelenmiştir. Literatürde, Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonunu içeren $\mathcal{S}$ sınıfının herhangi bir alt sınıfı tanımlanmamıştır. Bu çalışma, bu alanda öncü bir niteliğe sahiptir.

Diğer yandan, a, s, K, v, A ve λ parametreleri için belirli özel değerler seçilerek, Mittag-Leffler fonksiyonu ve genelleştirmeleri için benzer sonuçlar elde edilebilir. Gelecekteki araştırmalar için $S_{K,v}^{a}(A,\lambda)$ sınıfına ait fonksiyonlar için Fekete-Szegö eşitsizlikleri ve Hankel determinantı çalışılabilir. Ayrıca, Barnes-Mittag-Leffler fonksiyonunu içeren daha geniş alt sınıflar tanımlanabilir ve incelenebilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, matematiksel analiz ve özellikle Geometrik Fonksiyonlar Teorisi (GFT)'nin gelişimine katkı sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu bulguların daha da geliştirilerek yeni uygulama alanları oluşturması beklenmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı
Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı
Makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edilecek hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği
Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

Alenazi, A. and Mehrez, K., 2023. Further Geometric Properties of the Barnes-Mittag-Leffler Function. *Axioms*, **13**(1), 1-14. https://doi.org/10.3390/axioms13010012

Bansal, D. and Prajapat, J.K., 2016. Certain geometric properties of the Mittag-Leffler functions. *Complex Variables and Elliptic Equations*, **61**(3), 338-350. https://doi.org/10.1080/17476933.2015.1079628

Barnes, E.W., 1906. The asymptotic expansion of integral functions defined by Taylor's series. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A,* **206**(402-412), 249-297. https://doi.org/10.1098/rsta.1906.0019

Dorrego, G.A. and Cerutti, R.A., 2012. The k-Mittag-Leffler function. *International Journal of Contemporary Mathematical Sciences*, ***7***(15), 705-716.

Garg, M., Manohar, P. and Kalla, S.L., 2013. A Mittag-Leffler-type function of two variables. *Integral Transforms and Special Functions*, **24**(11), 934-944. https://doi.org/10.1080/10652469.2013.789872

Gehlot, K.S., 2018. The p-k Mittag-Leffler function. *Palestine Journal of Mathematics*, **7**(2), 628-632.

Goodman, A.W., 1984. Univalent functions, Volume I and Volume II. Mariner Pub. Co. Inc. Tampa Florida.

Gorenflo, R., Kilbas, A.A., Mainardi, F. and Rogosin, S.V., 2020. Mittag-Leffler functions, related topics and applications, Berlin: Springer, 540 pages. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61550-8

Gorenflo, R. and Mainardi, F., 1997. Fractional calculus: Integral and differential equations of fractional order, In: A. Carpinteri, F. Mainardi (Eds), Fractals and Fractional Calculus in Continuum Mechanics, International Centre for Mechanical Sciences, Springer, Vienna, **378**, 223–276.

Kilbaş, A.A. and Saigo, M., 1996. On Mittag-Leffler type function, fractional calculas operators and solutions of integral equations. *Integral Transforms and Special Functions*, **4**, 355–370.

Libera, R. J., 1967. Univalent α-spiral functions. *Canadian Journal of Mathematics*, **19**, 449-456.

Mehrez, K., Das, S. And Kumar, A., 2023. Monotonicity properties and functional inequalities for the Barnes Mittag-Leffler function. *Miskolc Mathematical Notes*, **24**(2), 893-907. https://doi.org/10.18514/MMN.2023.3997

Mittag-Leffler, G.M., 1903. Sur la nouvelle fonction $E_a(x)$. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, **137**(2), 554-558.

Pommerenke, C. 1975. Univalent functions. *Vandenhoeck and Ruprecht*.

Riemann, B. 1851. Grundlagen für eine allgemeine Theorie der Functionen einer veranderlichen complexen Grösse. PhD Thesis, University of Göttingen, Germany.

Prabhakar, T.R., 1971. A singular integral equation with a generalized Mittag Leffler function in the kernel. *Yokohama Mathematical Journal, **19***(1), 7-15.

Shukla, A.K. and Prajapati, J.C., 2007. On a generalization of Mittag-Leffler function and its properties. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, **336**(2), 797-811. https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2007.03.018

Spacek, L., 1933. Contribution a la theorie fonctions univalentes. *Casopis Pro Pestovani Matematiky*, **62**, 12-19.

Srivastava, H.M. and Tomovski, Z., 2009. Fractional calculus with an integral operator containing a generalized Mittag-Leffler function in the kernel. *Applied Mathematics and Computation*, **211**, 198-210. https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.01.055

Wilf, H.S., 1961. Subordinating factor sequence for convex maps of the unit circle, *Proceedings of the American Mathematical Society*, **12**, 689-693.

Wiman, A., 1905. Über den Fundamentalsatz in der Theorie der Functionen $E_a(x)$. *Acta Mathematica,* **29**, 191–201.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1475288
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 031302 (483-488)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 031302 (483-488)

Lorentz-Minkowski 4-Uzayında Timelike Eğriler Tarafından Oluşturulan Tubular Hiperyüzeyler İçin Bazı Sınıflandırmalar

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 29.04.2024
Kabul/Accepted: 09.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Some Classifications for Tubular Hypersurfaces Generated by Timelike Curves in Lorentz-Minkowski 4-Space

Ahmet KAZAN*[1], Mustafa ALTIN[2]

[1] *Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Doğanşehir Vahap Küçük Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Malatya*
[2] *Bingöl Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Bingöl*

Öz

Bu çalışmada, 4-boyutlu Lorentz-Minkowski uzayı E_1^4 de timelike eğriler tarafından oluşturulan tubular hiperyüzeylerin Gauss dönüşümlerinin doğrusallaştırılmış operatörü L_0 ile ilgilendik. Bu bağlamda ilk olarak, E_1^4 de timelike eğriler tarafından oluşturulan tubular hiperyüzeylerin Gauss dönüşümlerinin L_0 operatörünü elde ettik. Ardından sırasıyla, genelleştirilmiş L_0 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip, birinci ve ikinci çeşit L_0-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip ve L_0-harmonik Gauss dönüşümüne sahip olan bu hiperyüzeyler için bazı sınıflandırmalar verdik.

Anahtar Kelimeler *Doğrusallaştırılmış L_0-operatörü; Gauss dönüşümü; Genelleştirilmiş L_0 1-tipli Gauss dönüşümü; Tubular hiperyüzeyler.*

Abstract

In this study, we are interested in the linearized operator L_0 of the Gaussian maps of tubular hypersurfaces formed by timelike curves in the 4-dimensional Lorentz-Minkowski space E_1^4. In this context, firstly we obtained the L_0 operator of the Gauss maps of the tubular hypersurfaces formed by timelike curves in E_1^4. After, we gave some classifications for these hypersurfaces, which have the generalized L_0 1-type Gauss map, the first kind and second kind L_0-pointwise 1-type Gauss map and the L_0-harmonic Gauss map, respectively.

Keywords *Linearized L_0-operator; Gauss map; Generalized L_0 1-type Gauss map; Tubular hypersurfaces.*

1. Giriş

Laplace-Beltrami operatörü nesne tanıma ve sınıflandırma, yapay zekâ ve makine öğrenmesi, yüzey modelleme ve grafik ile medikal görüntüleme gibi birçok alanda önemli uygulamalara sahiptir. Koordinat fonksiyonları Laplace operatörünün öz fonksiyonları olan alt manifoldların incelenmesi ve bunun birçok genellemesi, diferensiyel geometri için önemli bir araştırma alanıdır. E^{n+1} e gömülü bir M hiperyüzeyi ile ilişkili Laplacian operatörü, bir (içsel) ikinci dereceden doğrusal diferensiyel operatördür. Hiperyüzeyin normal değişimleri için bu operatörler, doğal olarak ortalama eğriliğin ilk değişiminin doğrusallaştırılmış operatörü olarak görülür. Laplace operatörü, bu açıdan bakıldığında n-tane operatörden oluşan bir $L_0 = \Delta$, L_1, L_2, ..., L_{n-1} dizisindeki ilk operatördür. Hiperyüzeyin normal değişimlerinden kaynaklanan $(k+1)$'inci ortalama eğriliğin birinci değişiminin doğrusallaştırılmış operatörü, bu dizide L_k ile gösterilir. Bu operatörler, M üzerinde diferensiyellenebilir bir f fonksiyonu için, $L_k(f) = iz(P_k o \nabla^2 f)$ eşitliğini sağlarlar. Hiperyüzeyin ikinci temel formuyla ilişkili k'yıncı Newton dönüşümü, f'nin Hessian'ına metrik olarak eşdeğer olan kendine eşlenik doğrusal operatör $\nabla^2 f$ ile temsil edilir ve bu dönüşüm P_k ile gösterilir. Özel olarak $k = 1$ ise, bu durumda L_1, Cheng-Yau operatörüdür.

Bu çalışmada tubular hiperyüzeyleri karakterize etmek için bu hiperyüzeylerimize uygulayacağımız Laplace-Beltrami operatörü, görüntü işleme ve bilgisayar grafikleri alanlarında özellikle yüzeylerin geometrik özelliklerinin analizini yaparak bu yüzeylerin temsillerini elde etmek için kullanılır. Bu bağlamda, 3-boyutlu bir nesnenin veya şeklin matematiksel bir temsilini oluşturmak için yazılım kullanma süreci olan 3B modelin pürüzsüzlüğünü veya kavisli bölgelerini belirlemek için kullanılabilen Laplace-Beltrami operatörü; bilgisayar grafikleri ve görüntü işleme alanlarında model oluşturmak, yüzeyleri segmente etmek, şekil benzerliğini karşılaştırmak ve sınıflandırmak için oldukça önemlidir. Ayrıca Laplace-Beltrami operatörü, biyomedikal mühendislikte, medikal görüntüleme verilerinin analizini yapmak için fazlasıyla kullanışlı bir araçtır. Örneğin, organ

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ahmet KAZAN e-posta/e-mail: ahmet.kazan@ozal.edu.tr

veya doku yüzeylerinin analizi ve segmentasyonu için, CT veya MRI taramalarından elde edilen 3B görüntülerinin işlenmesi için ve anatomik yapıların belirlenmesi için kullanılabilir.

Diferensiyel geometri için de önemli bir araştırma alanı olan manifoldlar üzerinde Laplacian operatörü ile ilgili olarak Takahashi, koordinat fonksiyonları Laplace operatörünün öz fonksiyonları olan ve aynı λ özdeğeri ile ilişkili olan Öklid uzayındaki izometrik daldırmaları incelemiştir. Takahashi, eğer $(n+k)$-boyutlu Öklid uzayında bir Riemannian n-manifoldunun bir $x: M \to R^{n+k}$ izometrik daldırması bazı sıfırdan farklı sabitler için $\Delta x = \lambda x$ şartını sağlıyorsa, bu durumda λ'nın pozitif olması ve x'in de R^{n+k} deki $\sqrt{n/k}$ yarıçaplı bir S^{n+k+1} küresine minimal bir daldırma gerçekleştirmesi gerektiğini göstermiştir. Tersine eğer x, R^{n+k} da yarıçapı r olan bir küreye minimal bir daldırma gerçekleştirirse, o zaman x'in, R^{n+k} de paralel bir yer değiştirmeye kadar $\Delta x = \lambda x$'i sağladığını ve $\lambda = n/r^2$ olduğunu ispatlamıştır (Takahashi 1966). 1990 yılında ise Garay, Takahashi'nin teoreminin daha genel bir halini oluşturmuştur (Garay 1990). Bu çalışmaların ardından, Laplacian operatörü yardımıyla çeşitli yüzeylere ait farklı sınıflamalar geometriciler tarafından elde edilmiştir (bkz. Chen ve Petrovic 1991, Dillen vd. 1990, Hasanis ve Vlachos 1992).

E^{n+1} e gömülü bir M hiperyüzeyi ile ilişkili Laplacian operatörü bir (içsel) ikinci dereceden doğrusal diferensiyel operatördür ve bu operatör $L_k(f) = iz(P_k o \nabla^2 f)$ ifadesinde $k = 0$ için sağlanır. Yine literatürde L_k doğrusallaştırılmış operatörleriyle ilgili ve özellikle de $k = 1$ için elde edilen Cheng-Yau operatörüyle ilgili pek çok çalışmaya rastlanmaktadır (bkz. Cheng ve Yau 1977, Güler ve Turgay 2019, Kazan vd. 2024a-2024b, Kelleci 2021, Kim vd. 2016, Lucas ve Ramirez-Ospina 2011, Tetsing 2021, Yang ve Liu 2009).

Biz de bu çalışmamızda, dört boyutlu Lorentz-Minkowski uzayı E_1^4 de timelike eğriler tarafından oluşturulan tubular hiperyüzeylerin Gauss dönüşümlerinin doğrusallaştırılmış operatörü L_0 (Laplacian operatör)'ı hesaplayarak bu tubular hiperyüzeyler için diferensiyel geometride önem teşkil eden bazı sınıflandırmalar elde ettik.

Bu bağlamda ilk olarak, ileriki bölümde kullanacağımız bazı temel bilgileri hatırlatalım.

E_1^{n+1}; indeksi 1, işareti $(-,+,+,\dots,+)$ olan ve E_1^{n+1} de dik koordinat sistemi $(x_1, x_2, \dots x_{n+1})$ olmak üzere $\langle\, , \rangle = -dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + \cdots + dx_{n+1}^2$ ile verilen pseudo-Öklidyen metriğiyle donatılmış $(n+1)$-boyutlu Lorentz-Minkowski uzayı olsun. Eğer $\Theta: M \to E_1^{n+1}$, n-boyutlu bir M yönlendirilebilir manifoldundan E_1^{n+1} e bir izometrik daldırma ise, bu takdirde Θ daldırması tarafından M üzerinde indirgenmiş metrik, Riemannian veya Lorentzian olabilir. Eğer $\mathcal{G}$ birim normal vektör alanı ve $\langle \mathcal{G}, \mathcal{G} \rangle = \varepsilon = \pm 1$ ise, bu takdirde $\varepsilon = 1$ iken M Lorentzian metrikle, $\varepsilon = -1$ iken de M Riemannian metrikle donatılmıştır.

$(n+1)$-boyutlu Lorentz-Minkowski uzayı E_1^{n+1} de M hiperyüzeyinin $\mathcal{G}$ Gauss dönüşümünün koordinat fonksiyonları üzerinde aksiyon alan L_k operatörü

$$L_k\mathcal{G} = -\varepsilon C_k(\nabla H_{k+1} + (nH_1H_{k+1} - (n-k-1)H_{k+2})\mathcal{G}) \quad (1.1)$$

eşitliği ile verilir. Burada

$$\binom{n}{k} H_k = (-\varepsilon)^k a_k, \quad \left(\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}\right) \quad (1.2)$$

dir, öyle ki

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= -\textstyle\sum_{i=1}^{n} \kappa_i, \\ a_k &= (-1)^k \textstyle\sum_{i_1<i_2<\cdots i_k}^{n} \kappa_{i_1}.\kappa_{i_2} \dots \kappa_{i_k},\ k = 2,3,\dots,n \end{aligned}\right\} \quad (1.3)$$

dir ve H_k'ya M'nin k-yıncı ortalama eğriliği denir. Ayrıca, C_k sabiti de

$$C_k = \binom{n}{k+1}(-\varepsilon)^k \quad (1.4)$$

formülü ile bulunur. Doğrusallaştırılmış L_k-operatörüyle ilgili detaylı bilgi için (Lucas ve Ramirez-Ospina 2011) kodlu kaynağa bakılabilir.

Diğer taraftan, eğer E_1^4 de yönlendirilmiş bir M altmanifoldunun $\mathcal{G}$ Gauss dönüşümü $L_k\mathcal{G} = f\mathcal{G} + gC$ şartını sağlıyorsa, M genelleştirilmiş L_k 1-tipli Gauss dönüşümüne sahiptir; eğer $L_k\mathcal{G} = f\mathcal{G}$ şartını sağlıyorsa, M birinci çeşit L_k-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahiptir; eğer $L_k\mathcal{G} = f(\mathcal{G} + C)$ şartını sağlıyorsa, M ikinci çeşit L_k-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahiptir ve eğer $L_k\mathcal{G} = 0$ şartını sağlıyorsa M'ye L_k-harmonik Gauss dönüşümüne sahiptir denir. Burada f ve g'ler M üzerinde sıfırdan farklı diferensiyellenebilir fonksiyonlar, $C \in E_1^4$ sıfırdan farklı bir sabit vektör ve $k \in \{1,2,3\}$'tür.

Biz bu çalışmada, 4-boyutlu Lorentz-Minkowski uzayı E_1^4 de tubular hiperyüzeyler ile ilgileneceğimizden dolayı, şimdi E_1^4 uzayı için bazı temel kavramları hatırlatalım.

E_1^4 de $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3, u_4)$, $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3, v_4)$ ve $\vec{w} = (w_1, w_2, w_3, w_4)$ üç vektör olsunlar. Bu durumda, iç çarpım ve vektörel çarpım, $\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ standart baz vektörleri olmak üzere, sırasıyla

$$\langle \vec{u}, \vec{v} \rangle = -u_1v_1 + u_2v_2 + u_3v_3 + u_4v_4 \quad (1.5)$$

ve

$$\vec{u}\times\vec{v}\times\vec{w}=det\begin{bmatrix}-e_1 & e_2 & e_3 & e_4\\ u_1 & u_2 & u_3 & u_4\\ v_1 & v_2 & v_3 & v_4\\ w_1 & w_2 & w_3 & w_4\end{bmatrix} \tag{1.6}$$

şeklinde tanımlanır. E_1^4 de bir $\vec{u}$ vektörüne, eğer $\langle\vec{u},\vec{u}\rangle>0$ (veya $\vec{u}=0$), $\langle\vec{u},\vec{u}\rangle<0$ veya $\langle\vec{u},\vec{u}\rangle=0$ ise, sırasıyla, spacelike, timelike veya lightlike (null) denir. E_1^4 de bir $\gamma(x)$ eğrisine ise spacelike, timelike veya lightlike (null) denir, eğer bu eğrinin tüm hız vektörleri $\gamma'(x)$, sırasıyla spacelike, timelike veya lightlike (null) iseler. Bir null olmayan (yani spacelike veya timelike) eğriye birim hızlıdır denir, eğer $\langle\gamma',\gamma'\rangle=\pm1$ ise. Ayrıca bir $\vec{u}$ vektörünün normu ise $\|\vec{u}\|=\sqrt{|\langle\vec{u},\vec{u}\rangle|}$ şeklindedir.

T,N,B_1,B_2 bir timelike $\gamma(x)$ eğrisinin sırasıyla, birim tanjant vektör alanı, asli normal vektör alanı, binormal vektör alanı, trinormal vektör alanı ve $\{T,N,B_1,B_2\}$ de E_1^4 de $\gamma(x)$ eğrisi boyunca hareketli Frenet çatısı olsun. Bu durumda, $\gamma(x)$ timelike eğrisi için $\langle T,T\rangle=-1$, $\langle N,N\rangle=\langle B_1,B_1\rangle=\langle B_2,B_2\rangle=1$ olmak üzere Frenet denklemleri,

$$\left.\begin{aligned}T'&=\kappa N,\\ N'&=\kappa T+\tau B_1,\\ B_1'&=-\tau N+\sigma B_2,\\ B_2'&=-\sigma B_1\end{aligned}\right\} \tag{1.7}$$

şeklindedir. Burada κ,τ ve σ, $\gamma(x)$ eğrisinin, sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü eğrilikleridir.

Ayrıca, M'de tanımlı bir $\psi(x,y,z)$ diferensiyellenebilir fonksiyonunun gradienti,

$$\nabla\psi=\frac{-1}{detg}\begin{pmatrix}\begin{pmatrix}(g_{23}^2-g_{22}g_{33})\psi_x\\ +(-g_{13}g_{23}+g_{12}g_{33})\psi_y\\ +(g_{13}g_{22}-g_{12}g_{23})\psi_z\end{pmatrix}\partial x\\ \begin{pmatrix}(-g_{13}g_{23}+g_{12}g_{33})\psi_x\\ +(g_{13}^2-g_{11}g_{33})\psi_y\\ +(-g_{12}g_{13}+g_{11}g_{23})\psi_z\end{pmatrix}\partial y\\ \begin{pmatrix}(g_{13}g_{22}-g_{12}g_{23})\psi_x\\ +(-g_{12}g_{13}+g_{11}g_{23})\psi_y\\ +(g_{12}^2-g_{11}g_{22})\psi_z\end{pmatrix}\partial z\end{pmatrix} \tag{1.8}$$

elde edilir. Burada

$$\begin{aligned}detg=&-g_{13}^2g_{22}+2g_{12}g_{13}g_{23}-g_{11}g_{23}^2-g_{12}^2g_{33}\\ &+g_{11}g_{22}g_{33};\end{aligned}$$

$\{x,y,z\}$, M'nin lokal koordinat sistemi; ψ_x,ψ_y,ψ_z ler ψ'nin kısmi türevleri ve $g_{11}=\langle\partial x,\partial x\rangle$, $g_{12}=\langle\partial x,\partial y\rangle$, $g_{13}=\langle\partial x,\partial z\rangle$, $g_{22}=\langle\partial y,\partial y\rangle$, $g_{23}=\langle\partial y,\partial z\rangle$ ve $g_{33}=\langle\partial z,\partial z\rangle$ dir.

2. E_1^4 de Timelike Eğriler Tarafından Oluşturulan Tubular Hiperyüzeyler İçin Bazı Sınıflandırmalar

Bu bölümde, öncelikle E_1^4 de timelike eğriler tarafınan oluşturulan tubular hiperyüzeylerle ilgili bazı hatırlatmalar yapılarak (bkz. Altın vd., 2023) bu hiperyüzeylerin Gauss dönüşümlerinin L_0 operatörü elde edilecektir. Ardından da bu hiperyüzeyler için genelleştirilmiş L_0 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olma, birinci çeşit L_0-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olma, ikinci çeşit L_0-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olma ve L_0-harmonik Gauss dönüşümüne sahip olma durumları için sonuçlar verilecektir.

E_1^4 de merkezleri bir timelike eğri üzerinde bulunan pseudo-hiperkürelerin bir ailesinin zarfı olarak oluşturulan $\mathcal{T}(x,y,z)$ tubular hiperyüzeyleri

$$\mathcal{T}(x,y,z)=\gamma(x)+\rho\begin{pmatrix}\cos y\cos z\ \ N(x)\\ +\sin y\cos z\ \ B_1(x)\\ +\sin z\ \ B_2(x)\end{pmatrix} \tag{2.1}$$

şeklinde parametrelendirilebilir. (2.1) numaralı tubular hiperyüzeyin birim normal vektör alanı

$$\mathcal{G}=-\begin{pmatrix}\cos y\cos z\ \ N(x)\\ +\sin y\cos z\ \ B_1(x)\\ +\sin z\ \ B_2(x)\end{pmatrix} \tag{2.2}$$

dir ve dolayısıyla

$$\langle\mathcal{G},\mathcal{G}\rangle=1 \tag{2.3}$$

dir. (2.1) numaralı tubular hiperyüzeyin birinci temel formunun katsayıları

$$\left.\begin{aligned}g_{11}&=(\rho\tau\cos y\cos z-\rho\sigma\sin z)^2\\ &\quad-(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2\\ &\quad+\rho^2(\tau^2+\sigma^2)\sin^2 y\cos^2 z,\\ g_{12}&=g_{21}=\rho^2(\tau\cos z-\sigma\cos y\sin z)\cos z\,,\\ g_{22}&=\rho^2\cos^2 z,\\ g_{13}&=g_{31}=\rho^2\sigma\sin y,\\ g_{23}&=g_{32}=0,\\ g_{33}&=\rho^2\end{aligned}\right\} \tag{2.4}$$

ve asli eğrilikleri ise

$$\left.\begin{aligned}\kappa_1&=\kappa_2=\frac{1}{\rho},\\ \kappa_3&=\frac{\kappa\cos y\cos z}{1+\rho\kappa\cos y\cos z}\end{aligned}\right\} \tag{2.5}$$

dir. (1.3) ve (2.5) numaralı denklemler kullanılırsa, (2.1) numaralı tubular hiperyüzey için a_k fonksiyonları

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= \frac{-2-3\rho\kappa\cos y\cos z}{\rho(1+\rho\kappa\cos y\cos z)}, \\ a_2 &= \frac{1+3\rho\kappa\cos y\cos z}{\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)}, \\ a_3 &= \frac{-\kappa}{\rho^2(\rho\kappa+\sec y\sec z)} \end{aligned}\right\} \tag{2.6}$$

olarak elde edilir. Ayrıca, (1.8) numaralı denklemde (2.4) ve (2.6) kullanılırsa

$$\nabla a_1 = \begin{pmatrix} \left(\frac{\cos z(\kappa\tau\sin y+\kappa'\cos y)}{(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^3}\right)T \\ +\left(\frac{\begin{pmatrix}-3+\cos(2y)\\+2\cos^2 y\cos(2z)\end{pmatrix}\kappa}{4r(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2}\right)N \\ +\left(\frac{\kappa\sin y\cos y\cos^2 z}{\rho(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2}\right)B_1 \\ +\left(\frac{\kappa\cos y\sin z\cos z}{\rho(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2}\right)B_2 \end{pmatrix} \tag{2.7}$$

şeklinde bulunur. Dolayısıyla, (1.1), (1.2), (1.4), (2.2), (2.3), (2.6) ve (2.7) numaralı eşitliklerden

$$L_0\mathcal{G} = \begin{pmatrix} \left(\frac{(\kappa\tau\sin y+\kappa'\cos y)\cos z}{(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^3}\right)T \\ +\left(\frac{8\cos y\cos z+\rho\kappa\begin{pmatrix}1+5\cos(2y)\\+10\cos^2 y\cos(2z)\\+12\rho\kappa\cos^3 y\cos^3 z\end{pmatrix}}{4\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2}\right)N \\ +\left(\frac{(2+3\rho\kappa\cos y\cos z)\sin y\cos z}{\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)}\right)B_1 \\ +\left(\frac{(2+3\rho\kappa\cos y\cos z)\sin z}{\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)}\right)B_2 \end{pmatrix} \tag{2.8}$$

olarak elde edilir. Şimdi, (2.1) numaralı tubular hiperyüzey için genelleştirilmiş L_0 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olma, birinci çeşit L_0-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olma, ikinci çeşit L_0-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olma ve L_0-harmonik Gauss dönüşümüne sahip olma durumları için sonuçlar verilecektir.

İlk olarak, (2.1) numaralı tubular hiperyüzey için genelleştirilmiş L_0 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olma durumunu, yani $L_0\mathcal{G} = f\mathcal{G} + gC$ durumunu $C = C_1F_1 + C_2F_2 + C_3F_3 + C_4F_4$ için ele alalım. Burada C'nin x'e göre türevini alırsak, (1.7)'den

$$\left.\begin{aligned} &C_1' + C_2\kappa = 0, \\ &C_2' + C_1\kappa - C_3\tau = 0, \\ &C_3' + C_2\tau - C_4\sigma = 0, \\ &C_4' + C_3\sigma = 0 \end{aligned}\right\} \tag{2.9}$$

olur. Ayrıca, C'nin y'ye ve z'ye göre de türevlerini alırsak, C'nin sadece x'ye bağlı olduğu görülebilir.

(2.2) ve (2.8) eşitlikleri $L_0\mathcal{G} = f\mathcal{G} + gC$ ifadesinde kullanılırsa,

$$\left.\begin{aligned} &\frac{(\kappa\tau\sin y+\kappa'\cos y)\cos z}{(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^3} = g(x,y,z)C_1, \\ &\frac{\left(8\cos y\cos z+\rho\kappa\begin{pmatrix}1+5\cos(2y)\\+10\cos^2 y\cos(2z)\\+12\rho\kappa\cos^3 y\cos^3 z\end{pmatrix}\right)}{4\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2} = \\ &\qquad f(x,y,z)(-\cos y\cos z) + g(x,y,z)C_2, \\ &\frac{(2+3\rho\kappa\cos y\cos z)\sin y\cos z}{\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)} = f(x,y,z)(-\sin y\cos z) \\ &\qquad +g(x,y,z)C_3, \\ &\frac{(2+3\rho\kappa\cos y\cos z)\sin z}{\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)} = f(x,y,z)(-\sin z) + g(x,y,z)C_4 \end{aligned}\right\} \tag{2.10}$$

denklemleri elde edilir. Şimdi bu denklemleri çözelim.

İlk olarak $C_1 \neq 0$ olsun. (2.10) numaralı denklemlerin ilkinden

$$g(x,y,z) = \frac{(\kappa\tau\sin y+\kappa'\cos y)\cos z}{(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^3 C_1} \tag{2.11}$$

olur. Bu $g(x,y,z)$'yi (2.10)'un ikinci, üçüncü ve dördüncü denklemlerinde yerlerine yazarak $f(x,y,z)$'leri elde edip, bu denklemleri birbirine eşitlersek

$$(C_4\sin y\cos z - C_3\sin z)(\kappa\tau\sin y+\kappa'\cos y) = 0 \tag{2.12}$$

$$\kappa\begin{pmatrix}C_1\rho\kappa + C_1\sec y\sec z\\+\rho\tau\begin{pmatrix}-C_4\sin y\cot z\\+C_2\tan y\end{pmatrix}\end{pmatrix} + \rho(C_2 - C_4\cos y\cot z)\kappa' = 0 \tag{2.13}$$

$$C_1\rho\kappa^2 + \kappa\begin{pmatrix}\tau(C_2\rho\tan y - C_3\rho)\\+C_1\sec y\sec z\end{pmatrix} + \rho(C_2 - C_3\cot y)\kappa' = 0 \tag{2.14}$$

eşitliklerine ulaşılır. Burada $\kappa\tau\sin y+\kappa'\cos y \neq 0$ ise, (2.12)'den $C_3 = C_4 = 0$ olur. $C_3 = 0$ olduğu (2.14)'te kullanılırsa $C_1 = 0$ olduğu görülür ve bu da baştaki $C_1 \neq 0$ varsayımımızla çelişir. $\kappa\tau\sin y+\kappa'\cos y = 0$ olması durumunda ise, bu durumda da (2.10)'un ilk denkleminden $g(x,y,z) = 0$ olur ve bu da $g(x,y,z)$'nin tanımıyla çelişir.

İkinci olarak $C_1 = 0$ olsun. (2.9)'un ilk eşitliğinden ya $\kappa = 0$ ya da $C_2 = 0$'dır. İlk olarak $\kappa = 0$ alınırsa, (2.10)'un ilk eşitliği zaten sağlanır. (2.10)'un ikinci, üçüncü ve dördüncü denklemlerinden de, sırasıyla

$$\frac{(2+\rho^2 f(x,y,z))\cos y\cos z}{\rho^2} = g(x,y,z)C_2 \tag{2.15}$$

$$\frac{(2+\rho^2 f(x,y,z))\sin y\cos z}{\rho^2} = g(x,y,z)C_3 \tag{2.16}$$

$$\frac{(2+\rho^2 f(x,y,z))\sin z}{\rho^2} = g(x,y,z)C_4 \tag{2.17}$$

elde edilir. Burada C_i'ler sadece x'e bağlı olduğundan, (2.15), (2.16) ve (2.17) eşitlikleri aynı anda sağlanamaz. Yani, bu da bir çelişkidir. $C_2 = 0$ alınırsa da, (2.10)'un ilk denkleminden ya $\kappa = 0$ ya da $\kappa' = 0 = \tau$ olur. $\kappa = 0$

olamadığını az önce görmüştük. O halde $\kappa' = 0 = \tau$ durumunu ele alalım. (2.10)'un ikinci denkleminden

$$f(x,y,z) = \frac{\sec z \begin{pmatrix} 8\cos y \cos z \\ +\rho\kappa \begin{pmatrix} 1+5\cos(2y) \\ +10\cos^2 y \cos(2z) \\ +12\rho\kappa \cos^3 y \cos^3 z \end{pmatrix} \end{pmatrix}}{-4\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2 \cos y}$$

olur. Bu ifade (2.10)'un üçüncü ve dördüncü denklemlerinde kullanılırsa da, sırasıyla

$$\frac{\kappa \tan y}{\rho(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2} = g(x,y,z)C_3,$$

$$\frac{\kappa \sec y \tan z}{\rho(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2} = g(x,y,z)C_4$$

bulunur ve dolayısıyla

$$\frac{C_4}{C_3} = \csc y \tan z$$

elde edilir ve bu da bir çelişkidir.

Bu nedenle şu teoremi ifade edebiliriz:

Teorem: E_1^4 de merkezleri bir timelike eğri üzerinde bulunan pseudo-hiperkürelerin bir ailesinin zarfı olarak oluşturulan ve (2.1) ile parametrelendirilen tubular hiperyüzeyleri, genelleştirilmiş L_0 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olamaz.

Şimdi de (2.1) numaralı tubular hiperyüzey için ikinci çeşit L_0-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olma durumunu, yani $L_0\mathcal{G} = f(\mathcal{G}+C)$, $C \neq 0$ durumunu inceleyelim.

(2.2) ve (2.8) eşitlikleri $L_0\mathcal{G} = f(\mathcal{G}+C)$ ifadesinde kullanılırsa,

$$\left.\begin{aligned} &\frac{(\kappa\tau\sin y + \kappa'\cos y)\cos z}{(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^3} = g(x,y,z)C_1, \\ &\frac{\left(8\cos y\cos z + \rho\kappa\begin{pmatrix} 1+5\cos(2y) \\ +10\cos^2 y\cos(2z) \\ +12\rho\kappa\cos^3 y\cos^3 z \end{pmatrix}\right)}{4\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2} \\ &\qquad = f(x,y,z)(-\cos y\cos z + C_2), \\ &\frac{(2+3\rho\kappa\cos y\cos z)\sin y\cos z}{\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)} \\ &\qquad = f(x,y,z)(-\sin y\cos z + C_3), \\ &\frac{(2+3\rho\kappa\cos y\cos z)\sin z}{\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)} = f(x,y,z)(-\sin z + C_4) \end{aligned}\right\} \quad (2.18)$$

denklemleri elde edilir. Şimdi de bu denklemlerle ilgilenelim.

(2.18) numaralı denklemlerin ikincisi, üçüncüsü ve dördüncüsünden $f(x,y,z)$'leri bulursak, sırasıyla

$$f(x,y,z) = \frac{\left(8\cos y\cos z + \rho\kappa\begin{pmatrix} 1+5\cos(2y) \\ +10\cos^2 y\cos(2z) \\ +12\rho\kappa\cos^3 y\cos^3 z \end{pmatrix}\right)}{4\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2(C_2 - \cos y\cos z)} \quad (2.19)$$

$$f(x,y,z) = \frac{(2+3\rho\kappa\cos y\cos z)\sin y\cos z}{\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)(C_3 - \sin y\cos z)} \quad (2.20)$$

ve

$$f(x,y,z) = \frac{(2+3\rho\kappa\cos y\cos z)\sin z}{\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)(C_4 - \sin z)} \quad (2.21)$$

olur. (2.20) ve (2.21) birbirine eşitlenirse $C_3 = C_4 = 0$ bulunur. (2.19) ve (2.21) birbirine eşitlenirse de $C_2 = 0$ ve $\kappa = 0$ olur. Bulduğumuz bu değerler (2.18) numaralı denklemlerin ikincisi, üçüncüsü ve dördüncüsünde kullanılırsa

$$f(x,y,z) = -\frac{2}{\rho^2} \quad (2.22)$$

elde edilir. (2.22) numaralı eşitlik (2.18) numaralı denklemlerin birincisinde kullanılırsa da $C_1 = 0$ olduğu görülür. O halde aşağıdaki teoremleri elde ederiz:

Teorem: E_1^4 de merkezleri bir timelike eğri üzerinde bulunan pseudo-hiperkürelerin bir ailesinin zarfı olarak oluşturulan ve (2.1) ile parametrelendirilen tubular hiperyüzeyleri, ikinci çeşit L_0-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olamaz.

Teorem: E_1^4 de merkezleri bir timelike eğri üzerinde bulunan pseudo-hiperkürelerin bir ailesinin zarfı olarak oluşturulan ve (2.1) ile parametrelendirilen tubular hiperyüzeyleri, $\kappa = 0$ iken birinci çeşit L_0-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahiptir, yani $L_0\mathcal{G} = f\mathcal{G}$ dir ve burada $f = -\frac{2}{\rho^2}$ dir.

Son olarak da (2.1) numaralı tubular hiperyüzeyinin L_0-harmonik Gauss dönüşümüne sahip olma durumunu, yani $L_0\mathcal{G} = 0$ durumunu inceleyelim.

(2.8) eşitliği için $L_0\mathcal{G} = 0$ ise, bu durumda

$$\left.\begin{aligned} &\frac{(\kappa\tau\sin y + \kappa'\cos y)\cos z}{(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^3} = 0, \\ &\frac{\left(8\cos y\cos z + \rho\kappa\begin{pmatrix} 1+5\cos(2y) \\ +10\cos^2 y\cos(2z) \\ +12\rho\kappa\cos^3 y\cos^3 z \end{pmatrix}\right)}{4\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)^2} = 0, \\ &\frac{(2+3\rho\kappa\cos y\cos z)\sin y\cos z}{\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)} = 0, \\ &\frac{(2+3\rho\kappa\cos y\cos z)\sin z}{\rho^2(1+\rho\kappa\cos y\cos z)} = 0 \end{aligned}\right\} \quad (2.23)$$

olmalıdır. Bu durum mümkün olmadığından, aşağıdaki teoremi ifade edebiliriz:

Teorem: E_1^4 de merkezleri bir timelike eğri üzerinde bulunan pseudo-hiperkürelerin bir ailesinin zarfı olarak oluşturulan ve (2.1) ile parametrelendirilen tubular hiperyüzeyleri, L_0-harmonik Gauss dönüşümüne sahip olamaz.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, 4-boyutlu Lorentz-Minkowski uzayı E_1^4 de merkezleri bir timelike eğri üzerinde bulunan pseudo-hiperkürelerin bir ailesinin zarfı olarak oluşturulan ve (2.1) ile parametrelendirilen tubular hiperyüzeylerin Gauss dönüşümlerinin L_0 operatörü elde edilerek, bu operatör yardımıyla tubular hiperyüzeylerin genelleştirilmiş L_0 1-tipli Gauss dönüşümüne ve ikinci çeşit L_0-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olamadığı, fakat bu tubular hiperyüzeyler üzerinde $\kappa = 0$ iken $f = -2/\rho^2$ için $L_0\mathcal{G} = f\mathcal{G}$ olduğu, yani bu hiperyüzeylerin birinci çeşit L_0-noktasal 1-tipli Gauss dönüşümüne sahip olduğu görülmüş oldu. Ayrıca, (2.1) numaralı tubular hiperyüzeylerin L_0-harmonik Gauss dönüşümüne sahip olamadığı da görülmüştür.

Bu çalışmanın 4-boyutlu farklı uzaylarda değişik tiplerdeki (hiper)yüzeyleri çalışan araştırmacılara ışık tutacağı kanaatindeyiz.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar olarak tüm etik standartlara uyduğumuzu beyan ediyoruz.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Metodoloji/Çalışma, Yazma ve Yazım Kontrolü, Literatür Taraması ve Kaynaklar

Yazar 2: Araştırma, Metodoloji/Çalışma, Yazma ve Yazım Kontrolü, Literatür Taraması ve Kaynaklar

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar olarak bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edeceğimiz hiçbir çıkar çatışması yoktur.

4. Kaynaklar

Altın, M., Kazan, A. and Yoon, D.W., 2023. Canal Hypersurfaces generated by Non-Null Curves in Lorentz-Minkowski 4-Space. *Bull. Korean Math. Soc.*, **60** (5), 1299-1320. https://doi.org/10.4134/BKMS.b220680

Chen, B.Y. and Petrovic, M., 1991. On spectral decomposition of immersions of finite type. *Bull. Aust. Math. Soc.*, **44** (1), 117-129. https://doi.org/10.1017/S0004972700029518

Cheng, S.Y. and Yau, S.T., 1977. Hypersurfaces with constant scalar curvature. *Math. Ann.*, **225**, 195-204. https://doi.org/10.1007/BF01425237

Dillen, F., Pas, J. and Verstraelen, L., 1990. On surfaces of finite type in euclidean 3-space. *Kodai Math. J.*, **13** (1), 10-21. https://doi.org/10.2996/kmj/1138039155

Garay, O.J., 1990. An extension of Takahashi's theorem. *Geom. Dedicata*, **34**, 105-112. https://doi.org/10.1007/BF00147319

Güler, E. and Turgay, N.C., 2019. Cheng-Yau Operator and Gauss Map of Rotational Hypersurfaces in 4-Space. *Mediterr. J. Math.*, **16** (3), 66. https://doi.org/10.1007/s00009-019-1333-y

Hasanis, T. and Vlachos, T., 1992. Hypersurfaces of $\boldsymbol{E^{n+1}}$ satisfying $\Delta\boldsymbol{x} = \boldsymbol{Ax} + \boldsymbol{B}$. *J. Aust. Math. Soc.*, **53** (3), 377-384.

Kazan, A., Altın, M. and Turgay, N.C., 2024a. Rotational Hypersurfaces in $\boldsymbol{E_1^4}$ with Generalized $\boldsymbol{L_k}$ 1-Type Gauss Map. *arXiv:2403.19671v1*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.19671

Kazan, A., Altın, M. and Turgay, N.C., 2024b. Some Classifications for Gauss Map of Tubular Hypersurfaces in $\boldsymbol{E_1^4}$ Concerning Linearized Operators $\boldsymbol{L_k}$. *arXiv:2404.13075v1*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.13075

Kelleci Akbay, A., 2021. Rotational surfaces with Cheng-Yau operator in Galilean 3-spaces. *Hacet. J. Math. Stat.*, **50** (2), 365-376. https://doi.org/10.15672/hujms.612730

Kim, D-S., Kim, J.R. and Kim, Y.H., 2016. Cheng-Yau Operator and Gauss Map of Surfaces of Revolution. *Bull. Malays. Math. Sci. Soc.*, **39** (4), 1319-1327. https://doi.org/10.1007/s40840-015-0234-x

Lucas, P. and Ramirez-Ospina, H.F., 2011. Hypersurfaces in the Lorentz-Minkowski space satisfying $\boldsymbol{L_k\psi} = \boldsymbol{A\psi} + \boldsymbol{b}$. *Geom. Dedicata*, **153** (1), 151-175. https://doi.org/10.1007/s10711-010-9562-z

Takahashi, T., 1966. Minimal immersions of Riemannian manifolds. *J. Math. Soc. Japan*, **18** (4), 380-385.

Tetsing, H.F., 2021. Normalized null hypersurfaces in nonflat Lorentzian space forms satisfying $\boldsymbol{L_r x} = \boldsymbol{Ux} + \boldsymbol{b}$. *Turk. J Math.*, **45** (4), 1809-1834. https://doi.org/10.3906/mat-2102-37

Yang, B. G. and Liu, X.M., 2009. Spacelike hypersurfaces in the Lorentz-Minkowski space satisfying $\boldsymbol{L_r x} = \boldsymbol{Rx} + \boldsymbol{b}$. *Indian J. Pure Appl. Math.*, **40** (6), 389-403.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1558289
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 031303 (489-496)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 031303 (489-496)

Orthogonal Embedding-Based Artificial Neural Network Solutions to Ordinary Differential Equations

***Makale Bilgisi / Article Info**
Alındı/Received: 30.09.2024
Kabul/Accepted: 04.01.2025
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Adi Diferansiyel Denklemlerin Ortogonal Gömme Tabanlı Yapay Sinir Ağı Çözümleri

Tolga Recep UÇAR[1*], Hasan Halit TALİ[2,3]

[1] *Koç University, Graduate School of Sciences and Engineering, Department of Mathematics, İstanbul, Türkiye*
[2] *Haliç University, Department of Mathematics, İstanbul, Türkiye*
[3] *Galata University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, İstanbul, Türkiye*

Abstract
Providing numerical solutions to differential equations in cases where analytical solutions are not available is of great importance. Recently, obtaining more accurate numerical solutions with artificial neural network-based machine learning methods are seen as promising developments for numerical solutions of differential equations. In this paper, a low-cost, orthogonal embedding-based network with fast training by simple gradient descent algorithm is proposed to obtain numerical solutions of differential equations. This architecture is essentially a two-layer neural network that takes orthogonal polynomials as input. The efficiency and accuracy of the method used in this paper are demonstrated in various problems and comparisons are made with other methods. It is observed that the proposed method stands out especially when compared with high-cost solutions.

***Keywords**: Non-linear ordinary differential equations; Numerical approximation; Artificial neural networks; Orthogonal polynomials.*

Öz
Analitik çözümlerin mevcut olmadığı durumlarda diferansiyel denklemler için nümerik çözümler elde etmek büyük önem taşımaktadır. Son zamanlarda, yapay sinir ağı tabanlı makine öğrenmesi yöntemleriyle daha tutarlı nümerik çözümlerin elde edilmesi diferansiyel denklemlerin nümerik çözümleri için ümit verici gelişmeler olarak görülmektedir. Bu makalede, diferansiyel denklemlerin nümerik çözümlerini elde etmek için basit gradyan düşüm algoritması ile hızlı eğime sahip düşük maliyetli bir ortogonal gömme tabanlı ağ önerilmektedir. Bu mimari, temelde, ortogonal polinomları girdi olarak alan iki katmanlı bir sinir ağıdır. Bu makalede kullanılan yöntemin verimliliği ve tutarlılığı, çeşitli problemlerde gösterilmiş ve diğer yöntemlerle karşılaştırmalar yapılmıştır. Kullanılan yöntemin, özellikle yüksek maliyetli çözümlerle karşılaştırıldığında öne çıktığı görülmüştür.

***Anahtar Kelimeler:** Doğrusal olmayan adi diferansiyel denklemler; Nümerik yaklaşım; Yapay sinir ağları; Ortogonal polinomlar.*

1. Introduction

Many disciplines, especially physics and economics, express their most important problems in the form of differential equations. The differential equation modeling the independent and dependent variables present in the phenomena along with the conditions that we know are true for the given independent variable formulate the initial value problem. The general initial value problem is

$$G\left(x, y(x), y'(x), \dots, y^{(n)}(x)\right) = 0 \qquad (1)$$

subject to the conditions $y(x_0) = y_0$, $y(x_0') = y_0'$,..., $y(x_0^{(n-1)}) = y_0^{(n-1)}$ where $x \in \mathbb{R}$. Our objective is to compute $y(x)$. Analytic solutions are limited to certain classes of differential equations, and they are mostly not available, so we are obliged to come up with different methodologies. Numerical methods, building the bridge between mathematics and real-life phenomena, has become an effective approach in the absence of an analytic solution. Classical methods such as Euler's and Runge-Kutta are useful, yet they require heavy computation and extensive math when applied to higher order problems. The resulting approximation being only discrete and not continuous is another limitation for these classical methods (Strang, 2007). Lately, neural network based methods are being proposed to overcome the obstacles before solving differential equations (Meade and Fernandez, 1994). The neural network based approximation is a continuous approximation of the unknown function and it is in closed, differentiable form (Lagaris et al., 1998; Hornik et al., 1989). This approximation can also handle differential equations with singularity (Chakraverty and Mall, 2017). Methodology of the neural network based solution is easy to implement and is of low computational demand when an effective architecture design is provided. The robustness of neural networks make them applicable to both ordinary and partial differential equations and system of ordinary or

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tolga Recep UÇAR e-posta/e-mail: tucar24@ku.edu.tr

partial differential equations with trivial changes to the theory.

There are various machine learning based methods for solving initial value problems. The least squares support vector machine methodology from statistical learning literature is successfully applied on differential equations (Mehrkanoon *et al.,* 2012). The fundamental neural network, i.e. multilayer perceptron with nonlinear activation functions, is considered a universal approximator. In this regard Cybenko (1989) shows that a single hidden layer along with the sigmoid function can approximate any continuous function with support in the unit hypercube, to an arbitrary degree. Later on, Pinkus (1999) reviews the answers of questions in approximation theory of neural networks. Malek and Beidokhti (2006) use a hybrid method mixing neural networks and Nelder-Mead optimization method. Wen et al. (2022) combines neural networks and the Lie group applications on differential equations. In Schiassi et al. (2021), the Theory of Functional Connections (TFC) is used to create an expression that utilizes neural networks, and this reduces the training solely to a simple least-squares, since the only parameters tuned by this methodology are the output weights. An advancement on the classic neural networks are orthogonal networks using the orthogonal polynomials as hard-coded activation functions. Most basic of these architectures is equivalent to the Chebyshev collocation method with optimized coefficients (Mall and Chebyshev, 2014). Legendre polynomials which are also the foundation of our proposal here are previously applied in the work of Mall and Chakraverty (2016). A more complex version include the repeated use of orthogonal layers in deeper neural networks (Parand *et al.*, 2024). In particular, Günel and Gör (2022) examine the swarm intelligence methods employing neural networks for solving Dirichlet boundary problems. A survey of neural network methods along with radial basis function methods for solving differential equations is the work of Kumar and Yadav (2011). Knoke and Wick (2021) present some numerical tests for the sensitivity of the objective function to show that some misleading initial weights can minimize the cost function while not satisfying the equation.

We propose an orthogonal embedding based artificial neural network with simple adjustments providing the following contributions:

1. Robust methodology of our proposal makes the solution applicable to problems from any discipline.

2. The appropriate utilization of Legendre polynomial based orthogonal representations lead to a low demand, fast runtime exceeding the accuracy of highly demanding deep architectures.

3. The efficient backpropagation results in easy convergence by basic gradient descent with constant learning rate.

We start by introducing the mathematical properties and formulate the architecture methodology in Section 2. In Section 3 the method is applied to some initial value problems. The Section 4 discusses the results and concludes the proposal.

2. Methods

In this section we discuss the Legendre polynomials, formulate the architecture and present the optimization procedure. Among the many ways to obtain approximations are series expansions. The most fundamental method in this regard is Taylor's series, which is a useful method since one can easily calculate the expansion coefficients. Orthogonal polynomial expansions are also used to obtain approximations and the theory is well studied to show that they possess useful properties for numerical analysis (Snyder, 1966). We first define the Legendre polynomials, then note that they fundamentally form an orthogonal basis, which will help us obtain useful representations of input scalars.

2.1 Legendre polynomials

Consider the below differential equation, namely Legendre's differential equation.

$$(1-x^2)P_n''(x) - 2xP_n(x) + n(n+1)P_n(x) = 0 \qquad (2)$$

The solutions $P_n(x)$ to the differential equation (2) are called the Legendre polynomials. The polynomials $P_n(x)$ are defined explicitly as

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!}\frac{d^n}{dx^n}(x^2-1)^n. \qquad (3)$$

The first five Legendre polynomials which we will use in order to create our embeddings are as the following:

$$P_0(x) = 1,$$

$$P_1(x) = x,$$

$$P_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2-1),$$

$$P_4(x) = \frac{1}{2}(5x^3-3x).$$

The polynomials given above are graphed in Figure 1.

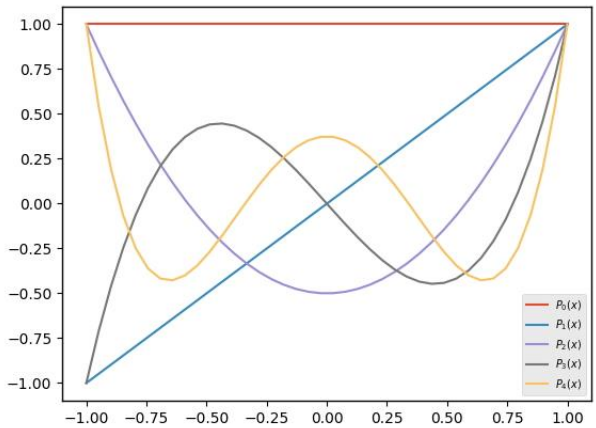


Figure 1. The first five of the Legendre polynomials.

2.2 Orthogonality and completeness

Now we state a theorem to show the orthogonality and completeness of Legendre polynomials. The Legendre polynomials are orthogonal with $w(x) = 1$ on the interval $[-1,1]$, i.e.

$$\int_{-1}^{1} P_n(x)\, P_m(x) dx = \frac{2}{2n+1}\delta_{mn} \tag{4}$$

where δ_{mn} is the Kronecker delta. Morevover, the Legendre polynomials are complete. We refer to Lebedev (1965) for orthogonality and Weidmann (1980) for completeness proof.

2.3 Orthogonal embedding-based artificial neural network

Initially, the real continuous space of the problem domain is discretized into D from which the input $x \in D \subset \mathbb{R}$ is received. In the first layer of the architecture, the orthogonal embedding represents the input x by the orthogonal basis the Legendre polynomials exhibit. The evaluated Legendre polynomials are then fed into a two-layer neural network whose hidden layers are the same size as the orthogonal embedding, parameterized by $\mathbf{p}$, with sigmoid activation function. Denoting the operations of the linear layers with matrices $L_{\mathbf{p}}^1$ and $L_{\mathbf{p}}^2$, respectively, we obtain the formulation below for the architecture output.

$$N_{\mathbf{p}}(x) = L_{\mathbf{p}}^2 L_{\mathbf{p}}^1 \begin{bmatrix} P_0(z) \\ P_1(z) \\ P_2(z) \\ P_3(z) \\ P_4(z) \end{bmatrix} \tag{5}$$

where $z = \tanh(x)$.

The computation of the orthogonal embedding is fast and the optimization is only required for the small neural network using these representations. Although small, this network can learn powerful approximations working on the orthogonal representations of inputs.

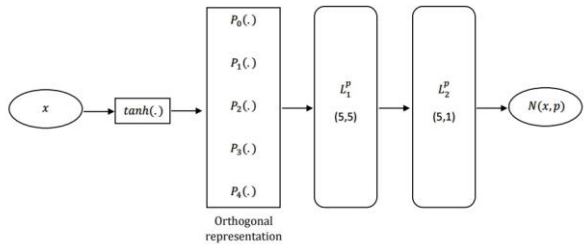


Figure 2. Orthogonal embedding-based artificial neural network. Here (5,5) and (5,1) denote the matrix dimensions of linear transformations $L_{\mathbf{p}}^1$ and $L_{\mathbf{p}}^2$, respectively.

2.4 Approximation

We formulate the approximation of $y(x)$, namely $\hat{y}_{\mathbf{p}}(x)$, using the appropriate trial solution form. For a first-order differential equation, we write

$$\hat{y}_{\mathbf{p}}(x) = y_0 + xN_{\mathbf{p}}(x) \tag{6}$$

and for a second-order differential equation we write

$$\hat{y}_{\mathbf{p}}(x) = y_0 + xy_0' + x^2 N_{\mathbf{p}}(x). \tag{7}$$

Substituting the appropriate trial solution in the equation (1) we obtain the following optimization problem.

$$\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} G\left(x_i, \hat{y}_{\mathbf{p}}(x_i), \hat{y}_{\mathbf{p}}'(x_i), \dots, \hat{y}_{\mathbf{p}}^{(n)}(x_i)\right)^2 = 0 \tag{8}$$

The optimization objective is accomplished by the gradient descent algorithm. The principle is to update the parameters $\mathbf{p}$ based on the gradient of the function we aim to optimize, namely

$$F_{\mathbf{p}}(x) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} G\left(x_i, \hat{y}_{\mathbf{p}}(x_i), \hat{y}_{\mathbf{p}}'(x_i), \dots, \hat{y}_{\mathbf{p}}^{(n)}(x_i)\right)^2. \tag{9}$$

At each step we compute

$$\nabla_{\mathbf{p}} F_{\mathbf{p}} = \frac{dF}{d\hat{y}} \nabla_{\mathbf{p}} \hat{y}_{\mathbf{p}}, \tag{10}$$

then perform the update

$$\mathbf{p} = \mathbf{p} - \gamma \nabla_{\mathbf{p}} F_{\mathbf{p}} \tag{11}$$

where γ is the learning rate tuning the update magnitude. In our numerical applications, learning rate can remain constant throughout the iterations, thus providing a simple low-cost training procedure.

3. Results and Discussions

In this section we consider some initial value problems to illustrate the efficiency of our method. First three examples are ordinary Lane-Emden type equations. The fourth example is a nonlinear ordinary Riccati type equation. Our method takes 20-equidistant points from

the problem domain and outputs a continuous approximation of the unknown function. We perform the computations on 2.20GHz Intel Xeon CPU with 12 gigabytes of memory.

For each of the examples the optimization of model parameters is demonstrated through the graph of the entries in $L^2_{\mathbf{p}}$, denoted in the figures as

$$w_i^1 := (L^2_{\mathbf{p}})_i. \tag{12}$$

3.1 Standard Lane-Emden with $g(y) = 1$

$$y''(x) + \frac{2}{x}y'(x) + 1 = 0 \tag{13}$$

with initial conditions $y(0) = 1,\ y'(0) = 0$. The exact solution of this initial value problem is

$$y(x) = 1 - \frac{x^2}{3!}. \tag{14}$$

In Table 1 we compare our approximations with the approximations presented by ChNN (Mall and Chebyshev, 2014). In Table 2 we compare them with the results of Parand et al. (2024). Both comparisons make it clear that our method can produce highly accurate approximations while remaining low-cost. Table 3 tests the approximation on some randomly generated points to demonstrate the smoothness of the result. In Figure 3 we compare our estimated graph for the unknown function with the exact solution (14). We give a summary in Table 4. In Figure 4 we see that the optimization successfully converges to some specific values from random initialization.

Table 1. Comparison with ChNN for example 3.1.

Input	Exact	ChNN	Proposed method	Absolute error
0	1.0000	1.0000	1.0000	0
0.1	0.9983	0.9993	0.9983	2.38e-06
0.2	0.9933	0.9901	0.9933	2.98e-06
0.3	0.9850	0.9822	0.9850	8.34e-07
0.4	0.9733	0.9766	0.9733	1.78e-07
0.5	0.9583	0.9602	0.9583	6.37e-06
0.6	0.9400	0.9454	0.9400	1.78e-07
0.7	0.9183	0.9139	0.9183	3.69e-06
0.8	0.8933	0.8892	0.8933	3.39e-06
0.9	0.8650	0.8633	0.8650	4.76e-07
1.0	0.8333	0.8322	0.8333	3.45e-06

Table 2. Comparison with Parand et al. for example 3.1.

Input	Exact	Parand et al.	Proposed method	Absolute error
0	1.0000	0.9999	1.0000	0
0.01	0.999983	0.999974	0.999984	2.38e-07
0.02	0.999933	0.999925	0.999934	5.96e-07
0.05	0.999583	0.999575	0.999585	2.02e-06
0.10	0.998333	0.998321	0.998336	2.38e-06
0.50	0.958333	0.958322	0.958340	6.37e-06
1.00	0.833333	0.833326	0.833337	3.45e-06

Table 3. Absolute errors on example 3.1. for randomly generated points.

Input	Exact	Proposed method	Absolute error
0.2840	0.9866	0.9866	8.92e-05
0.7554	0.9049	0.9049	4.67e-05
0.8290	0.8855	0.8854	1.48e-05
0.7711	0.9009	0.9009	3.63e-05
0.6168	0.9366	0.9366	7.56e-06

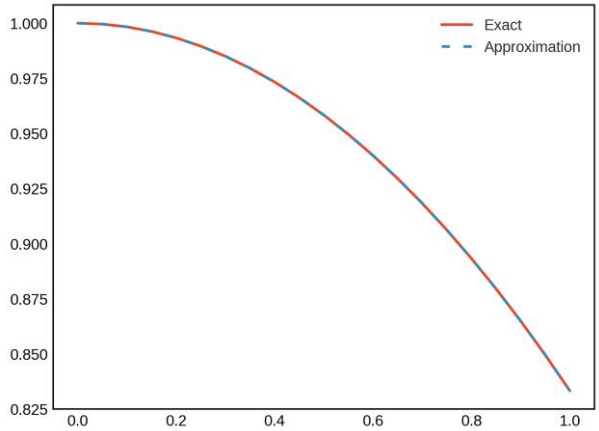


Figure 3. Comparison of the proposed solution with exact solution for example 3.1.

Table 4. Comparison of methods for example 3.1.

Method	Number of parameters	Optimization algorithm	Mean squared error
ChNN	5	Gradient descent	9.36e-06
Parand et al.	550	Adam	1.04e-10
Proposed	30	Gradient descent (constant learning rate)	6.64e-12

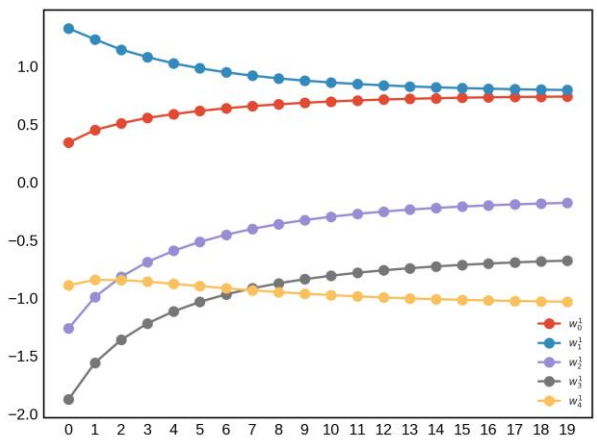


Figure 4. Convergence of the model parameters for example 3.1.

The convergence time for the solution of example 3.1. is 5 seconds.

3.2 Standard Lane-Emden with $g(y) = y^5(x)$

$$y''(x) + \frac{2}{x}y'(x) + y^5(x) = 0 \tag{15}$$

with initial conditions $y(0) = 1,\ y'(0) = 0$. The exact solution of this initial value problem is

$$y(x) = (1 + \frac{x^2}{3})^{-\frac{1}{2}}. \tag{16}$$

As above we make comparison with ChNN (Mall and Chebyshev, 2014) and Parand et al. (2024) in Table 5 and 6, respectively. In Table 7, we give some randomly generated examples to prove continuity. Figure 5 contains the graph of our estimation and the graph of the exact solution (16). The efficient usage of neural network parameters can be observed in Table 8. The convergence performance of the simple gradient descent with constant learning rate is visible in Figure 6.

Table 5. Comparison with ChNN for example 3.2.

Input	Exact	ChNN	Proposed method	Absolute error
0	1.0000	1.0000	1.0000	0
0.10	0.9983	0.9981	0.9983	4.82e-06
0.20	0.9934	0.9935	0.9934	5.36e-07
0.30	0.9853	0.9899	0.9853	5.96e-08
0.40	0.9744	0.9712	0.9744	9.59e-06
0.50	0.9607	0.9684	0.9608	1.18e-05
0.60	0.9449	0.9411	0.9449	1.84e-06
0.70	0.9271	0.9303	0.9272	7.27e-06
0.80	0.9078	0.9080	0.9078	3.45e-06
0.90	0.8874	0.8830	0.8873	7.86e-06
1.00	0.8660	0.8651	0.8660	5.00e-06

Table 6. Comparison with Parand et al. for example 3.2.

Input	Exact	Parand et al.	Proposed method	Absolute error
0	1.0000	1.0000	1.0000	0
0.01	0.999983	0.999976	0.999984	3.57e-07
0.02	0.999933	0.999927	0.999934	1.07e-06
0.05	0.999584	0.999579	0.999588	3.93e-06
0.10	0.998338	0.998332	0.998342	4.82e-06
0.50	0.960769	0.960762	0.960781	1.18e-05
1.00	0.866025	0.866022	0.866030	5.00e-06

Table 7. Absolute errors on example 3.2. for randomly generated points.

Input	Exact	Proposed method	Absolute error
0.6596	0.9345	0.9345	7.27e-06
0.4847	0.9630	0.9630	2.61e-05
0.8548	0.8967	0.8967	2.43e-05
0.2336	0.9910	0.9910	6.97e-06
0.8425	0.8993	0.8992	2.06e-05

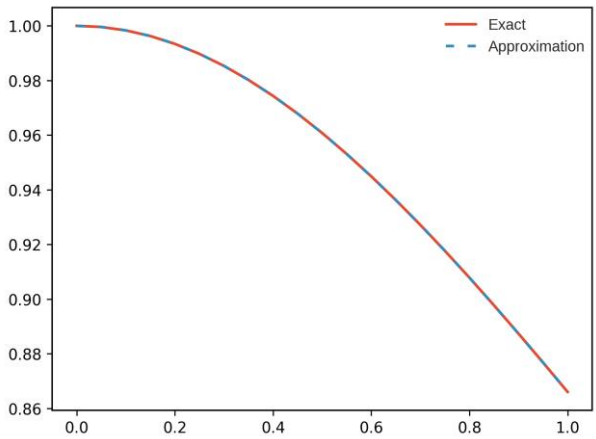


Figure 5. Comparison of the proposed solution with exact solution for example 3.2.

Table 8. Comparison of methods for example 3.2.

Method	Number of parameters	Optimization algorithm	Mean squared error
ChNN	5	Gradient descent	1.21e-05
Parand et al.	550	Adam	5.87e-11
Proposed	30	Gradient descent (constant learning rate)	3.74e-11

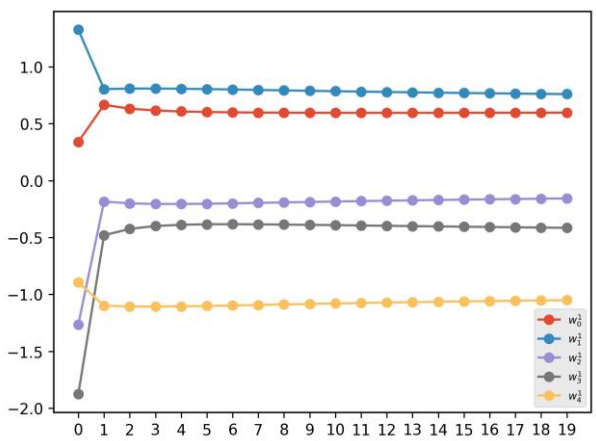


Figure 6. Convergence of the model parameters for example 3.2.

The convergence time for the solution of example 3.2. is 30 seconds.

3.3 Lane-Emden with $g(y) = -2(2x^2 + 3)$

$$y''(x) + \frac{2}{x}y'(x) - 2(2x^2 + 3)y(x) = 0 \tag{17}$$

with initial conditions $y(0) = 1,\ y'(0) = 0$. The exact solution of this initial value problem is

$$y(x) = e^{x^2}. \tag{18}$$

Table 9 and 10 compare the obtained results with ChNN (Mall and Chebyshev, 2014) and Parand et al. (2024), respectively. In Table 11 we present examples for points not present among the training points. Table 12 compares the methods. Figure 7 shows the graph of the exact solution (18) and the estimated solution obtained by our method. The succcessful convergence is observed in Figure 8.

Table 9. Comparison with ChNN for example 3.3.

Input	Exact	ChNN	Proposed method	Absolute error
0	1.0000	1.0000	1.0000	0
0.10	1.0101	1.0094	1.0101	1.97e-05
0.20	1.0408	1.0421	1.0408	2.01e-05
0.30	1.0942	1.0945	1.0942	1.70e-05
0.40	1.1735	1.1598	1.1735	2.58e-05
0.50	1.2840	1.2866	1.2840	2.02e-05
0.60	1.4333	1.4312	1.4334	2.98e-05
0.70	1.6323	1.6238	1.6323	3.01e-05
0.80	1.8965	1.8924	1.8965	2.95e-05
0.90	2.2479	2.2392	2.2480	5.12e-05
1.00	2.7183	2.7148	2.7183	5.17e-05

Table 10. Comparison with Parand et al. for example 3.3.

Input	Exact	Parand et al.	Proposed method	Absolute error
0.00	1.0000	1.0001	1.0000	0
0.01	1.0001	1.0002	1.0001	1.54e-06
0.02	1.0004	1.0005	1.0004	5.00e-06
0.05	1.0025	1.0026	1.0025	1.63e-05
0.06	1.0036	1.0037	1.0036	1.87e-05
0.07	1.0049	1.0050	1.0049	2.00e-05
0.10	1.0101	1.0101	1.0101	1.97e-05
0.20	1.0408	1.0409	1.0408	2.01e-05
0.30	1.0942	1.0942	1.0942	1.70e-05
0.40	1.1735	1.1736	1.1735	2.58e-05
0.50	1.2840	1.2841	1.2840	2.02e-05
1.00	2.7183	2.7185	2.7183	5.17e-05

Table 11. Absolute errors on example 3.3. for randomly generated points.

Input	Exact	Proposed method	Absolute error
0.5694	1.1423	1.1423	2.14e-05
0.0545	1.0016	1.0016	1.21e-05
0.9987	1.2980	1.2981	2.01e-05
0.5940	1.0691	1.0691	2.55e-05
0.6833	1.1653	1.1653	2.24e-05

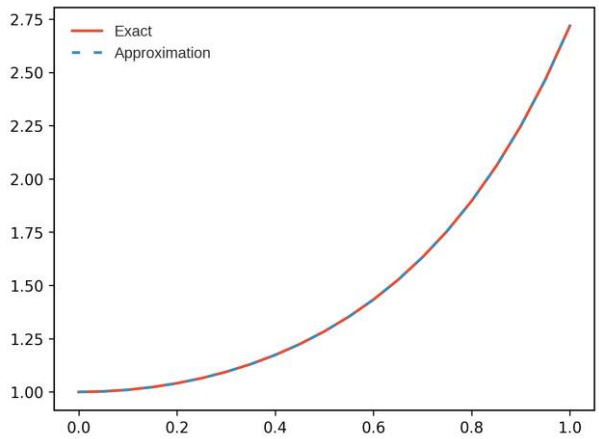


Figure 7. Comparison of the proposed solution with exact solution for example 3.3.

Table 12. Comparison of methods for example 3.3.

Method	Number of parameters	Optimization algorithm	Mean squared error
ChNN	5	Gradient descent	3.44e-05
Parand et al.	2291	Adam	1.22e-08
Proposed	30	Gradient descent (constant learning rate)	9.22e-10

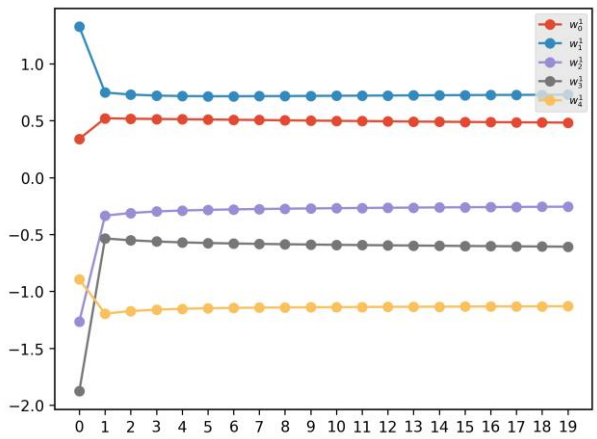


Figure 8. Convergence of model parameters for example 3.3.

The convergence time for the solution of example 3.3. is 24 seconds.

3.4 Riccati equation

Consider the Riccati equation

$$y'^{(x)} = y(x) - 2y^2(x) \tag{19}$$

with initial condition $y(0) = 1$. The exact solution of this initial value problem is

$$y(x) = \frac{1}{2-e^{-x}}. \tag{20}$$

The problem is previously solved by Gülsü and Sezer (2006) using the Taylor matrix method. We compare the errors of methods in Table 13. Our proposal achieves to exceed previous accuracies without heavy mathematics of the Taylor matrix method. Table 14 test the estimation on some new points to prove continuity. In Figure 9 we present the estimated graph and the exact solution (20). Figure 10 presents the convergence of architecture parameters.

Table 13. Comparison of methods for example 3.4.

Input	Exact	Euler's Method (Absolute Error)	Taylor Matrix (Absolute Error)	Proposed Method (Absolute Error)
0.10	0.9131	5.85e-03	2.94e-07	2.68e-04
0.20	0.8465	8.47e-03	1.48e-04	1.50e-04
0.30	0.7942	1.55e-02	1.97e-03	2.20e-04
0.40	0.7521	9.73e-03	1.11e-02	1.44e-04
0.50	0.7176	9.54e-03	4.14e-02	5.02e-05

Table 14. Absolute errors on example 3.4. for randomly generated points.

Input	Exact	Proposed method	Absolute error
0.5694	0.6973	0.6975	4.92e-04
0.0545	0.9497	0.9507	9.60e-04
0.9987	0.6129	0.6130	1.97e-04
0.5940	0.6907	0.6909	5.17e-04
0.6833	0.6689	0.6691	4.15e-04

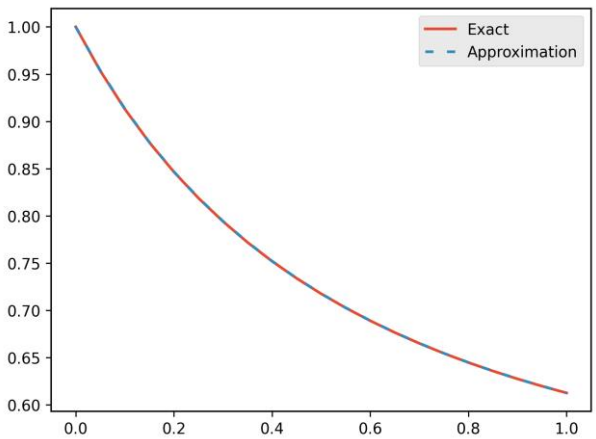


Figure 9. Comparison of the proposed solution with exact solution for example 3.4.

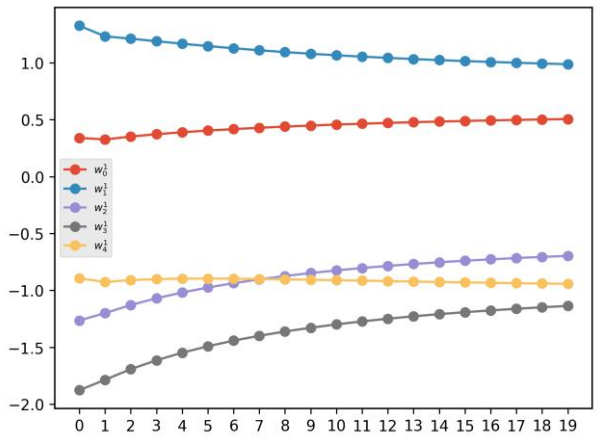


Figure 10. Convergence of model parameters solving example 3.4.

The convergence time for the solution of example 3.4. is 29 seconds.

4. Conclusion

We have introduced a low-cost method for solving nonlinear ordinary differential equations which exceeds the efficiency of previous approaches. This fast computation of complex unknown functions is achieved through the fundamental two-layer neural network with improved representations. Our method evaluates the corresponding Legendre polynomials in order to compute an orthogonal representation that work as improved representations to learn neural network parameters. The illustrations on various examples show that this method can achieve better results while also reducing computational cost. Alongside these improvements, the proposed method is applicable to a wide range of problems and the solution is continuous while the input is discrete. We observe that the illustration of orthogonal representations as empowering embeddings for simple neural networks to work on implies further important research.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author 1: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Writing – original draft, Visualization.

Author 2: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Writing – review and editing, Supervision.

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

5. References

Chakraverty, S. and Mall, S., 2017. Artificial Neural Networks for Engineers and Scientists. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315155265

Cybenko, G., 1989. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Math. Control Signal Systems*, **2**, 303-314. https://doi.org/10.1007/BF02551274

Gülsü, M. and Sezer, M., 2006. On the solution of the Riccati equation by the Taylor matrix method. *Applied Mathematics and Computation*, **176**, 414-421. https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.09.030

Günel, K. and Gör, I., 2022. Solving Dirichlet boundary problems for ODEs via swarm intelligence. *Mathematical Sciences*, **16**, 325-341. https://doi.org/10.1007/s40096-021-00424-2

Hornik, K., Maxwell, S. and Halbert, W., 1989. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Network,* **2**, 359-366. https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8

Knoke, T. and Wick, T., 2021. Solving differential equations via artificial neural networks: Findings and failures in a model problem. *Examples and Counterexamples,* **1**. https:/doi.org/10.1016/j.exco.2021.100035

Kumar, M. and Yadav, N., 2011. Multilayer perceptrons and radial basis function neural network methods for the solution of differential equations: A survey. *Computers & Mathematics with Applications*, **10**, 3796-3811. https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.09.028

Lagaris, I.E., Likas, A. and Fotiadis, D.I., 1998. Artificial neural networks for solving ordinary and partial differential equations. *IEEE Trans. on Neural Netw.,* **9**, 987-1000. https://doi.org/10.1109/72.712178

Lebedev, N.N., 1965. Special Functions and Their Applications. Prentice-Hall.

Malek, A. and Beidokhti, R.S., 2006. Numerical solution for high order differential equations using a hybrid neural network—Optimization method. *Applied Mathematics and Computation,* **1**, 260-271**.** https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.05.068

Mall, S. and Chakraverty, S., 2014. Chebyshev Neural Network based model for solving Lane–Emden type equations. *Applied Mathematics and Computation*, **247**, 100-114. https://doi.org/10.1016/j.amc.2014.08.085

Mall, S. and Chakraverty, S., 2016. Application of Legendre Neural Network for solving ordinary differential equations. *Applied Soft Computing*, **43**, 347-356. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.069

Meade, A.J. and Fernandez, A.A., 1994. The numerical solution of linear ordinary differential equations by feedforward neural networks. *Mathematical and Computer Modelling,* **19**, 1-25**.** https://doi.org/10.1016/0895-7177(94)90095-7

Mehrkanoon, S., Falck, T. and Suykens, J.A.K., 2012. Approximate Solutions to Ordinary Differential Equations Using Least Squares Support Vector Machines. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*, **23**, 1356-1367. https://doi.org/10.1109/TNNLS.2012.2202126

Parand, K., Aghaei, A.A., Kiani, S., Ilkhas Zadeh, T. and Khosravi, Z., 2024. A neural network approach for solving nonlinear differential equations of Lane–Emden type. *Engineering with Computers*, **40**, 953-969. https://doi.org/10.1007/s00366-023-01836-5

Pinkus, A., 1999. Approximation theory of the MLP model in neural networks. *Acta Numerica*, **8**, 143-195. https://doi.org/10.1017/S0962492900002919

Schiassi, E., Furfaro, R., Leake, C., De Florio, M., Johnston, H., Mortari, D., 2021. Extreme theory of functional connections: A fast physics-informed neural network method for solving ordinary and partial differential equations. *Neurocomputing*, **457**, 334-356. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.06.015

Snyder, M.A., 1966. Chebyshev Methods in Numerical Approximation. Prentice-Hall.

Strang, G., 2007. Computational Science and Engineering. Wellesley-Cambridge Press. https://doi.org/10.1137/1.9780961408817

Weidmann, J., 1980. Linear Operators in Hilbert Spaces. Springer-Verlag.

Wen, Y., Chaolu, T. and Wang, X., 1980. Solving the initial value problem of ordinary differential equations by Lie group based neural network method. *PLOS ONE*, **17(4)**. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265992

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1537513
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035101 (497-509)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035101 (497-509)

BERTurk-Based Sentiment Analysis on E-Commerce Multi Domain Product Reviews

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 22.08.2024
Kabul/Accepted: 05.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Çok Alanlı E-Ticaret Ürün İncelemelerinde BERTurk Tabanlı Duygu Analizi

Bekir TEKE, Seda Nur YAZICI, Gulseren ZAMIR, Ali Bugrahan BUDAK, Isil KARABEY AKSAKALLI*

Erzurum Technical University, Faculty of Engineering and Architecture Dept. of Computer Engineering, Erzurum, Türkiye

Abstract

Product reviews on e-commerce platforms constitute an important source of information for customers' shopping processes. Learning about various product features and evaluating user experiences makes shopping more reliable and provides sellers with valuable customer satisfaction feedback. In order for sellers to make strategic decisions about their products, customer satisfaction and product feedback should be analyzed in detail. For this purpose, sentiment analysis methods were applied to the data to analyze the sentiment of the comments. In this study, sentiment analysis was performed using comments from the Trendyol e-commerce site. Our dataset consists of a total of 73392 data, retrieved from six different categories: Computer, Phone, Shoes, Clothing, Cosmetics, Sports and Outdoor through Selenium. The generated dataset is published in the Kaggle public database. Since the distribution of positive, negative and neutral labeled classes is unbalanced in the obtained data, a second dataset was created by applying a cluster-based undersampling method. After the preprocessing stage, these datasets were divided into 80% training data and 20% test data. As a result of the experiments, among the traditional machine learning models, Support Vector Machines (SVM) gave the highest accuracy rate with 89% (original) and 84% (undersampled) in both datasets, while the BERTurk model, one of the transformer-based models, was determined as the most successful model with an accuracy rate of 96% (original) and 93% (undersampled) compared to all methods.

Keywords: *Natural language processing; Sentiment analysis; Machine learning, BERTurk.*

Öz

E-ticaret platformlarındaki ürün yorumları, müşterilerin alışveriş süreçlerinde önemli bir bilgi kaynağı oluşturmaktadır. Ürünlerin çeşitli özellikleri hakkında bilgi edinmek ve kullanıcı deneyimlerini değerlendirmek, alışverişi daha güvenilir hale getirirken satıcılara da müşteri memnuniyeti konusunda değerli geri bildirimler sağlar. Satıcıların ürünleriyle ilgili stratejik kararlar alabilmesi için müşteri memnuniyeti ve ürünle ilgili geri bildirimlerin ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, yorumların duygu durumunu analiz etmek için veriler üzerinde duygu analizi yöntemleri uygulanmaktadır. Çalışmamızda, Trendyol e-ticaret sitesinin yorumları kullanılarak duygu analizi yapılmıştır. Veri setimiz, Selenium aracılığıyla Bilgisayar, Telefon, Ayakkabı, Giyim, Kozmetik, Spor ve Açık Hava olmak üzere altı farklı kategoriden veri çekilerek toplamda 73392 veriden oluşmaktadır. Oluşturulan veriseti Kaggle açık veritabanında yayınlanmıştır. Elde edilen verilerde pozitif, negatif ve nört etiketli sınıf dağılımları dengesiz olduğu için küme tabanlı örnek azaltma yöntemi uygulanarak ikinci bir veriseti oluşturulmuştur. Önişleme aşamasından sonra bu verisetlerinin %20'si test ve %80'i ise eğitim verisi olarak ayrılmıştır. Deneyler sonucunda geleneksel makine öğrenmesi modellerinden Destek Vektör Makineleri (DVM) her iki veri kümesinde de %89 (orijinal) ve %84 (undersampled) ile en yüksek doğruluk oranını verirken, transformatör tabanlı modellerden BERTurk modeli %96 (orijinal) ve %93 (undersampled) doğruluk oranı ile tüm yöntemlere göre en başarılı model olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Doğal dil işleme; Duygu analizi; Makine öğrenmesi; BERTurk.*

1. Introduction

Natural Language Processing (NLP) refers to the encoding of human senses, such as seeing, hearing, feeling, and life experiences through language (Amirhosseini and Kazemian, 2019). It offers a variety of methods that make emotions, thoughts, and behavioral patterns conscious and allow them to be developed in a goal-oriented and constructive manner. These methods enable modeling of the behavior of individuals or groups by analyzing successful performances and occasionally comparing unsuccessful actions. Modeling behavior allows predictions of the future in many fields, and these predictions contribute to the growing use of sentiment analysis (Anvar Shathik and Krishna Prasad, 2020). Sentiment analysis applications using NLP are especially critical for sellers and customers on e-commerce platforms. Studies have shown that sellers' sales strategies and customer satisfaction change significantly in a positive direction after sentiment analysis (Lyu and Choi 2020).

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Isil KARABEY AKSAKALLI* *e-posta/e-mail: isil.karabey@erzurum.edu.tr*

Sentiment analysis plays a critical role in NLP and aims to identify attitudes, evaluations, thoughts, opinions, or judgments about a particular topic. With the rise of social media platforms, the proliferation of user-generated unstructured text has made sentiment identification imperative for individuals, businesses, and governments. Sentiment analysis methods can be broadly categorized into two main groups: dictionary-based and machine learning-based approaches. While dictionary-based methods attempt to identify the emotional aspects of text documents by evaluating the semantic orientation of words and sentences, machine learning-based methods construct classification models using labeled datasets and employ supervised learning techniques (Kratzwald et al. 2018). Various deep learning architectures such as Recurrent Neural Networks (RNNs), Convolutional Neural Networks (CNNs), Gated Recurrent Units (GRUs), and long short-term memory (LSTM) networks, can be used to perform sentiment analysis. In addition, the representation of text documents plays a critical role in realizing NLP tasks based on machine learning. Although traditional bag-of-words representations ignore syntax and grammar rules, recent developments in word embedding representations have addressed the issues of high dimensionality and sparsity by representing texts through fixed-length vectors. These developments have led to significant advances in text representation. When the literature on sentiment analysis is reviewed, product reviews on e-commerce sites or social media posts are often used as data sets. In sentiment analysis studies, stages such as data collection, data preprocessing, sentiment classification, creation of a recommendation system, and evaluation are performed. In addition to traditional machine learning methods, BERT (Alaparthi and Mishra 2021) is one of the most widely used sentiment analysis methods. It is a word embedding model based on transformer architecture that bidirectionally reads word sequences in the input text. Being bidirectional means that a word learns its meaning from both the words before and after it. BERT tries to extract the correct meaning by reading both sides. It contains an attention mechanism that allocates words to their vectors based on nearby words (Ullah et al., 2023). It is a state-of-the-art (SOTA) language model that is highly bidirectional and pre-trained on a wide range of English Wikipedia texts (Prottasha et al. 2022). Thanks to BERT's bidirectional approach, the meaning of texts is understood more accurately and comprehensively. We can examine the way BERT works under two main headings named pre-training and fine-tuning. After masked language modeling and next sentence prediction parts in the pre-training phase, BERT is fine-tuned and customized for specific tasks. Smaller and specific datasets are used during the fine-tuning phase.

In this study, a dataset comprising six categories was created using reviews from a Turkish e-commerce platform named Trendyol. In the dataset, unnecessary punctuation marks, emojis, and meaningless words were removed in the preprocessing steps. Then, tokenization, stemming, and vectorization operations were applied to prepare data for the model. During the training process, the comments were labeled as positive, negative, or neutral, and the accuracy rate was ensured as a result of this labeling. As a result of the analysis, the BERTurk model obtained the highest accuracy rate. The primary contributions of this study are summarized as follows:

- Consumers' comments were categorized and publicly accessible.
- Emotional ambiguity of comments was reduced by applying cluster-base undersampling method.
- The system minimizes the loss of time that consumers make in choosing products based on product reviews.
- Sellers can more effectively analyze customer satisfaction and develop more planned and effective sales strategies based on this analysis.

The following sections of this study are organized as follows: In Section 2 describes previous studies and related articles. Section 3 provides preliminary information about the materials and methods used. Section 4 discusses the implementation stages of the proposed method in this study. Sentiment analysis is explained, and the methodology used is described. Section 5 discusses and evaluates the results obtained by the machine learning methods used and the pre-trained transformer models. Section 6 summarizes the overall study results.

2. Related Work

In recent years, researchers have been actively investigating the critical role of sentiment analysis in online product reviews. These studies have emphasized how sentiment analysis influences consumer decision-making processes and contributes to product quality improvement. As the volume of online data continues to grow exponentially, researchers have pointed out the increasing necessity for robust and efficient information extraction techniques. The application of sentiment analysis to recommendation systems has emerged as a promising avenue to enhance system performance by interpreting user feedback more accurately. Sentiment analysis, which seeks to determine the sentiments conveyed in reviews, can be executed at different granularity levels: document, sentence, or attribute. The

primary methodologies employed for sentiment analysis are categorized into three main approaches: lexicon-based techniques, machine learning-based techniques, and hybrid approaches combining both. Among these, machine learning methods have generally outperformed traditional lexicon-based techniques, particularly in text classification tasks. Sasikala and Lourdusamy (2020) developed two advanced techniques for sentiment analysis and performance prediction of online products: the Deep Learning Modified Neural Network (DLMNN) and the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (IANFIS). These models operate within three analytical frameworks: rating-based (GB), content-based (CB), and collaborative (CLB) analysis. The DLMNN model demonstrated efficiency by reducing training time while enhancing classification accuracy. Conversely, the IANFIS system was designed to forecast product performance and anticipate consumer behavior trends. This approach incorporated essential preprocessing, feature extraction, feature selection, and review classification. Sentiment polarity was determined by calculating scores, enabling the classification of reviews as positive, negative, or neutral. For predictive analysis, weighted data metrics such as keyword frequency, word polarity, support, confidence, and entropy were utilized. Performance evaluations revealed that the CLB scenario achieved the highest accuracy, with a rate of 96.83% on a dataset of 5000 records.

In the study proposed by Zada and Albayrak (2023), Random Forest and AdaBoost ensemble learning techniques were used to compare user comments and user ratings on an online platform in Turkiye. First, 2237 comments were collected in a specific category. Basic natural language processing techniques were applied on the comments, the data was cleaned and analyzed. As a result of the experiments, the highest success was obtained using the Random Forest algorithm in the category with four stars (87.9%). As a result of the study, it was seen that user comments and ratings are not always compatible. For this reason, it is concluded that e-commerce platforms should integrate machine learning and natural language processing techniques into their systems while collecting user reviews. The integration of sentiment analysis with recommendation systems has the potential to greatly enhance recommendation quality by offering granular insights into user preferences and aversions. With a refined understanding of user needs, these systems can deliver more personalized and context-aware suggestions. Karabila et al. (2023) introduced a recommendation system leveraging the BERT model to analyze user sentiments expressed in comments. Their six-stage framework encompassed data collection, preprocessing, sentiment classification, recommendation generation, and evaluation. Comparative analysis of machine learning models used in the study revealed accuracy scores of 80.61% for Naïve Bayes, 81.45% for Decision Tree, 81.61% for Logistic Regression, and 80.90% for Support Vector Machine, whereas the BERT model achieved a notably higher accuracy of 91%.

Table 1. Comparison of state-of-the-art sentiment analysis in the literature.

Article	Dataset	Method	Performance
(Ullah et al., 2023)	Amazon product reviews	QBERT	F1-Macro: 0.91
(Ahmed and Wang, 2023)	SemEval 2014 & Amazon product reviews	Embedding CNN & BiLSTM using NGD	F1-Score: 0.81 Accuracy: 0.83
(Zhao et al., 2021)	Taobao,JD, Amazon and Ebay websites	LSIBA-ENN	Accuracy: 92.01%
(Prottasha et al., 2022)	Facebook, Twitter, and YouTube comments	Bangla-BERT+LSTM Word2vec	Accuracy: 94.15%
(Sasikala and Mary Immaculate Sheela, 2020)	Food review dataset	DLMNN, IANFIS	Accuracy: 93.77%
(Onan, 2021)	Twitter	CNN-LSTM	Accuracy: 93.85%
(Shankar et al., 2024)	Flipkart Products	Support Vector Machine	Accuracy: 85%
(Zada and Albayrak, 2023)	E-commerce product reviews	RandomForest	Accuracy: 87.9%
(Karabila et al, 2023)	Amazon Musical Instruments reviews	BERT	Accuracy: 91% F1-Score: 95%
This Study	**E-commerce product reviews**	**BERTurk**	**Accuracy: 96% F1-score: 96%**

Table 1 provides a comparative overview of state-of-the-art sentiment analysis methods from the literature, highlighting their datasets, methods, and performance metrics. For example, Ullah et al. (2023) employed QBERT on Amazon product reviews, achieving an F1-Macro score of 91%. Ahmed and Wang (2023) combined Embedding CNN and BiLSTM, obtaining an accuracy of 83% on datasets like SemEval 2014. Zhao et al. (2021) proposed a Local Search Improvised Bat Algorithm based Elman Neural Network (LSIBA-ENN) on data from platforms such as Taobao and Amazon, reporting an accuracy of 92.01%. Prottasha et al. (2022) demonstrated a 94.15% accuracy using a Bangla-BERT+LSTM model for sentiment analysis of Facebook, Twitter, and YouTube comments. Our study

stands out by employing a BERTurk model on e-commerce product reviews, yielding an accuracy and F1-score of 96%.

3. Materials and Methods

In this study, we compared the performance of machine learning models and pre-trained transformer-based models on 73392 data obtained via web scraping to perform sentiment analysis in product comments. The data preparation process included text conversion to lowercase letters, removal of punctuation and stop words, stemming, and TF-IDF vectorization. After these preprocessing steps, training and classification were applied. The machine learning models used include Support Vector Machine (SVM) (Suthaharan and Suthaharan, 2016a), Random Forest (RF) (Rigatti, 2017), Naive Bayes (NB) (Xu, 2018), Logistic Regression (LR) (Maalouf 2011), k-Nearest Neighbor (k-NN) (Peterson, 2009), Gradient Boosting (GB) (Natekin and Knoll, 2013), and decision tree (DT) (Suthaharan and Suthaharan, 2016b). Moreover, among the pre-trained transformer-based models, mBert (bert-base-multilingual-cased), BERTurk (bert-base-turkish-cased), XLNet, and DistilBERT were applied and compared. All materials and methods used in this study are explained in detail.

3.1 Data collection phase

In the data collection phase, a novel Turkish product reviews dataset on Trendyol e-commerce platform was created. To ensure both data quality and integrity, the data collection process is divided into several stages. These stages are described below:

Automatic Data Extraction: Using the Selenium library (Gundecha, 2015), automatic access to product review pages on the Trendyol platform was provided. By managing the Chrome driver via ChromeDriverManager (Sasikala and Mary Immaculate Sheela 2020; Wang et al. 2021), the relevant product pages were dynamically loaded and the page was scrolled by controlling the scroll bar so that all comments on the page were visible. This automation made the collection of large volumes of data efficient by providing access to all reviews of each product. This first step included a delay setting to account for the loading time between page scrolls. This ensured that no reviews were missed due to incomplete page loads.

HTML Parsing and Filtering: Once the visible page content was collected, the HTML content was parsed using the BeautifulSoup library and relevant information was extracted according to the HTML structure of the website (Shariff, 2019). Only the sections containing customer reviews were selected, excluding irrelevant text such as advertising content that was not included in the dataset.

Manual Data Labeling: After a total of 73392 comments were captured, each comment was manually checked and labeled into positive, negative or neutral categories for sentiment analysis. The labeling resulted in 60109 positive, 11867 negative and 1416 neutral samples. Manual labeling, performed by three anotators, was used to ensure consistency and reduce bias. Following specific guidelines, anotators labeled positive comments with expressions of satisfaction or high scores, negative comments with complaints or low scores, and neutral comments with mixed or objective statements. To maintain labeling quality, agreement checks were regularly performed between anotators to ensure consistency across emotion labels. The generated dataset can be accesed in Data Availabiliy section.

After the labeling process, the 15 most frequently used bigrams in positive, neutral and negative comments were extracted shown in Figures 1. The graphs in Figure 1 show that bigrams such as “tam”, “oldu”, “tam”, “beden” are commonly used in all class types.

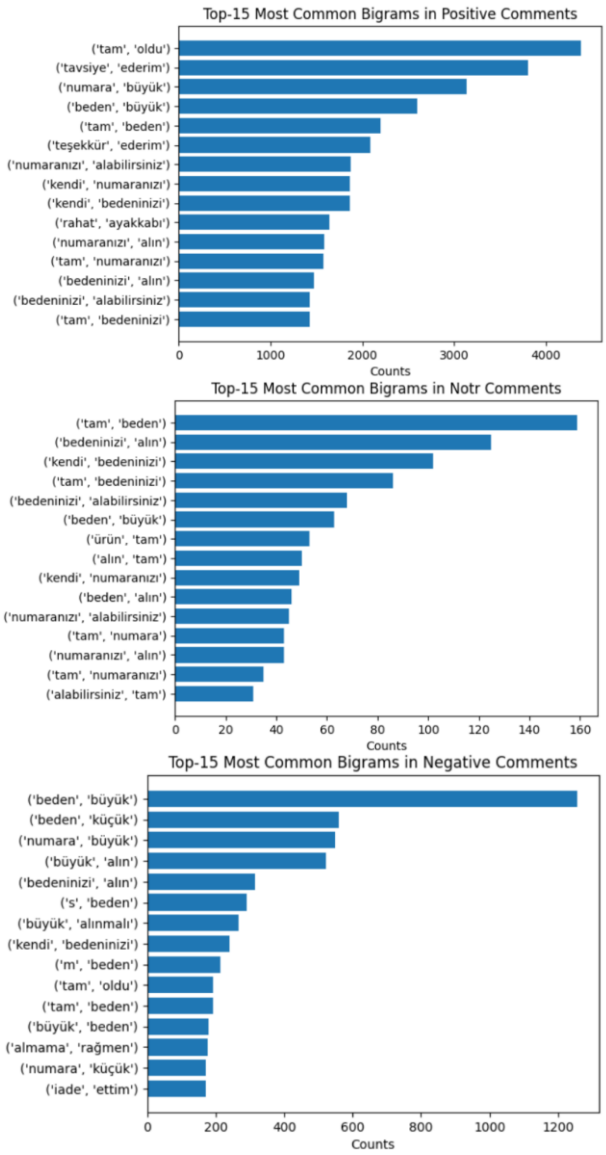


Figure 1. Top-15 Most Common Bigrams for Each Type of Comments

Data Quality Checks and Preprocessing: Before the dataset was finalized, data quality checks were performed to identify and remove duplicate, missing or irrelevant comments. The preprocessing step is one of the necessary steps to build models efficiently and accurately. The preprocessing step is designed to remove unimportant features from the text and select important features, revealing the distinctive features of the data. This process involves a series of operations that transform the raw text into a clean and structured format suitable for deep learning algorithms:

- *Lowercase conversion :* This step standardizes the text by converting all characters to lowercase. It ensures that words are treated the same regardless of case, which helps to identify patterns and semantics without case-related inconsistencies.
- *Removal of punctuation, numbers and emojis:* They do not carry semantic meaning within the sentence and can create noise in the data. Removing them helps clean up the text and makes it easier for the model to focus on and process meaningful content.
- *Removal of stopwords:* Stopwords are common words that do not add significant meaning to the text. Removing stopwords reduces the size of the text and improves the ability to identify patterns and related features in the data by shifting the focus to meaningful words. In the scope of the study, the Turkish stopwords of the nltk library as well as a manually defined stopword list were created and applied to the dataset.

The aim of this step is to prepare the data for artificial intelligence models by removing noise and emphasizing relevant information. After preprocessing, the dataset was found to be unbalanced in terms of class distribution. To avoid this, cluster-based undersampling method was applied to the original dataset. Cluster-based undersampling is an advanced undersampling method in contrast to the classical randomization-based undersampling method, which is applied when there are large imbalances in the data sets (Vigneron et al, 2016). This method first divides the samples from the majority class into various clusters. By selecting a few representative samples for each cluster, the total data set is reduced and made more balanced by ensuring that meaningful samples are selected from the majority class while preserving the diversity in the data set. This method aims to minimize information loss and provide a more meaningful representation of the majority class by selecting samples representing different regions in the dataset. In this dataset with a high number of positive classes, K-Means Clustering algorithm was used for clustering using feature vectors generated by TF-IDF (Lin et al. 2017). A certain number of samples were selected from each cluster and the dataset was balanced by reducing the total number of the positive class while preserving different examples of positive comments in the dataset. Thus, we obtained two different datasets on which we can measure performance, together with a new undersampling dataset with a total of 28283 samples, including 15000 positive, 11867 negative and 1416 neutral samples.

Figure 2 shows the general flowchart of data collection and web scraping processes. As a first step of the process, a cs file containing Trendyol reviews was read using the pandas library. Each line in this file contains a URL link to a product's reviews. Next, the selenium library was used to create a web driver that automatically controls the web browser; the tools required for this purpose include cabdriver and ChromeDriverManager (Sasikala and Mary Immaculate Sheela, 2020; Wang et al, 2021). A connection to the Trendyol website was established by launching the browser service. The browser was then opened to access the Trendyol website. To collect product reviews, we navigated to the relevant pages on Trendyol and scrolled the page so that all reviews were visible. After scrolling, the HTML content containing the reviews was extracted using the BeautifulSoup library, and the reviews were filtered according to a specific HTML structure (Shariff 2019). The resulting reviews were combined with other information, such as the product name, price, and review score, etc. and a single data frame was created. Finally, the data frame was exported to a CSV file containing reviews and other information about Trendyol products.

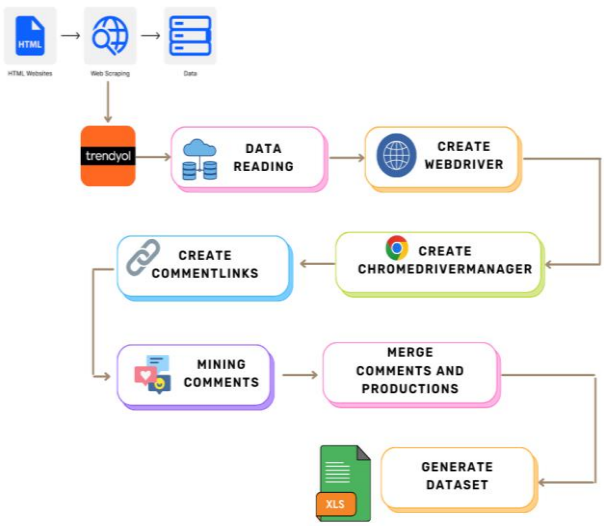


Figure 2. The general flowchart of web scraping and data collection phase

3.2 Sentiment Analysis

Today, one of the most important factors when shopping online is product reviews (Baubonienė and Gulevičiūtė 2015). There are many positive, negative, or neutral comments on the products we purchased. By analyzing the sentiments expressed in these comments, it is possible to evaluate the overall satisfaction of customers and make decisions accordingly. For sellers, developing product-related strategies, such as sales planning and material stock, depends on customer satisfaction (Jones et al. 2008). In this context, sellers must use sentiment analysis to understand customer satisfaction. Sentiment analysis in reviews is crucial for both customers and sellers to learn about a product and facilitate the shopping experience. Therefore, sentiment analysis on e-commerce platforms is a critical step to ensure an effective shopping experience. Sentiment analysis is a NLP technique that is used to automatically detect and classify emotions and feelings in texts. In the sentiment analysis process, the data cleaning phase after data collection is of great importance. This stage includes data preprocessing steps. When performing sentiment analysis on the commentary texts, elements that are not useful for analysis, such as numerical information, punctuation marks, and words without meaning, are removed. In addition, the entire text is converted to lower-case letters, and stemming is performed. After these preprocessing steps, the cleaned data are presented to the sentiment analysis algorithms. The results of the algorithm classified the emotions in the texts into specific categories. A general sentiment analysis flow diagram is presented in Figure 3.

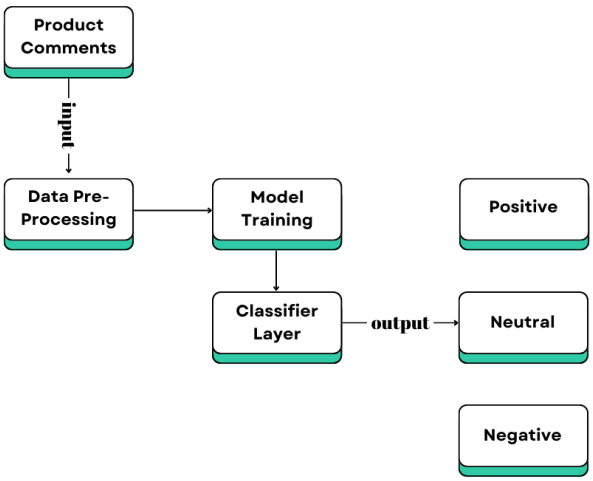


Figure 3. Fundamental sentiment analysis flowchart

There are various methods used in the field of sentiment analysis. These methods include algorithms such as Support Vector Machines (SVM), Naive Bayes (NB) and Long Short-Term Memory (LSTM), which are machine learning techniques. In addition, deep learning methods such as recurrent neural networks (RNN), convolutional neural networks (CNN) and Transformer-based models, especially BERT, are widely used for sentiment analysis. Deep learning models have the capacity to perform sentiment analysis with higher accuracy on large data sets. In this section, the sentiment analysis was examined in detail using both machine learning methods and deep learning approaches.

3.2.1. Sentiment analysis with Traditional Machine Learning Models

In this section, sentiment analysis was performed on Turkish product reviews using traditional machine learning methods. The goal of this analysis was to compare the sentiment classification performances of various machine learning algorithms. The dataset used included product reviews collected from the Trendyol e-commerce platform. The reviews were manually labeled as positive, negative, and neutral. Due to imbalanced data, we used undersampling method and created smaller dataset by dividing the samples in the majority class into various clusters. The two datasets were classified using machine learning methods. Table 2 and 3 shows the distribution of positive, negative, and neutral product reviews in the original and undersampled dataset resepectively.

Table 2. Number of instances according to the sentiments in the original dataset

Class	Number of instances
Positive	60109
Neutral	11867
Negative	1416

Table 3. Number of instances according to the sentiments in the undersampled dataset

Class	Number of instances
Positive	15000
Neutral	11867
Negative	1416

Figure 4 shows a flowchart of a basic sentiment analysis using machine learning models. After generating the dataset, preprocessing techniques were applied to a dataset of product reviews received from Trendyol customers. The aim was to highlight relevant information by removing noise from the data. These preprocessing steps are critical for ensuring that the deep learning model can learn effectively from the data and make accurate predictions. First, the text was standardized by converting all characters into lowercase letters. This process ensures that words are treated the same regardless of their uppercase/lowercase letters, thus eliminating inconsistencies between patterns and

meanings (Rathi et al. 2018). Removing punctuation marks helps clean up signs that create noise rather than meaningful content, which makes it easier for the model to focus on meaningful content. In addition, the text size was reduced by removing “stopwords” that did not meaningfully contribute, and focus was placed on meaningful words. This step improves the identification of patterns and important features in the data. The implementation of these preprocessing steps attempts to increase the performance and accuracy of deep learning models by improving the quality of the input data. The careful preparation of data is fundamental to the success of machine learning and deep learning tasks because it directly affects the model’s ability to learn and generalize from the data.

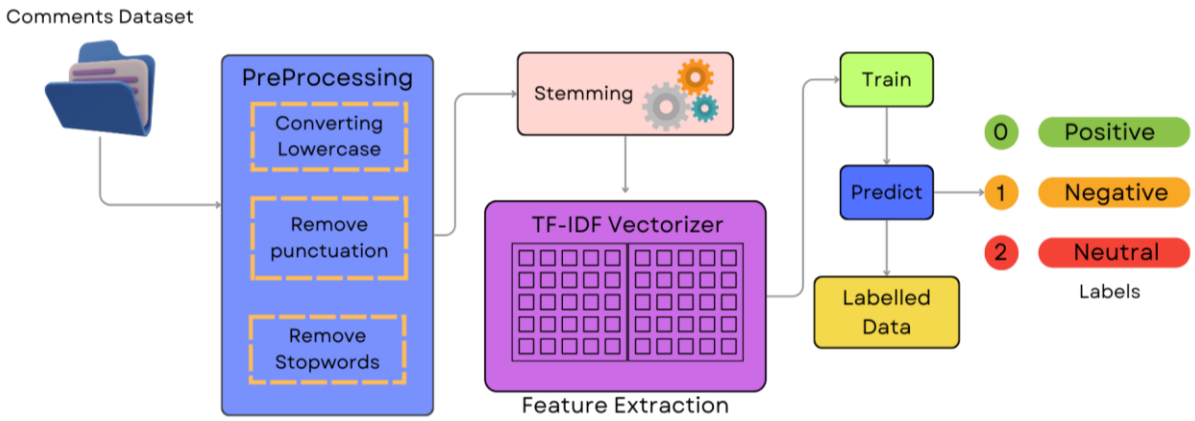


Figure 4. Flowchart of sentiment analysis with machine learning models

Stemming, a preprocessing method, is the process of reducing words to their root or basic form. This step is of great importance in the context of NLP because it reduces the dimensionality of data and allows words derived from the same root to be treated as a single feature. For example, the Turkish words "koşmak" (running) and "koşucu" (runner) can be reduced to the root "koş" (run). In our study, Snowball stemmer was used to effectively handle the morphological complexity of Turkish. This tool provides a convenient method for processing various root and suffix forms in the Turkish language. Then, we applied term frequency-inverse document frequency (TF-IDF) vectorization to the preprocessed and stemmed text data. TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) vectorization is a statistical measure used to evaluate the importance of a word in a document against a collection of documents (Kubrusly and Valenotti 2024). This method determines the importance of a word by taking into account how often the word occurs in a given document (term frequency) and how common the word is in the entire collection (inverse document frequency). After data preprocessing and vectorization, the dataset was divided into training and testing sets. Various machine learning models used in this study were trained on training data and evaluated on test data. The models used included support vector machine (SVM), Random Forest (RF), Naive Bayes (NB), Logistic Regression (LR), k-Nearest Neighbors (kNN), Gradient Boosting (GB), and Decision Trees (DT). Each model was trained on the same dataset to ensure fair comparison of performance.

The results of each model were compared based on performance metrics such as accuracy, precision, recall, and F1 score. The SVM model demonstrated superior performance with 89% and 84% accuracy rates, as shown in Table 4 and Table 7, demonstrating its effectiveness in emotion classification tasks. The evaluation metrics and complexity matrices provided detailed insight into the performance of each model, highlighting strengths and areas for improvement.

3.2.2. Sentiment analysis using BERT

In this study, in addition to traditional machine learning models, it was aimed to comprehensively evaluate the performance of sentiment analysis using the BERT model on Turkish product reviews. Within the scope of the study, it was aimed to compare the performances of both a transformer-based model such as BERT and classical machine learning algorithms such as SVM, Naive Bayes and Random Forest by training them on the same dataset. Reviews are divided into positive, neutral or negative categories and analysis processes are discussed in detail. In the research, data preparation, model training, evaluation and prediction processes are explained comprehensively. After the training was completed, the proposed models were tested on new probes and the results were comparatively discussed. Sentiment analysis is a critical area of NLP and focuses on accurately detecting and categorizing opinions in texts. This analysis is critical to understanding customer feedback, improving user experiences, and helping businesses make strategic

decisions. The BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) model used in the study stands out with its ability to analyze the meanings of words not only in context but also according to their relationships in the sentence. This feature makes BERT an ideal model for sentiment analysis, especially in morphologically rich languages such as Turkish. The model's ability to accurately capture the semantic relationships between words and cope with complex language structures increased its effectiveness in this project. As a result of this study, transformer-based models and traditional machine learning models were compared and the effectiveness of the modes was evaluated according to the performance metrics. The findings aim to guide businesses and researchers on which models can be used in sentiment analysis and how to get better results. Figure 5 shows the steps of sentiment analysis performed with the BERT model and the operation of the process in detail.

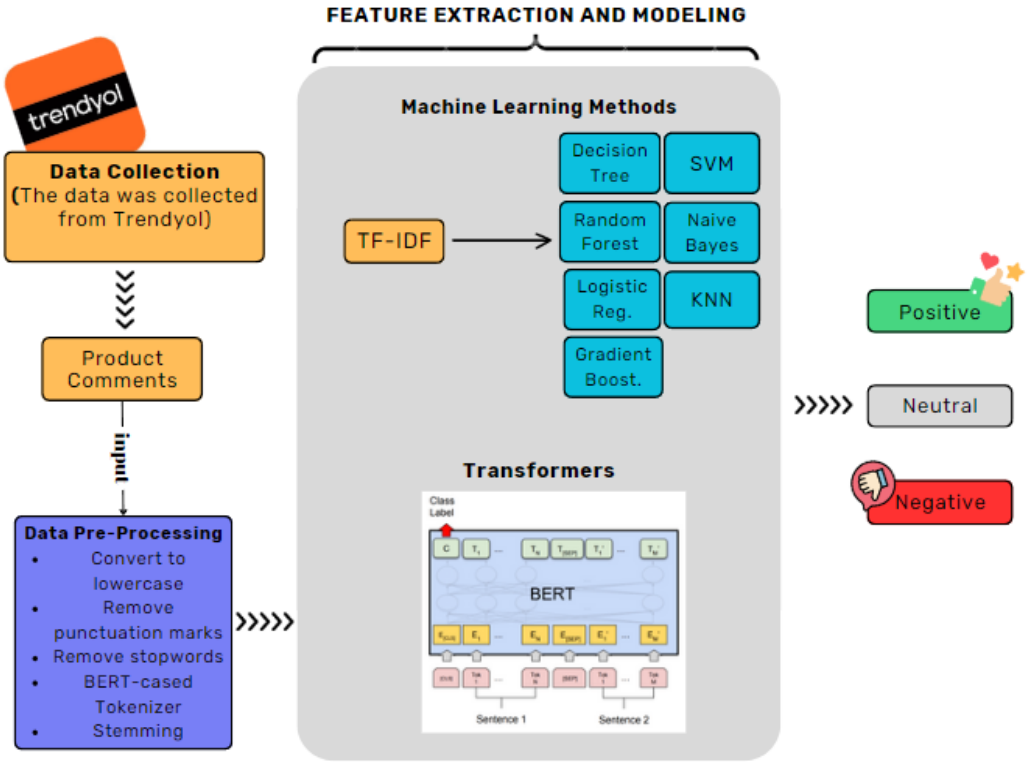


Figure 5. Flowchart of sentiment analysis with BERT model

First, the text data were processed using BERT tokenization to make them suitable for the input data of the BERT model. This process converts the texts into tokens that the BERT model can understand and organizes the data in the structure required by the model. During the tokenization process, special tokens ([CLS] and [SEP]) are added; the [CLS] token is used for classification tasks, and the [SEP] token indicates the distinction between sentences. While the tokens are converted to numerical values, attention masks are created that indicate which tokens the model should pay attention to. In these masks, the real tokens are denoted by 1, and the padding tokens are denoted by 0. For the model to process efficiently, all input sequences were filled to the same length, and short sequences were completed with zeros in this process. Processed tensors are prepared as inputs to the model, and the model receives these tensors. The model outputs were obtained in the form of raw scores (logits), which were converted to probabilities using the softmax function. These probabilities are used to determine which sentiment label has the highest accuracy. In the model training and classification phases, the BERT model was loaded and configured to classify the three emotional labels. If available, the model was transferred to a GPU, and the loss function was defined using the optimizer. The model was trained for several epochs, and during each epoch, the training loss was calculated and printed to the screen. The performance of the model was evaluated on the validation set, and the validation loss and accuracy were reported. After training, the performance of the model was analyzed in more detail using a classification report and confusion matrix; this analysis provides information about how well the model can distinguish between different emotion classes. The weights of the trained model were saved for future use. The trained model was loaded with a new dataset to

predict the sentiment of new comments, converted the comments into tokens, and then applied to generate emotional predictions. A function was defined to predict the sentiment of a given text, which converted the text into tokens, applied the model, and returned the probabilities along with the predicted sentiment. The comments were processed, and the predicted sentiments and probabilities of these sentiments were added to the dataset. The dataset was then saved in an Excel file. This study demonstrated the effectiveness of BERT in the sentiment analysis of Turkish product reviews. By carefully preparing the data, fine-tuning the model, and evaluating its performance, a robust sentiment analysis system was obtained. The data were classified into three categories: positive, negative, and neutral. The model's predictions can be used to obtain valuable information from customer feedback, which helps businesses in their decision-making processes and increases customer satisfaction.

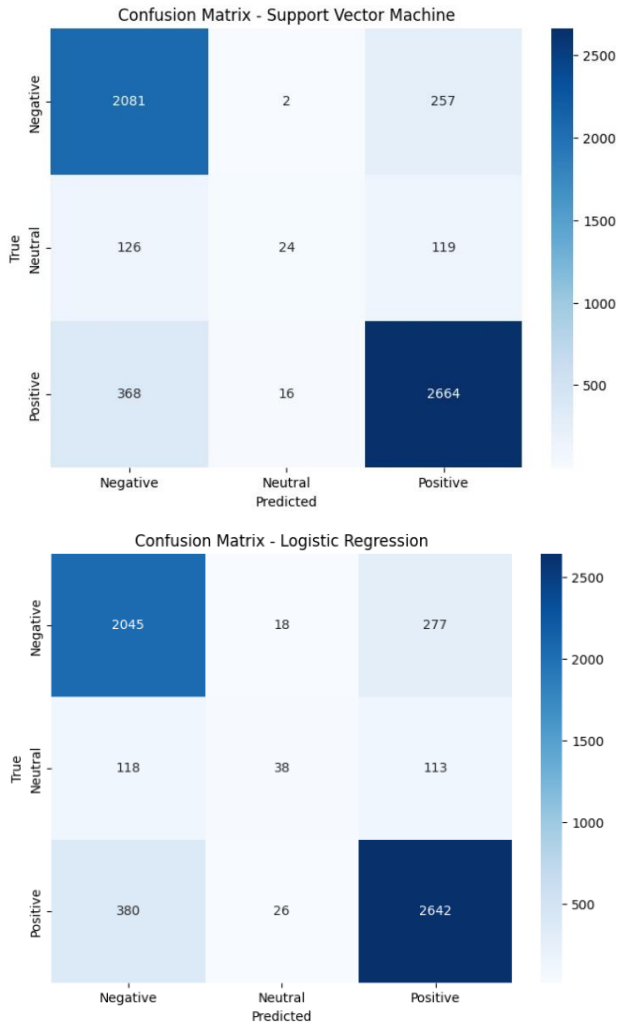


Figure 6. The confusion matrices obtained from the most successful traditional machine learning methods (SVM and LR) on cluster-base undersampled dataset

4. Experimental Results

In our dataset, 20% of the total comments were separated as test data, and the distinct remaining 80% were used as training data. This method allows a more reliable evaluation of model performance by dividing the dataset into training and testing stages. The training model was validated with 3-fold cross validation in machine learning methods. The confusion matrices obtained by the most successful traditional machine learning methods are presented in Figure 6.

The results obtained from the confusion matrix and calculated performance metrics demonstrate that the proposed model demonstrates high performance in some classes; however, improvement is required in other classes. As a result of evaluations conducted among traditional machine learning methods, the SVM model obtained the highest accuracy rate (84%) according to the confusion matrices. According to the confusion matrix obtained from the BERTurk model in Figure 7, the model performs better in distinguishing between neutral and positive emotions than traditional machine learning methods. 129 positive predictions were found as neutral, and 207 positive predictions are found as negative emotions. The other 11616 positive emotions were classified correctly. The number of false negative and false positive predictions was relatively low, indicating that the model generally provided high weighted average accuracy.

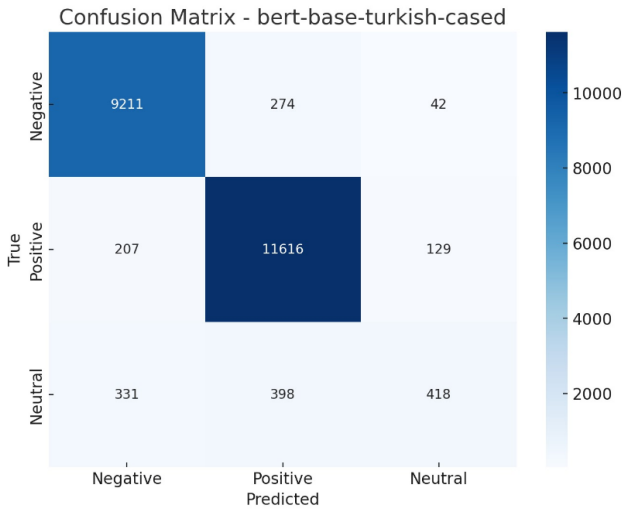


Figure 7. Confusion matrix obtained from BERTurk model on the cluster-base undersampled dataset

When we examine the sentiment analysis test results on original dataset in Table 4; although the accuracy rates of traditional machine learning models are promising, the differences in recall and F1-Score values demonstrate that these models are unsuccessful in predicting data belonging to certain classes. The reason for this failure

may be that these models are not sufficiently complex to analyze complicated data structures. The experimental results show that BerTurk, which is a pre-trained model with a multi-layer transformer architecture, produced higher results compare to the other transformer-based models and machine learning methods. Owing to the complex neural network structures, the model successfully processed long-distance dependencies and exhibited at least 7% higher accuracy than machine learning methods.

Table 4. Performance comparison of the machine learning models, mBERT, BERTurk, XLNet and DistilBERT on the original dataset

Model	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1 Score (%)
SVM	**89**	**87**	**89**	**88**
RF	88	87	88	86
NB	83	83	83	77
LR	88	86	89	87
kNN	82	81	83	82
GB	85	84	86	83
DT	84	84	85	84
mBERT	95	95	95	95
BERTurk	**96**	**96**	**96**	**96**
XLNet	92	92	93	92
DistilBERT	83	83	83	83

In this study, promising results were obtained despite training on a very low number of steps by limiting the number of epochs to five to prevent overfitting. Table 5 presents the training and validation losses and validation accuracy depending on the number of steps. The gradual decrease in training loss and relative stability of validation loss and accuracy across epochs indicate that the model learned effectively but did not exhibit significant overfitting. Further increasing the number of epochs may lead to overfitting and reduce the ability of the model to generalize to unseen data. On the other hand, a smaller number of epochs may lead to underfitting, such as the model is not learning enough from the training data and performs poorly on both the training and validation sets. By training with five epochs, the model was allowed to learn from the training data for a sufficient period of time, and overtraining, which could lead to overfitting, was avoided. This approach allowed the model to maintain high validation accuracy throughout the training process.

Although the average precision and recall values of the BERTurk model are quite high compared to traditional machine learning models and other transformer-based models, the performance of the neutral comment analysis is lower than other classes due to the unbalanced distribution in our dataset. Class-based precision, recall and F1 score values are given in Table 6.

Table 5. Training and validation loss and validation accuracy per epoch using the BERTurk model on the original dataset

Epoch	Training Loss	Validation Loss	Validation Accuracy
1/5	0.28	0.30	0.91
2/5	0.20	0.25	0.92
3/5	0.15	0.24	0.92
4/5	0.12	0.20	0.92
5/5	0.10	0.19	0.92

Table 6. Precision, Recall, and F1-Score values for each class in the BERTurk model on the original test dataset

Class	Precision	Recall	F1 Score
Negative	0.92	0.93	0.93
Neutral	0.77	0.11	0.20
Positive	0.97	0.99	0.98

Table 7. Performance comparison of the machine learning models, mBERT, BERTurk, XLNet and DistilBERT on cluster-based undersampled dataset

Model	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1 Score (%)
SVM	**84**	**83**	**84**	**83**
RF	82	81	83	82
NB	80	77	80	78
LR	83	82	84	83
kNN	72	73	73	73
GB	80	80	81	80
DT	77	77	78	77
mBERT	92	92	92	92
BERTurk	**93**	**93**	**94**	**93**
XLNet	88	88	88	88
DistilBERT	89	87	89	88

In order to increase the recall and F1 score values of the neutral labeled data in the original test dataset and to measure the performance of the algorithms on the balanced dataset, a more balanced dataset was created with the cluster-based undersampled method applied to the original dataset. Table 7 shows the performance of machine learning and transformer-based methods applied to the undersampled dataset. As seen in Table 7, the original dataset and cluster-based undersampled dataset showed similar performances in weighted average accuracy, precision, recall and F1 score values. SVM, one of the machine learning methods, outperformed the other machine learning models with an accuracy of 84%, while the BERTurk model outperformed all the methods performed in the experiment with an accuracy of 93% and an F1 score of 94%.

Table 8. Training and validation loss and validation accuracy per epoch using the BERTurk model on cluster-based undersampled dataset

Epoch	Training Loss	Validation Loss	Validation Accuracy
1/5	0.44	0.42	0.87
2/5	0.31	0.35	0.88
3/5	0.24	0.32	0.88
4/5	0.20	0.30	0.88
5/5	0.17	0.29	0.88

Table 9. Precision, Recall, and F1-Score values for each class in the BERTurk model on cluster-based undersampled test dataset

Class	Precision	Recall	F1 Score
Negative	0.94	0.97	0.96
Neutral	0.71	0.36	0.48
Positive	0.95	0.97	0.96

The training, validation losses and validation accuracy per epoch of the BERTurk model applied on the cluster-based undersampled dataset are given in Table 8, and the class-based performance of the BERTurk model on the test set is given in Table 9.

When the performance metrics of the neutral class obtained in Table 9 are compared with the metrics obtained from the original dataset shown in Table 6, an increase of 0.25 and 0.28 in recall and F1 score values is observed respectively. However, in terms of weighted average accuracy, precision, recall and F1 score values, the BERTurk model performed 3% better than the undersampled dataset due to the high number of positive values in the original dataset.

5. Discussion

In this study, we explored the efficacy of using the BERT model to analyze the sentiment of Turkish product reviews collected from the Trendyol e-commerce platform. The primary objective was to classify the sentiments expressed in reviews into positive, negative, or neutral categories, thereby providing valuable insights to help businesses improve customer satisfaction and product offerings.

Our experiments demonstrated that the BERTurk model outperformed traditional machine learning models and other transformer-based models in terms of accuracy, precision, recall, and F1-score (see Table 4 and Table 7). The traditional models, while effective to some extent, fell short in handling the complex structure of text data, which led to lower performance metrics. This underscores the limitations of classical approaches in capturing nuanced sentiments, particularly in a morphologically rich language like Turkish.

The BERTurk model's superior performance can be attributed to its ability to understand context and semantics through its bidirectional encoding mechanism. By fine-tuning the BERTurk model on our original dataset, we achieved significant improvements to the sentiment classification accuracy, reaching up to 96%. The confusion matrix (Figure 6) highlights the model's proficiency in distinguishing between positive and neutral sentiments, with high true positive and low false positive and false negative rates.

6. Conclusion

This study identifies positive comments that indicate customer satisfaction on e-commerce sites and helps understand the emotional states of customers by reading the comments. The dataset used to train the model was obtained through web scraping and included Turkish product reviews. The generated dataset was then semantically labeled with positive, negative, and neutral emotions. To make the data suitable for the model, the dataset was transformed and organized in the format required by the BERTurk model. The experimental results demonstrate that the proposed BERTurk model significantly exceeds traditional machine learning methods in terms of accuracy, precision, recall, and F1 score. The BERTurk model exhibited superior performance with a 96% and 93% accuracy rate in the original and undersampled dataset resepectively. When we consider the class-level performance, the results indicate that neutral labeled comments' classification is lower than the other classes. The reason why the precision, recall and F1 score values of the neutral labeled data in both datasets are lower than the other classes is that the words ("tam beden", "tam numara","kendi numaranızı", bedeninizi alabilirsiniz") in the comments with these labels are also included in the positive and negative comments. In conclusion, the experimental results have the potential to facilitate transactions between store owners and customers. Future research can improve the findings of this study. These may include expanding the dataset, integrating with more sophisticated recommendation systems, fine-tuning and optimizing the model, and developing real-time analysis systems. Overall, this study highlights the potential of the BERTurk model to revolutionize sentiment analysis in the e-commerce industry. The use of these techniques can provide businesses with deeper insights into customer feedback, thereby contributing to better decision making and increasing user satisfaction.

Declaration of Ethical Standards

The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, Methodology, Software, Validation

Author-2: Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Validation, Data curation, Writing – original draft

Author-3: Formal analysis, Investigation, Resources, Data curation, Writing – original draft

Author-4: Formal analysis, Investigation, Resources, Data curation, Writing – original draft

Author-5: Data curation, Writing – original draft, Writing – review and editing, Visualization, Supervision, Validation, Project administration

Declaration of Competing Interest
There is no conflict of interest between the authors.

Data Availability
The generated datasets can be accessed via kaggle public repository:
Original dataset:
https://www.kaggle.com/datasets/aliburahanbudak/e-ticaret-yorumlar-duygu-etiketlenmi
Cluster-based undersampled dataset:
https://www.kaggle.com/datasets/aliburahanbudak/hazr-etiketli-e-ticaret-yorumlar-dengelenmi/data

Acknowledgement

This study is supported by the project fund number 1919B012319774 provided by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK).

5. References

Ahmed, Z., and Wang, J., 2023. A fine-grained deep learning model using embedded-CNN with BiLSTM for exploiting product sentiments. *Alexandria Engineering Journal*, **65**, 731-747. https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.10.037

Alaparthi, S., and Mishra, M., 2021. BERT: A sentiment analysis odyssey. *Journal of Marketing Analytics*, 9, **2**, 118-126. https://doi.org/10.1057/s41270-021-00109-8

Amirhosseini, M. H., and Kazemian, H., 2019. Automating the process of identifying the preferred representational system in Neuro Linguistic Programming using Natural Language Processing. *Cognitive processing*, 20, **2**, 175-193.. https://doi.org/10.1007/s10339-019-00912-3

Anvar Shathik, J., and Krishna Prasad, K., 2020. A literature review on application of sentiment analysis using machine learning techniques. *Int J Appl Eng Manag Lett (IJAEML),* 4, **2**, 41-67. http://doi.org/10.5281/zenodo.3977576

Baubonienė, Ž., and Gulevičiūtė, G., 2015. E-commerce factors influencing consumers 'online shopping decision. https://doi.org/10.13165/ST-15-5-1-06

Gundecha, U., 2015. Selenium Testing Tools Cookbook. Packt Publishing Ltd. Birmingham, UK, 33-48

Jones, S. C., Knotts, T. L., and Udell, G. G., 2008. Market orientation for small manufacturing suppliers: The importance of product-related factors. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 23, **7**, 443-453. https://doi.org/10.1108/08858620810901202

Karabila, I., Darraz, N., El-Ansari, A., Alami, N., & El Mallahi, M., 2023. Enhancing collaborative filtering-based recommender system using sentiment analysis. *Future Internet*, 15, **7**, 235. https://doi.org/10.3390/fi15070235

Kratzwald, B., Ilić, S., Kraus, M., Feuerriegel, S., and Prendinger, H., 2018. Deep learning for affective computing: Text-based emotion recognition in decision support. *Decision support systems*, **115**, 24-35. https://doi.org/10.1016/j.dss.2018.09.002

Kubrusly, J., and Valenotti, G. G. L., 2024. Comparison of document vectorization methods: a case study with textual data. *Sigmae*, 13, **1**, 79-90.

Lin, W. C., Tsai, C. F., Hu, Y. H., and Jhang, J. S., 2017. Clustering-based undersampling in class-imbalanced data. *Information Sciences*, **409**, 17-26. https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.05.008

Lyu, F., and Choi, J., 2020. The forecasting sales volume and satisfaction of organic products through text mining on web customer reviews. *Sustainability*, 12, **11**, 4383. https://doi.org/10.3390/su12114383

Maalouf, M., 2011. Logistic regression in data analysis: an overview. *International Journal of Data Analysis Techniques and Strategies*, 3, **3**, 281-299.

Natekin, A., and Knoll, A., 2013. Gradient boosting machines, a tutorial. *Frontiers in neurorobotics*, 7, **21**. https://doi.org/10.3389/fnbot.2013.00021

Onan, A., 2021. Sentiment analysis on product reviews based on weighted word embeddings and deep neural networks. *Concurrency and computation: Practice and experience*, 33, **23**, e5909. https://doi.org/10.1002/cpe.5909

Peterson, L. E. J. S. , 2009. K-nearest neighbor. 4, **2**, 1883. CURRICULUM VITAE. https://doi.org/10.4249/scholarpedia

Prottasha, N. J., Sami, A. A., Kowsher, M., Murad, S. A., Bairagi, A. K., Masud, M., and Baz, M., 2022. Transfer learning for sentiment analysis using BERT based supervised fine-tuning. *Sensors*, 22, **11**, 4157. https://doi.org/10.3390/s22114157

Rathi, M., Malik, A., Varshney, D., Sharma, R., and Mendiratta, S., 2018. *Sentiment analysis of tweets using machine learning approach*. In 2018 IEEE Eleventh international conference on contemporary computing (IC3), Noida, India, 1-3.

Rigatti, Steven J., 2017, Random forest. *Journal of Insurance Medicine*. **47**, 1, 31-39. https://doi.org/10.17849/insm-47-01-31-39.1

Sasikala, P., and Mary Immaculate Sheela, L., 2020. Sentiment analysis of online product reviews using DLMNN and future prediction of online product using IANFIS. *Journal of Big Data*, 7, **1**, 33. https://doi.org/10.1186/s40537-020-00308-7

Shankar, A., Perumal, P., Subramanian, M., Ramu, N., Natesan, D., Kulkarni, V. R., and Stephan, T., 2024.

An intelligent recommendation system in e-commerce using ensemble learning. *Multimedia Tools and Applications*, 83, **16**, 48521-48537. https://doi.org/10.1007/s11042-023-17415-1

Shariff, S. M., 2019. Investigating Selenium Usage Challenges and Reducing the Performance Overhead of Selenium-Based Load Tests, Master Thesis, Kingston, Ontario, Canada, 100

Suthaharan, S., and Suthaharan, S., 2016. Support vector machine. Machine learning models and algorithms for big data classification: thinking with examples for effective learning, 207-235. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7641-3_9

Suthaharan, S., & Suthaharan, S., 2016. Decision tree learning. Machine Learning Models and Algorithms for Big Data Classification: Thinking with Examples for Effective Learning, 237-269. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7641-3_10

Ullah, A., Khan, K., Khan, A., and Ullah, S., 2023. Understanding quality of products from customers' attitude using advanced machine learning methods. Computers, 12, **3**, 49. https://doi.org/10.3390/computers12030049

Vigneron, V., and Chen, H. 2016. A multi-scale seriation algorithm for clustering sparse imbalanced data: application to spike sorting. *Pattern Analysis and Applications*, **19**, 885-903. https://doi.org/10.1007/s10044-015-0458-2

Wang, X., Yi, G., and Wang, Y., 2021. *Automated Functional Testing of Search Engines using Metamorphic Testing*. In 2021 IEEE 21st International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), Hainan, China, 22-29. https://doi.org/10.1109/QRS-C55045.2021.00014

Xu, S., 2018. Bayesian Naïve Bayes classifiers to text classification. *Journal of Information Science*, 44, **1**, 48-59. https://doi.org/10.1177/0165551516677946

Zada, A. J. J., and Albayrak, A., 2023. Duygu Analizi ve Topluluk Öğrenmesi Yaklaşımları ile Kullanıcı Yorumlarının Analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11, **4**, 1725-1732. https://doi.org/10.29130/dubited.1102181

Zhao, H., Liu, Z., Yao, X., and Yang, Q., 2021. A machine learning-based sentiment analysis of online product reviews with a novel term weighting and feature selection approach. *Information Processing & Management*, 58, **5,** 102656. https://doi.org/10.1016/j.ipm.2021.102656

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1550027
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035102 (510-521)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035102 (510-521)

Analysis of the Impact of Lifestyle Habits on the Spread of COVID-19 Using Artificial Intelligence

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 14.09.2024
Kabul/Accepted: 09.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

COVID-19'un Yayılma Sürecinde Yaşam Alışkanlıklarının Etkisinin Yapay Zeka ile Analizi

İrem Sena TEKİN, Erkan ÖZHAN*

Tekirdağ Namık Kemal University, Çorlu Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Tekirdağ, Türkiye

Öz

Pandemiler, toplumların sosyal ve ekonomik yapıları üzerinde önemli etkiler yaratan olaylardır ve bu süreçlerin yayılmasını etkileyen faktörlerin belirlenmesi, krizlerin yönetimi için önemli bilgiler sunar. Bu çalışmada, Türkiye'de COVID-19 pandemisi sırasında enfekte olan ve olmayan bireylerin davranışsal özellikleri ve alışkanlıkları yapay zeka teknikleri, özellikle sınıflandırma ve birliktelik kuralı metodolojileri kullanılarak analiz edilmiştir. Bulgular, Random Committee algoritmasının başarılı bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, öznitelik indirgeme uygulanmış ve RRF algoritmasının %81 doğruluk oranı ve 0.3663 kappa değeri ile daha yüksek performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Birliktelik kuralları analizi sonucunda, "Evet" sınıfı (COVID-19 enfekte olan) için 21 kural, "Hayır" sınıfı için ise 2805 kural tespit edilmiştir. Sonuçlar, yalnız yaşayan, günde 1-3 yakın temas yaşayan ve ev dışında 4-6 saat yakın temasta bulunan bireylerin "Evet" sınıfında güçlü birliktelikler sergilediğini göstermektedir. "Hayır" sınıfında ise sık sık seyahat etmekten kaçınan, pandeminin başından beri önemli bir kilo değişikliği yaşamayan, evden çalışan ve bazen açık alanlarda küçük sosyal etkinliklerden kaçınan bireylerin güçlü birliktelikler gösterdiği ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma yaşam tarzı alışkanlıklarının pandemilerin yayılımı üzerindeki etkisini bilimsel bulgularla göstermiş ve bu faktörlerin yapay zeka teknikleri kullanılarak modellenebileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: *Pandemi; Yaşam Alışkanlıkları; Yapay Zeka; Makine Öğrenmesi; Birliktelik Kuralları; Sınıflandırma.*

Abstract

Pandemics are events that significantly impact the social and economic structures of societies, and identifying the factors influencing their spread provides valuable insights for managing these crises. This study analyzed the behavioral characteristics and habits of individuals infected and not infected during the COVID-19 pandemic in Türkiye using artificial intelligence techniques, specifically classification and association rule methodologies. The findings revealed that the Random Committee algorithm performed effectively. Additionally, feature reduction was applied, and the RRF algorithm achieved higher performance with 81% accuracy and a kappa value of 0.3663. In the subsequent analysis of association rules, 21 rules were identified for the "Yes" class (infected with COVID-19), while 2805 rules were found for the "No" class. The results indicated that individuals who live alone, have 1-3 close contacts per day, and spend 4-6 hours in close contact outside the home exhibited strong associations in the "Yes" class. For the "No" class, individuals who frequently avoid travel, have had no significant weight change since the start of the pandemic, work from home, and sometimes avoid small social gatherings in open spaces showed strong associations. In conclusion, the study scientifically demonstrated that lifestyle habits impact the transmission and spread of pandemics and that these factors can be modeled using artificial intelligence techniques.

Keywords: *Pandemic; Life Habits; Artificial Intelligence; Machine Learning; Association Rules; Classification.*

1. Introduction

The coronavirus is a contagious virus that causes respiratory infections and can spread from person to person. It was first identified in the Wuhan region of China in early December 2019. The COVID-19 pandemic has become a significant public health crisis, severely impacting human health, well-being, and freedom of movement, while also negatively affecting the global economy (Tandan et al., 2021). As of April 30, 2022, a total of 510,270,667 cases and 6,233,526 deaths have been recorded worldwide (Asia, 2022). Scientists from around the world are working intensively and competing to develop vaccines and treatment methods.

One example of numerous studies is the Recovery trial, which demonstrated the benefits of dexamethasone use in hospitalized COVID-19 patients requiring respiratory support (The RECOVERY Collaborative Group, 2021). Similarly, significant progress has been made in the development of vaccines. Scientists are testing 119 vaccines in clinical trials. Vaccines such as Pfizer-BioNTech and Sinovac have demonstrated efficacy against COVID-19, leading to emergency use authorizations in the United

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Erkan ÖZHAN
e-posta / e-mail: erkanozhan@gmail.com

States, Canada, China, and many other countries (Zimmer et al., 2020). However, the safety profile of these vaccines in specific groups such as the elderly and those with chronic conditions remains unclear. Moreover, there is uncertainty regarding whether vaccine manufacturers will be able to meet the global demand and when the entire population will be vaccinated and fully protected against COVID-19.

According to a report from the Center for Infectious Disease Research and Policy, achieving herd immunity-where at least 60-70% of the global population is immune-is essential for ending the COVID-19 pandemic (Moore et al., 2020). For these reasons, it is clear that implementing appropriate health measures, such as testing individuals with symptoms similar to COVID-19, quarantining them, and identifying candidates for hospital care, is crucial. These measures are critical for controlling and managing COVID-19. Numerous studies have emerged that identify the clinical characteristics and determinants of the unprecedented increase in global COVID-19 cases (Älgå et al., 2020; Epsi et al., 2024; Mallah et al., 2021; Sahu et al., 2021; Xie et al., 2023). Cough 59.6%, fever 46.9%, fatigue 27.8% and dyspnea 20.23% were the most common clinical symptoms (Israfil et al., 2021). (Kartsonaki et al., 2023) found age, co-morbidities, smoking and obesity increased the risk of dying from SARS-CoV-2. (Tadie et al., 2024) stated that severe COVID-19 cases are affected by factors such as age, gender, vaccination, knowledge, diabetes, hypertension and insufficient knowledge; advanced age, diabetes and hypertension are important determinants. However, there are few modeling studies related to COVID-19 that address the relationships among various disease determinants. (Sabherwal et al., 2024) used various mathematical methods to model the spread of COVID-19, attempting to simulate the movement of the virus within the population, disease symptoms and spread. (Zheng et al., 2020) developed a hybrid AI model for China's COVID-19 outbreak prediction, enhancing accuracy with pandemi propagation data and natural language processing modules.

Today, advancements in data processing capabilities, structured data extraction, and data mining have made it possible to perform analyses using multiple data-related techniques, such as data classification, clustering, and similarity analysis, to establish relationships among different determinants (Adamo, 2001). In addition to the efforts made in developing COVID-19 vaccines, it is believed that using machine learning and artificial intelligence techniques can also accelerate the process (Libbrecht & Noble, 2015). Although many studies have been conducted on COVID-19, most approaches have focused on more complex methods for predictions, such as deep neural networks, RNNs, CNNs, and LSTMs (Alakus & Turkoglu, 2020). In recent years, machine learning techniques have been widely used in biomedical studies for prediction and knowledge discovery (Tarca et al., 2007).

This study examines the impact of lifestyle habits in Türkiye on the likelihood of contracting the virus responsible for the COVID-19 pandemic. The first section of the study reviews previous research in this area, followed by a description of the study's methodology. After providing information about the methodology, the experimental design section outlines the methods used in the study and the evaluation metrics, and the analysis results are discussed. Finally, the experimental results section presents and interprets the findings from classification and association rule analysis.

1.1 Literature Review

This section provides an overview of significant studies and current approaches in the literature for the automatic detection of COVID-19. In their study on the impact of COVID-19 and the Dutch 'intelligent lockdown' on daily mobility, de Haas, Faber, and Hamersma (2020) highlight significant changes in work, travel, and outdoor activities. (De Haas et al., 2020) approximately 80% of people reduced their outdoor activities, with older individuals showing the largest decline. Remote work increased substantially, with 39% of employees working almost entirely from home, and 27% expecting to continue this practice after the pandemic. Travel behavior also shifted, with a 55% reduction in trips and a 68% decrease in distance traveled. The study suggests that some of these changes, especially regarding remote work and active modes of transportation like walking and cycling, may become long-term trends (De Haas et al., 2020). Muralidharan et al. (2022) propose an approach for automatic COVID-19 detection using chest X-rays. They decompose a single X-ray image into seven modes, which are classified by a multi-scale deep CNN into normal, pneumonia, or COVID-19. Using two public datasets (1,225 and 9,000 images), the model achieved 96% and 100% accuracy for multi-class and binary classification, and 97.17% and 96.06% accuracy for the second dataset. The model outperformed existing methods (Muralidharan et al., 2022). Linden at al. (2022) developed a machine learning model using data from the Lean European Open Survey on SARS-CoV2-infected patients (LEOSS) to predict COVID-19 patient mortality, achieving 80% AUC. The study found intersections

between dementia-related molecular mechanisms and COVID-19 and suggested that some anti-cancer drugs might have potential efficacy against COVID-19 (Linden et al., 2021). Van Lissa et al. (2022) investigated the determinants of infection prevention behaviors during the early stages of the COVID-19 pandemic using a multinational survey. Conducted from March to May 2020 with 56,072 participants from 28 countries, the study used the Random Forests (RF) algorithm and predicted 52% of the variance in infection prevention behavior. The model highlighted that social beliefs and societal factors are more significant predictors than individual psychological states (Van Lissa et al., 2022). Tandan et al. (2020) analyzed COVID-19 patient data to identify common symptoms and patterns. In a study of 1,560 patients, the most common symptoms were fever (67%), cough (37%), fatigue/body ache (11%), pneumonia (11%), and sore throat (8%). The study highlights that cough is a significant symptom, especially in patients presenting with fever and heart failure (Tandan et al., 2021). Rahimi et al. (2021) reviewed machine learning prediction models for COVID-19. The study focused on classifying these models, evaluating their criteria, and comparing solution approaches. It highlighted COVID-19's global spread and over 36 million cases. Key findings include that medicine, biochemistry, and mathematics are the most discussed fields, with terms such as coronavirus, prediction, and epidemic being prominent. Deep Learning and sir models are noted as the most frequently used. The research aims to help identify gaps and develop new prediction models (Rahimi et al., 2023). Brinati et al. (2020) address the limitations of RRT-PCR tests for COVID-19 detection, such as long turnaround times and high costs, suggesting a need for quicker, cheaper alternatives. Using data from 279 patients at San Raffaele Hospital in Italy, two machine learning models were developed to distinguish between positive and negative cases. An interpretable decision tree model was also created to assist clinicians. The study shows that blood test analysis combined with machine learning can be a valuable alternative, particularly in resource-limited settings. Key indicators like lymphopenia and elevated C-reactive protein (CRP) levels were effectively linked to COVID-19 positivity by the models (Brinati et al., 2020).

In a study conducted by Zhang et al. (2020) in Hong Kong, the effects of the COVID-19 pandemic on social behaviors were examined. Their findings revealed that during the pandemic, daily close contacts decreased by 59%, while the total close contact time was reduced by 10%. These behavioral changes contributed to a 63.1% reduction in the risk of influenza transmission. The study highlighted that limiting close contact played a critical role in curbing the spread of the virus (Zhang et al., 2021). Similarly, in this study conducted in Türkiye, individuals who live alone and engage in 4-6 hours of close contact per day were found to have a higher likelihood of contracting COVID-19. These results underscore the significant impact of human behaviors on the transmission dynamics of pandemics.

This study examines the impact of factors, generally defined as personal characteristics and behaviors, on the spread of the COVID-19 pandemic using data mining and artificial intelligence techniques. The analysis was conducted on data collected from survey forms completed voluntarily. Initially, a data preprocessing phase was applied using basic data mining techniques. Then, classification algorithms were employed to predict whether individuals were infected with the virus based on their personality and behavioral characteristics. Finally, the behavior patterns of infected and non-infected individuals were extracted using association rules. This study provides several significant contributions to the existing literature on COVID-19:

- This research focuses on individuals' daily behavioral patterns and habits to identify precursor behaviors influencing individual transmission risk, contrasting previous studies that primarily focused on symptoms and medical data.
- This study uses association rule mining to analyze behavioral and habit-based data, expanding our understanding of social and individual factors influencing disease spread.
- Feature reduction techniques were applied to enhance the efficiency and performance of the data mining process.
- An AI-based model has been developed to automate the prediction of COVID-19 transmission by utilizing behavioral data. This model can serve as a valuable tool for decision-making and policy development.

This study addresses a gap in the existing literature on the transmission of the COVID-19 virus by exploring the role of behavioral factors, including the avoidance of travel, time spent in enclosed areas, and habits within and outside the home environment. The findings offer insights that can inform predictions regarding the spread of disease.

2. Materials and Methods

2.1 Data Preparation and Analysis

The data used in this study were collected through a survey created via Google Forms. The survey consists of 43 questions compiled from two main sources. The first source is the “ICARE Study Survey” (Duval & Collaborator, 2020). The second source comes from the survey

questions used in Zhang et al.'s study (Zhang et al., 2021). 515 survey responses formed the dataset for this study. Preprocessing involved converting data to nominal values and identifying outliers using WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis) and R-Studio. The processed data were then formatted as .arff for WEKA and .csv for R-Studio. The dataset contains 397 examples classified as "Yes" and 118 examples classified as "No". The data were transferred to WEKA in. arff format and to R-Studio in .csv format. All classification methods provided by WEKA and the apriori algorithm in R-Studio were used for analysis. The results obtained are detailed in the experimental results section.

2.2 Experimental Design

In this study, the data was analyzed using 54 nominal classification algorithms in WEKA with a 10-fold cross-validation method. The dataset was divided into 10 folds; each fold was used as a test set while the remaining 9 fold were used for training the model. In R-Studio, the apriori algorithm was employed for association rule mining with R programming language for each attribute in the dataset. Rules were derived based on the presence of COVID-19 virus in the test. The dataset contains two classes: “cov_enf_ol = Yes” and “cov_enf_ol” = No. To generate more reliable and robust rules, parameter constraints on confidence and support were applied to the algorithm. The performance of the methods was evaluated using metrics such as correctly classified instances, Kappa, precision, recall, f-measure, and root mean square error (RMSE). These metrics were compared to determine which methods yielded better results.

3. Methods Used in the Analysis

This section provides a detailed explanation of the classification and association rule mining algorithms used in the study. This study utilized the open-source software WEKA for applying classification models. Various machine learning algorithms were applied to the dataset created from the survey responses using WEKA, and their performance was evaluated. A total of 54 classification models were tested in WEKA, and the top 5 models (Random Committee, RRF, Random Forest, RDA, Boosting) were selected based on the Kappa metric and are discussed in this section. Additionally, the apriori algorithm was used for association rule mining in the R-Studio application, and details of the algorithm are provided in this section.

3.1 Random Committee

In the Random Committee algorithm, a series of base classifiers are created by using different random number nodes on the same data, and the final classification result is obtained by averaging the predictions made by these base classifiers (Niranjan et al., 2018). When analyzing algorithm performance, it was found that the best results were achieved by providing the Random Committee parameter to the MLR algorithm included in the R package.

3.2 RRF (Regularized Random Forest)

The RRF algorithm is a prediction model that works by creating numerous copies of a decision tree prediction model and using all these trees together. It operates similarly to the Random Forest algorithm but with a few differences. One major difference is that during the training of trees in the RRF algorithm, regularization is applied to prevent the overfitting problem. Another difference is the random rotation of attributes during the training process, giving each tree a unique attribute configuration, which helps improve the model's generalization. Finally, while the RRF algorithm uses a regularization parameter added to the loss function to prevent overfitting during training, this is not used in the Random Forest algorithm (Jana et al., 2021).

3.3 Random Forest

Random Forest is a machine learning method used for classification and regression analysis. It involves creating numerous copies of a decision tree prediction model and using all of these trees together. Each tree is trained on randomly selected samples from the dataset, and then makes predictions for all samples in the dataset (Fernández et al., 2020). The final prediction is made by averaging the predictions of all trees to achieve the most accurate result. A key feature that distinguishes Random Forest from other decision tree algorithms is that each tree works with a unique subset of data, leading to different predictions. This process reduces the influence of dominant features in the dataset and helps build a more robust model (Grekousis et al., 2022). Important parameters of the Random Forest algorithm include the number of trees, sampling method, feature selection, and node splitting criterion (Breiman, 2001).

3.4 Boosting

Adaboost is a boosting algorithm in machine learning designed to enhance accurate predictions. The core concept of this algorithm is to build an ensemble model to improve weak models and increase model accuracy. A weak model is defined as one with low performance or slightly better than a random classifier. Adaboost improves these weak classifiers by adjusting their weights and then constructs the final model (Walker, 2021).

3.5 Apriori

The Apriori algorithm is used in data mining and statistics. It was first introduced by Agrawal and Srikant in 1994 (Agrawal & Srikant, 1994). This algorithm helps to find frequently occurring items in a dataset and to identify item co-occurrences. It uses a frequency counter to calculate the occurrence of items, which increments for each row in the dataset where an item set appears (Papi et al., 2022).

4. Metrics Used in Evaluating Analysis Results

In this study, the open-source WEKA program was used to evaluate the performance of classification models. WEKA was employed to test 54 different classification algorithms on the dataset created from survey responses. The performance evaluations were based on the kappa metric as well as other important metrics, including Correctly Classified Instances (CCI), f-measure, precision, and recall. The top-performing algorithms, namely Random Committee, RRF, Random Forest, RDA, and Boosting, were identified and their details are discussed in this section. Additionally, the apriori algorithm was used for association rule mining in R-Studio, and details of this algorithm are also provided in this section.

4.1 Confusion Matrix

The confusion matrix is a table that includes all positive and negative examples of the model, showing how well the model has performed in classifying the test data. It is an important concept for performance evaluation. The matrix is calculated using four quantities, which are the entries of the confusion matrix. Table 1 presents the confusion matrix.

Table 1. Confusion Matrix.

	Actual Positive	**Actual Negative**
Predicted Positive	True Positive (TP)	False Positive (FP)
Predicted Negative	False Negative (FN)	True Negative (TN)

- *TP (True Positive):* Represents the number of positive examples correctly classified as positive. TP is the count of examples that are actually positive and are classified as positive by the model.
- *TN (True Negative):* Represents the number of negative examples correctly classified as negative. TN is the count of examples that are actually negative and are classified as negative by the model.
- *FP (False Positive):* Represents the number of negative examples incorrectly classified as positive. FP is the count of examples that are actually negative but are classified as positive by the model.
- *FN (False Negative):* Represents the number of positive examples incorrectly classified as negative. FN is the count of examples that are actually positive but are classified as negative by the model.

4.2 Root Mean Squared Error (RMSE)

Root Mean Squared Error (RMSE) is a measure of precision commonly used to assess the accuracy of a prediction model. It quantifies how much predicted values deviate from actual values. RMSE is particularly useful in evaluating the effects of different parameters during model development. The primary advantage of RMSE is that it provides a clear indication of the magnitude of errors in predictions. The RMSE formula is expressed in Equation (1) (Liemohn et al., 2021).

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

4.3 Precision

Precision measures the proportion of truly positive instances among those classified as positive. It indicates how many of the positively classified examples are actually positive. Precision is calculated as the ratio of correctly classified examples to all examples assigned to the positive class. Precision ranges from 0 to 1, where 1 means all examples in the class are correctly predicted, and 0 means none of the examples in the class are correctly predicted (Işik & Kapan Ulusoy, 2021). Precision is formulated by the Equation (2):

$$\mathrm{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \tag{2}$$

4.4 Recall

Recall, also known as True Positive Rate, is defined as the ratio of correctly classified positive examples to all examples assigned to the positive class. In short, it measures the proportion of positive examples that are correctly classified. Recall ranges between 0 and 1, where 1 represents a perfect positive class and 0 represents a complete miss of positive class examples. Recall is a crucial metric because it focuses on minimizing the number of missed positive examples. It provides the proportion of positive examples that the model successfully identifies or classifies. The formula for recall is given in Equation (3).

$$\mathrm{Recall} = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP} + \mathrm{FN}} \tag{3}$$

4.5 F-Measure (F-score)

When evaluated individually, precision and recall metrics may not yield meaningful and definitive results. In particular, with datasets that have imbalanced class distributions, these metrics can lead to misleading evaluations. Evaluating both metrics together provides a

more accurate assessment. The F-Measure, also known as the F-score in the literature, is the harmonic mean of precision and recall. The harmonic mean is used to avoid ignoring extreme values (Işik & Kapan Ulusoy, 2021). A high F1 score indicates that both metrics have high values, as shown in Equation (4).

$$F_1 = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \tag{4}$$

4.6 Accuracy (CCI-Correctly Classified Instances)

Accuracy is the ratio of the number of correctly classified instances by the model to the total number of instances in the dataset. While accuracy is a commonly used evaluation metric, it can be misleading, especially in datasets with imbalanced class distributions. For example, assigning all instances to the dominant class can achieve high accuracy, regardless of the performance on the minority class. Therefore, accuracy should be interpreted considering the actual class distribution. It generally represents the percentage of instances in the training data that were correctly predicted by the model. The formula for accuracy is given in Equation (5):

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \tag{5}$$

4.7 Kappa

Kappa is a metric that ranges between -1 and +1 and quantitatively measures the agreement between expected and observed values. A value close to +1 indicates a high level of agreement between the model's predictions and the actual values. Kappa is calculated using the formula in Equation (6) and represents the harmonic mean of precision and recall. Here, Pr(a) represents the expected agreement, Pr(e) represents the observed agreement, and Kappa (K) is calculated according to the chi-square table.

$$\kappa = \frac{\text{Pr(a)} - \text{Pr(e)}}{1 - \text{Pr(e)}} \tag{6}$$

5. Experimental Results

This section details the results of applying various artificial intelligence-based classification algorithms to our dataset. We first identify the most influential features for classification and then explore association rules within the data to understand relationships between variables and COVID-19 infection status.

4.1 Performance Evaluation of Classification Algorithms

In this study, the performance of classification algorithms was evaluated using the open-source software WEKA. WEKA is a comprehensive tool that encompasses machine learning and data mining techniques. Among WEKA's classification algorithms, 54 different models were tested. Based on the kappa value, the top 5 algorithms demonstrating the highest performance were identified, and the evaluation metrics for these algorithms are presented in Table 2.

Table 2. Top 10 Algorithms with the Best Evaluation Results.

Algorithm	Evaluation Metrics				
	CCI	Kappa	Precision	Recall	F-Measure
Random Committee	420	0.3172	0.812	0.816	0.777
RRF	417	0.2983	0.8	0.81	0.771
Random Forest	422	0.293	0.854	0.819	0.77
RDA	421	0.2883	0.845	0.817	0.769
Boosting	410	0.279	0.772	0.796	0.764
Ranger	416	0.2411	0.828	0.808	0.753
Lazy.IBk	388	0.2102	0.726	0.753	0.735
Evtree	407	0.2083	0.765	0.79	0.742
Ada	409	0.204	0.779	0.794	0.741
SMO	375	0.2019	0.718	0.728	0.723

Table 2 presents the top 10 algorithms based on various evaluation metrics. Among these, Random Committee exhibits the highest F-Measure score of 0.777. This indicates that Random Committee provides a well-balanced performance in terms of precision and recall. Although Random Forest leads in precision (0.854) and Recall (0.819), the Random Committee's F-Measure demonstrates superior overall classification effectiveness, highlighting its capability to harmonize precision and recall. Therefore, despite other algorithms showing higher precision or recall individually, Random Committee's robust F-Measure makes it particularly effective for classification tasks.

4.2 Feature Extraction and Reduction

Feature extraction and reduction play a crucial role in enhancing model performance. By using reduced features, models can achieve the same classification success with less data, which shortens the data collection process. Additionally, models with fewer features utilize computational resources more efficiently, leading to reduced hardware usage and shorter time to obtain

results. The most important features were identified using the SignificanceAttributeEval function in the WEKA software, as shown in Table 3.

Table 3. Top 10 Important Features.

Ranking Value	Attribute Name	Full Attribute Name
0.2714	kap_al_mas_tak	Mask Wearing in Indoor Spaces
0.2412	ger_olm_sey_kac	Avoiding Unnecessary Travel
0.2299	kac_coc?	Number of Children
0.2272	sab_suy_el_yik	Hand Washing with Soap
0.2128	int_haberden*	Internet News Consumption*
0.2107	yas_ara	Age Range
0.2072	han_kac_kisi	Number of People in Household
0.2040	siz_vir_var_ken_kar_al m	Taking Precautions During Pandemic
0.1781	elt_sig*	Electronic Cigarette Use*
0.1571	aci_al_buy_sos_top_ka c*	Avoiding Large Social Gatherings*
0.1505	dis_mas_kul	Mask Wearing Outdoors
0.1403	kil_ara	Age Interval
0.1368	yem_icm_mek_kac_der *	Eating/Drinking Outside Frequency*
0.1311	soylenti_agizdan_agiza	Word of Mouth Rumors
0.1264	aci_al_kuc_sos_top_kac *	Avoiding Small Social Gatherings*
0.1224	sag_diy_yem	Healthy Diet
0.121	sig_icm	Smoking
0.1196	sos_med_hab*	Social Media News Consumption*
0.1178	radyo_haber	Radio News Consumption
0.1175	sal_gen_hay_kal	Overall Life Quality During Pandemic
0.1505	dis_mas_kul	Mask Wearing Outdoors

The top feature in Table 3, "Mask Wearing in Indoor Spaces" (kap_al_mas_tak), has the highest importance value of 0.2714. This suggests that mask usage in enclosed areas plays a significant role in the classification model. Following closely, "Avoiding Unnecessary Travel" (ger_olm_sey_kac) and "Number of Children" (kac_coc?) are also highly influential with values of 0.2412 and 0.2299, respectively. These features indicate that both travel behavior and family size contribute significantly to the model's predictions. "Hand Washing with Soap" (sab_suy_el_yik) and "Internet News Consumption*" (int_haberden*) further highlight critical factors such as hygiene practices and information sources. The importance of these features underscores the role of personal health practices and news consumption in the classification process.

For feature reduction, the Particle Swarm Optimization (PSO) package developed by Moraglio et al. was used in the Weka software (Moraglio et al., 2007). The parameters were adjusted to “iterations=200, populationSize=40,” different from the default values. Results obtained using the “Use full training set” option are shown in Figure 2. Upon examining the reduced features and their importance ranking, it was observed that the features marked with * in Table 3 were not included among the reduced features. When the reduced features were used to reclassify the algorithms from Table 2, the results shown in Table 4 were obtained.

Table 4. Performance of classification algorithms using reduced features.

	Evaluation Metrics				
Algorithm	**CCI**	**Kappa**	**Precision**	**Recall**	**F-Measure**
RRF	421	0.3663	0.804	0.817	0.792
RDA	409	0.324	0.774	0.796	0.775
Random Forest	421	0.3164	0.820	0.817	0.777
Random Committee	413	0.3124	0.780	0.802	0.774
Boosting	407	0.3073	0.767	0.790	0.769
Lazy.IBk	402	0.302	0.759	0.781	0.765
Ranger	411	0.2437	0.780	0.798	0.754
Evtree	409	0.2351	0.771	0.794	0.751
Ada	405	0.2124	0.756	0.786	0.743
SMO	399	0.1564	0.732	0.775	0.725

In Table 4, the RRF algorithm demonstrates the highest performance in terms of accuracy (CCI: 421), which is comparable to the best-performing Random Forest algorithm from the Table 2. The RRF algorithm also shows high values in Kappa and F-Measure metrics, indicating a strong overall performance. Although the Random Committe algorithm maintained the highest F-Measure value in the Table 2, its performance has declined in some metrics. Specifically, the F-Measure value for Random Committe decreased from 0.777 to 0.774. In summary, feature reduction has improved the performance of some algorithms, with RRF achieving the highest results. However, the performance of some algorithms has declined compared to the Table 2. The comparison of Table 2 and Table 4 reveals that feature reduction has positively impacted the performance of certain algorithms, while it has led to a decrease in others. Notably, significant increases in F-Measure values are observed in the Lazy.IBk and RRF algorithms, indicating substantial improvements in classification performance after feature reduction. However, the Random Committee algorithm experienced a decline in its F-Measure, suggesting that reduced features resulted in a performance loss for this algorithm. Other algorithms

exhibited more limited changes in their F-Measure values (see Figure 1).

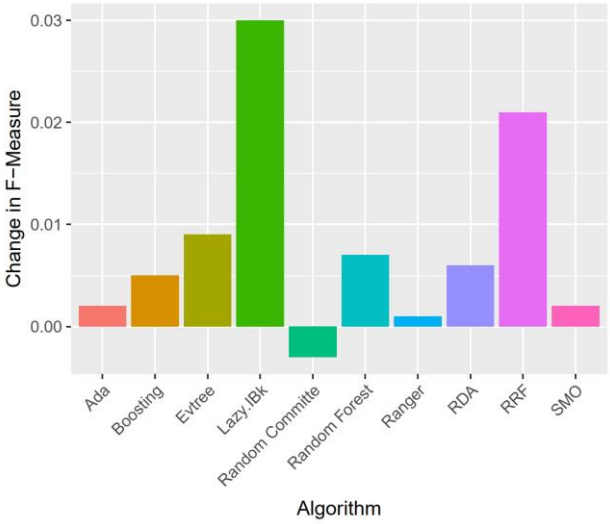


Figure 1. F-Measure Change After Feature Reduction

4.3 Association Rule Analysis and Results

In this section, the Apriori algorithm was used to discover association relationships between the attributes in the dataset. Specifically, the virus infection status (cov_enf_ol) was categorized into two classes: "Yes" and "No," and rules were extracted for both classes. During the tests, constraints were imposed on confidence and support values to obtain stronger rules.

The algorithm discovered only 90 rules for the "Yes" class, while approximately 7,469,192 rules were obtained for the "No" class. After rule reduction, the number of rules for the "Yes" class was reduced to 21. Table 5 lists the top 3 rules for the "Yes" and “No” class based on their confidence values. These results help us better understand the interaction between attributes concerning the virus infection status.

The association rules displayed in Table 5 highlight the first three rules identified for the “Yes” and “No” COVID-19 infection classes. In the “Yes” class, the first rule shows that individuals who live alone, have 1-3 daily close contacts, and spend 4-6 hours in close contact outside the home have a high likelihood of being infected. Similarly, men with a bachelor's degree, who spend 4-6 hours in closed spaces on weekends and have 1-3 close contacts daily, are also likely to be infected.

Shown in Table 5, In the "No" class, the first rule reveals that high school graduates who often believe in false information and experience no changes in body pain are not infected with COVID-19.

Likewise, those who mostly work remotely, attend small social gatherings, and follow TV news are not infected either. The third rule indicates that individuals living in a household of 4, who spend 1-3 hours outside the home on weekdays and mostly follow internet news, are not infected.

Table 5. Association rules for “Yes” and “No” classes.

Class	Association Rule	Sup.	Conf.
Evet	{household_size=1, daily_close_contacts=1-3, time_spent_outside_close_contacts =4-6 hours}	0.02	1
Evet	{gender=Male, last_degree=Bachelor, weekend_indoor_time=4-6 hours, daily_close_contacts=1-3}	0.02	1
Evet	{gender=Male, household_size=1, num_of_children=0, chronic_illness=No, daily_close_contacts=1-3, keep_distance=Most of the time}	0.02	0.92
Hayır	{last_degree=High School, belief_in_false_information=Often, headache_bodypain=No Change}	0.07	1
Hayır	{work_remotely=Most of the time, small_social_gatherings=Sometimes , tv_news=Mostly}	0.07	1
Hayır	{household_size=4, weekday_time_outside_home=1-3, internet_news=Mostly}	0.08	0.98

6. Results and Discussion

Understanding whether people's habits and behavioral characteristics are effective in the spread of epidemics can improve our ability to cope with future outbreaks. In this study, the impact of human habits and behavioral characteristics on the spread of COVID-19 during the pandemic in Türkiye was examined using artificial intelligence data mining techniques. Data collected through surveys were first cleaned and organized. The performance of classification algorithms was tested on the prepared data, and it was observed that the Random Committee algorithm demonstrated the best performance. This test, performed with 43 features, was repeated after feature reduction. It was found that the number of features could be reduced to 14. With these findings, performance tests of all classifiers were repeated, and an increase in performance was observed for all algorithms except Random Committee. The RRF algorithm, which showed the highest performance increase and yielded better results after feature reduction, was identified as the most suitable algorithm for classification. Additionally, the fact that the highest performance was observed with tree-based ensemble learning algorithms suggests that these algorithms are more effective for classifying this type of categorical nominal data.

According to the results of feature reduction, the variables mask_in_indoor, avoid_travel, num_children, hand_wash_soap, and age_range have been identified as the top 5 behavioral traits with the most significant impact on the course of the pandemic.

The association rule analysis provides significant findings regarding factors influencing COVID-19 infection for both the "Yes" and "No" classes. For the "Yes" class, rules such as living alone, frequent close contact, and spending 4-6 hours in close contact outside the home show a strong confidence level and high lift value. Additionally, an important rule involves males with a bachelor's degree who spend 4-6 hours in closed spaces on weekends and have frequent close contact, reinforcing the association with COVID-19 infection. The survey's findings, particularly the strong correlation between mask-wearing in enclosed spaces and avoiding travel, highlight potential crucial preventative measures for future pandemics. The association between virus transmission and lack of children also suggests a connection to loneliness. Loneliness might increase individuals' need to leave home and socialize, thereby potentially increasing the risk of virus transmission and spread. This warrants consideration of measures to address loneliness in future quarantines, such as teleconferencing-based interventions specifically targeting individuals living alone.

On the other hand, for the "No" class, key rules indicate that frequent mask usage, avoidance of travel, and a lower number of children are strongly associated with not contracting COVID-19. Furthermore, behaviors such as adhering to proper handwashing practices and avoiding travel unless necessary are also significant for this class.

These findings highlight the impact of specific behavioral traits on virus spread, showing that behaviors like mask-wearing and travel restrictions significantly affect infection rates. The performance improvements observed in classification algorithms when feature reduction was applied emphasize the importance of these factors in predicting COVID-19 outcomes.

7. Conclusions

In conclusion, it has been observed that the behaviors and habits exhibited by individuals during the pandemic in Türkiye had a significant impact on the progression of the outbreak. This impact can be utilized through artificial intelligence techniques for both classifier model development and association rule mining. The findings indicate that tree-based algorithms are more suitable for classification success and that feature reduction positively affects classification performance. During the pandemic, it was evident that patterns in the behaviors and habits of individuals infected and not infected with the virus could be revealed using artificial intelligence techniques. In the future, researchers can use or develop the methods employed in this study to conduct research on populations in different regions of the world and compare their findings with those from Türkiye.

8. Limitations and Recommendations

It should be noted that this study is subject to a number of acknowledged limitations. Primarily, the dataset comprises 515 responses, which, while sufficient for preliminary data mining analyses, may not fully represent the population of Turkey. Furthermore, the majority of participants are from Istanbul and the Marmara region, which may limit the generalizability of the findings to other regions with different cultural, social, or economic characteristics.

Due to the fact that the survey was conducted within a particular time frame, it is likely that the social and economic conditions that were in place at the time had an impact on the responses that the participants gave. Future research can aim to obtain a larger and more diverse data set with the objective of enhancing the findings' generalizability and robustness. Furthermore, the validity and generalizability of subsequent findings may be enhanced through the utilization of a combination of methods, approaches and/or longitudinal studies.

Declaration of Ethical Standards

Ethical approval for this study was obtained from the Scientific Research and Publication Ethics Committee of Tekirdağ Namık Kemal University, with the decision dated 18/06/2021, numbered T2021-648, and decision number 8.

This study is derived from a master's thesis (thesis number: 10529711) titled *"Analysis of the Effect of Life Habits in the Spreading Process of COVID-19 with Artificial Intelligence,"* defended on January 30, 2023, under the supervision of Assist. Prof. Erkan Özhan by İrem Sena Tekin in the Department of Computer Engineering at Tekirdağ Namık Kemal University, Institute of Natural and Applied Sciences.

Acknowledgments

This study is part of the Master of Science thesis by İrem Sena Tekin, conducted in the Department of Computer Engineering within the Institute of Natural and Applied Sciences at Tekirdağ Namık Kemal University, under the supervision of thesis advisor Erkan Özhan. The authors would like to thank the Institute for its support and all survey participants for their valuable contributions.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1 : Research, Analysis, Writing, Data curation, Review.

Author-2 : Research, Analysis, Data curation, Writing, Visualization, Editing and Supervision.

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability Statement
All data generated or analyzed during this study are included in this published article.
The data used in this study are retained for use in future research and are not currently available for public access. For further information about the data, please contact the authors.

9. References

Adamo, J.-M. (2001). *Data Mining for Association Rules and Sequential Patterns*. Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0085-4

Agrawal, R., & Srikant, R. (1994). Fast Algorithms for Mining Association Rules in Large Databases. *Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases*, 487–499.

Alakus, T. B., & Turkoglu, I. (2020). Comparison of deep learning approaches to predict COVID-19 infection. *Chaos, Solitons & Fractals*, *140*, 110120. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110120

Älgå, A., Eriksson, O., & Nordberg, M. (2020). Analysis of Scientific Publications During the Early Phase of the COVID-19 Pandemic: Topic Modeling Study. *Journal of Medical Internet Research*, *22*(11), e21559. https://doi.org/10.2196/21559

Asia, S. (2022). *Americas Covid-19 South-East Asia*. 1–5.

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Brinati, D., Campagner, A., Ferrari, D., Locatelli, M., Banfi, G., & Cabitza, F. (2020). Detection of COVID-19 Infection from Routine Blood Exams with Machine Learning: A Feasibility Study. *Journal of Medical Systems*, *44*(8), 135. https://doi.org/10.1007/s10916-020-01597-4

De Haas, M., Faber, R., & Hamersma, M. (2020). How COVID-19 and the Dutch 'intelligent lockdown' change activities, work and travel behaviour: Evidence from longitudinal data in the Netherlands. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *6*, 100150. https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100150

Duval, K. L., & Collaborator, S. B. (2020). *iCARE Collaborator Documents*. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/NSWCM

Epsi, N. J., Chenoweth, J. G., Blair, P. W., Lindholm, D. A., Ganesan, A., Lalani, T., Smith, A., Mody, R. M., Jones, M. U., Colombo, R. E., Colombo, C. J., Schofield, C., Ewers, E. C., Larson, D. T., Berjohn, C. M., Maves, R. C., Fries, A. C., Chang, D., Wyatt, A., … Richard, S. A. (2024). Precision Symptom Phenotyping Identifies Early Clinical and Proteomic Predictors of Distinct COVID-19 Sequelae. *The Journal of Infectious Diseases*, jiae318. https://doi.org/10.1093/infdis/jiae318

Fernández, R. R., Martín De Diego, I., Aceña, V., Fernández-Isabel, A., & Moguerza, J. M. (2020). Random forest explainability using counterfactual sets. *Information Fusion*, *63*, 196–207. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.07.001

Grekousis, G., Feng, Z., Marakakis, I., Lu, Y., & Wang, R. (2022). Ranking the importance of demographic, socioeconomic, and underlying health factors on US COVID-19 deaths: A geographical random forest approach. *Health & Place*, *74*, 102744. https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2022.102744

Işik, K., & Kapan Ulusoy, S. (2021). Metal Sektöründe üretim sürelerine etki eden faktörlerin veri madenciliği yöntemleriyle tespit edilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *36*(4), 1949–1962. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.736659

Israfil, S. M. H., Sarker, Md. M. R., Rashid, P. T., Talukder, A. A., Kawsar, K. A., Khan, F., Akhter, S., Poh, C. L., Mohamed, I. N., & Ming, L. C. (2021). Clinical Characteristics and Diagnostic Challenges of COVID−19: An Update From the Global Perspective. *Frontiers in Public Health*, *8*, 567395. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.567395

Jana, R. K., Ghosh, I., Das, D., & Dutta, A. (2021). Determinants of electronic waste generation in Bitcoin network: Evidence from the machine learning approach. *Technological Forecasting and Social Change*, *173*, 121101. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121101

Kartsonaki, C., Baillie, J. K., Barrio, N. G., Baruch, J., Beane, A., Blumberg, L., Bozza, F., Broadley, T., Burrell, A., Carson, G., Citarella, B. W., Dagens, A., Dankwa, E. A., Donnelly, C. A., Dunning, J., Elotmani, L., Escher, M., Farshait, N., Goffard, J.-C., … Zucman, D. (2023). Characteristics and outcomes of an international cohort of 600 000 hospitalized patients with COVID-19. *International Journal of Epidemiology*, *52*(2), 355–376. https://doi.org/10.1093/ije/dyad012

Libbrecht, M. W., & Noble, W. S. (2015). Machine learning applications in genetics and genomics. *Nature Reviews Genetics*, *16*(6), 321–332. https://doi.org/10.1038/nrg3920

Liemohn, M. W., Shane, A. D., Azari, A. R., Petersen, A. K., Swiger, B. M., & Mukhopadhyay, A. (2021). RMSE is not enough: Guidelines to robust data-model comparisons for magnetospheric physics. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *218*, 105624. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105624

Linden, T., Hanses, F., Domingo-Fernández, D., DeLong, L. N., Kodamullil, A. T., Schneider, J., Vehreschild, M. J. G. T., Lanznaster, J., Ruethrich, M. M., Borgmann, S., Hower, M., Wille, K., Feldt, T., Rieg, S., Hertenstein,

B., Wyen, C., Roemmele, C., Vehreschild, J. J., Jakob, C. E. M., … Fröhlich, H. (2021). Machine Learning Based Prediction of COVID-19 Mortality Suggests Repositioning of Anticancer Drug for Treating Severe Cases. *Artificial Intelligence in the Life Sciences*, *1*, 100020. https://doi.org/10.1016/j.ailsci.2021.100020

Mallah, S. I., Ghorab, O. K., Al-Salmi, S., Abdellatif, O. S., Tharmaratnam, T., Iskandar, M. A., Sefen, J. A. N., Sidhu, P., Atallah, B., El-Lababidi, R., & Al-Qahtani, M. (2021). COVID-19: Breaking down a global health crisis. *Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials*, *20*(1), 35. https://doi.org/10.1186/s12941-021-00438-7

Moore, K. A., Lipsitch, M., Barry, J. M., & Osterholm, M. T. (2020). COVID-19: The CIDRAP Viewpoint. *Center of Infectious Diseases Research and Policy*, 1–9.

Moraglio, A., Di Chio, C., & Poli, R. (2007). Geometric Particle Swarm Optimisation. In M. Ebner, M. O'Neill, A. Ekárt, L. Vanneschi, & A. I. Esparcia-Alcázar (Eds.), *Genetic Programming* (Vol. 4445, pp. 125–136). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71605-1_12

Muralidharan, N., Gupta, S., Prusty, M. R., & Tripathy, R. K. (2022). Detection of COVID19 from X-ray images using multiscale Deep Convolutional Neural Network. *Applied Soft Computing*, *119*, 108610. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108610

Niranjan, A., Prakash, A., Veena, N., Geetha, M., Shenoy, P. D., & Venugopal, K. R. (2018). EBJRV: An Ensemble of Bagging, J48 and Random Committee by Voting for Efficient Classification of Intrusions. *WIECON-ECE 2017 - IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering 2017*, 51–54. https://doi.org/10.1109/WIECON-ECE.2017.8468876

Papi, R., Attarchi, S., Darvishi Boloorani, A., & Neysani Samany, N. (2022). Knowledge discovery of Middle East dust sources using Apriori spatial data mining algorithm. *Ecological Informatics*, *72*, 101867. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101867

Rahimi, I., Chen, F., & Gandomi, A. H. (2023). A review on COVID-19 forecasting models. *Neural Computing and Applications*, *35*(33), 23671–23681. https://doi.org/10.1007/s00521-020-05626-8

Sabherwal, A. K., Sood, A., & Shah, M. A. (2024). Evaluating mathematical models for predicting the transmission of COVID-19 and its variants towards sustainable health and well-being. *Discover Sustainability*, *5*(1), 38. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00213-6

Sahu, A. K., Mathew, R., Aggarwal, P., Nayer, J., Bhoi, S., Satapathy, S., & Ekka, M. (2021). Clinical Determinants of Severe COVID-19 Disease – A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Global Infectious Diseases*, *13*(1), 13–19. https://doi.org/10.4103/jgid.jgid_136_20

Tadie, M. B., Yimer, Y. S., & Taye, G. (2024). Determinants of COVID-19 severity in Ethiopia: A multicentre case–control study. *BMJ Open*, *14*(5), e083076. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-083076

Tandan, M., Acharya, Y., Pokharel, S., & Timilsina, M. (2021). Discovering symptom patterns of COVID-19 patients using association rule mining. *Computers in Biology and Medicine*, *131*, 104249. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104249

Tarca, A. L., Carey, V. J., Chen, X., Romero, R., & Drăghici, S. (2007). Machine Learning and Its Applications to Biology. *PLoS Computational Biology*, *3*(6), e116. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.0030116

The RECOVERY Collaborative Group. (2021). Dexamethasone in Hospitalized Patients with Covid-19. *New England Journal of Medicine*, *384*(8), 693–704. https://doi.org/10.1056/NEJMoa2021436

Van Lissa, C. J., Stroebe, W., vanDellen, M. R., Leander, N. P., Agostini, M., Draws, T., Grygoryshyn, A., Gützgow, B., Kreienkamp, J., Vetter, C. S., Abakoumkin, G., Abdul Khaiyom, J. H., Ahmedi, V., Akkas, H., Almenara, C. A., Atta, M., Bagci, S. C., Basel, S., Kida, E. B., … Bélanger, J. J. (2022). Using machine learning to identify important predictors of COVID-19 infection prevention behaviors during the early phase of the pandemic. *Patterns*, *3*(4), 100482. https://doi.org/10.1016/j.patter.2022.100482

Walker, K. W. (2021). Exploring adaptive boosting (AdaBoost) as a platform for the predictive modeling of tangible collection usage. *The Journal of Academic Librarianship*, *47*(6), 102450. https://doi.org/10.1016/j.acalib.2021.102450

Xie, N., Zhang, W., Chen, J., Tian, F., & Song, J. (2023). Clinical Characteristics, Diagnosis, and Therapeutics of COVID-19: A Review. *Current Medical Science*, *43*(6), 1066–1074. https://doi.org/10.1007/s11596-023-2797-3

Zhang, N., Jia, W., Lei, H., Wang, P., Zhao, P., Guo, Y., Dung, C.-H., Bu, Z., Xue, P., Xie, J., Zhang, Y., Cheng, R., & Li, Y. (2021). Effects of Human Behavior Changes During the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Pandemic on Influenza Spread in Hong Kong. *Clinical Infectious Diseases*, *73*(5), e1142–e1150. https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1818

Zheng, N., Du, S., Wang, J., Zhang, H., Cui, W., Kang, Z., Yang, T., Lou, B., Chi, Y., Long, H., Ma, M., Yuan, Q., Zhang, S., Zhang, D., Ye, F., & Xin, J. (2020). Predicting COVID-19 in China Using Hybrid AI Model. *IEEE Transactions on Cybernetics*, *50*(7), 2891–2904.

https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.2990162

Internet References

1- Zimmer, C., Corum, J., Wee, S.-L., & Kristoffersen, M., Coronavirus Vaccine Tracker, https://www.nytimes.com/interactive/2020/science/coronavirus-vaccine-tracker.html, (10.06.2020).

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

e-ISSN: 2149-3367
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035103 (522-534)

DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1511843
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035103 (522-534)

Deprem Şiddet Tahmini İçin Derin Öğrenme Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Model Önerisi

***Makale Bilgisi / Article Info**
Alındı/Received: 07.07.2024
Kabul/Accepted: 26.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Comparison of Deep Learning Methods and Model Proposal for Earthquake Intensity Estimation)

Rabia UYAR[1*], Durmuş ÖZDEMİR[2]

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

Öz

Deprem, yer kabuğundaki kırılmalar sonucu oluşan enerjinin sismik dalgalar şeklinde yayılarak yeryüzünü sarsmasıdır. Deprem afeti ülkemizde dahil olmak üzere birçok ülkede şehirleşme ve yapılaşmadaki temel sorunlardan dolayı yeterince önlem alınamadığı için ciddi ölçüde kayıplar meydana getirmektedir. Bu tür kayıpları önlemek amacıyla, araştırmacılar deprem şiddetini ve depremin meydana geleceği yeri önceden tahmin etmek için çalışmalar yürütmektedir. Depremin meydana geleceği zamanı ve şiddetini tahmin edebilmek için, önceden meydana gelen depremlerin oluştuğu tarih, zaman, derinlik, enlem, boylam ve şiddet gibi verilerin bir araya getirilerek oluşturulan veri setinin çok iyi analiz edilerek faydalı deprem tahmin çalışmaları yürütülmektedir. Bu kapsamda, 1965-2022 yılları arasında ülkemizde meydana gelen büyük ve küçük şiddetteki depremlerin sadece deprem şiddeti verileri esas alınarak, meydana gelmesi muhtemel depremlerin şiddetlerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Belirlenen bu amaçlar doğrultusunda, depremlerin şiddetini tahmin edebilmek için, Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma Kurulundan elde edilen deprem katalog verileri kullanılarak, LSTM (Uzun-Kısa Vadeli Bellek) ile Deprem Şiddeti Tahmin Modeli ve YSA ile Deprem Şiddeti Tahmin Modeli olmak üzere iki farklı tahmin modeli geliştirilmiştir. Önerilen bu iki modelin tahmin sonuçları hem gerçek deprem verileriyle hem de Otomatik Regresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) modelinin tahmin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen iki modelden LSTM ile oluşturulan Deprem Şiddeti Tahmin Modeli (0,561 R-kare değeri), YSA ile oluşturulan modele (0,3 R-kare) kıyasla daha başarılı sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: *Derin öğrenme; Yapay sinir ağları; ARIMA; LSTM.*

Abstract

An earthquake is the shaking of the earth by the propagation of the energy generated as a result of fractures in the earth's crust in the form of seismic waves. Earthquake disasters cause severe losses in many countries, including our country, due to the lack of adequate precautions and fundamental problems in urbanization and construction. In order to prevent such losses, researchers are engaged in the process of developing predictive models for the intensity and location of earthquakes. To predict the time and intensity of the earthquake, helpful earthquake prediction studies are carried out by analyzing the data set created by combining data such as the date, time, depth, latitude, longitude, and intensity of previous earthquakes. In this context, the aim is to estimate the intensities of possible earthquakes based only on the earthquake intensity data of the large and small earthquakes that occurred in our country between 1965 and 2022. In line with these determined purposes, two different estimation models, namely the Earthquake Intensity Prediction Model with LSTM (Long short-term memory) and the Earthquake Intensity Prediction Model with ANN, were developed by using earthquake catalog data obtained from the United States Geological Survey Board to predict the intensity of earthquakes. Of the two proposed models, the Earthquake Intensity Prediction Model (0.561 R-square value) created with LSTM gave more successful results compared to the model created with ANN (0.3 R-square value).

Keywords: *Deep learning; Artificial neural networks; ARIMA; LSTM*

1. Giriş

Deprem, yer kabuğu içindeki kırılmaların ve magnetik hareketliliğin bir sonucu olarak ortaya çıkan titreşimlerin, dalga halinde yayılım yapmasıyla ani yeryüzünün sarsılması olayıdır (Topçu vd. 2017). Bu sarsılma nedeniyle yerkürenin üzerinde yer alan yapıları yıkarak çok ciddi ölçüde can ve mal kayıplarına yol açmaktadır (Özger, 2020; Öztürk ve Alkan, 2022). Ülkemiz, dünyanın en aktif fay hatlarının üzerinde yer aldığı için küçük ve büyük boyutlarda çok sayıda deprem meydana gelmektedir (Guo vd. 2022, Tan vd. 2021, Wu, 2022).

Geçmişte Türkiye'de birçok yıkıcı deprem meydana geldiği için, gelecekte depremin ülkemizde gerçekleşme ihtimali bulunduğundan depremlerin tahmin edilmesi oldukça önem arz etmektedir. Günümüzde insanoğlu, bilimsel açıdan depremlerin yıkıcı etkilerinden korunmamıza olanak sağlayacak ve sürekli olarak yeni bilgiler ile güncellenen bilgi birikimine sahiptir (Sumy vd.

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Rabia Uyar* *e-posta/e-mail: rabia.uyar@dpu.edu.tr*

2022). Fakat, deprem felaketi ülkemizde dahil olmak üzere birçok ülkede şehirleşme ve yapılaşmadaki temel sorunlardan dolayı, can ve mal kayıplarına neden olmaya devam etmektedir. Bu tür temel yetersizliklerin meydana getireceği hasarları en aza indirebilmek ve önemli can ve mal kayıplarının önüne geçebilmek için araştırmacılar, deprem şiddeti ve depremin meydana geldiği yeri önceden tahmin etmek için çalışmalar yürütmektedirler (Kuyuk ve Susumu, 2018; Laurenti vd. 2022). Ancak deprem felaketinin yeri, büyüklüğü ve zamanı kesin olarak doğru bir şekilde tahmin edilememektedir. Bu amaçla, geçmişten günümüze birçok matematiksel hesaplamalar, istatistiksel yöntemler ve teknikler kullanılmaktadır.

Deprem felaketinin çok yönlü analiz edilebilmesi için, depremin şiddeti, yeri ve zamanının belirlenmesi oldukça önemlidir. Çeşitli hesaplama yöntem ve metodlar kullanılarak yapılan tahmin çalışmalarının sayısı, her geçen gün artmaktadır. Yapay sinir ağları, makine öğrenimi algoritmaları vs. gibi yöntem ve teknikler kullanılarak farklı yer ve zamanlarda meydana gelen deprem felaketlerinin arasındaki temel ilişkileri ortaya çıkarmak ve olası depremi önceden tahmin etmek için araştırmalar yapılmaktadır (Kuang vd. 2021a). Kullanılan önemli yöntemlerden birisi de Derin Öğrenme tekniğidir. Derin öğrenmeyle birlikte Makine Öğrenmesi algoritmaları ve Yapay Sinir Ağlarıda deprem tahmini için kullanılmaktadır (Guo vd. 2022b). Deprem doğal afeti, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de çok fazla can ve mal kaybına neden olmaktadır. Bu yıkıcı hasarı en aza indirmek için bu tür deprem tahmini çalışmalarına yoğunlaşılması, geleceğimiz adına oldukça umut verici bir eylemdir. Diğer afetlere göre etki alanının geniş olması sebebiyle çok yönlü kayıplar meydana getiren depremler, beşeri ve ekonomik faaliyetlerimizi büyük ölçüde olumsuz yönde etkilemektedir (Jena vd. 2020a). Bu olumsuz etkileri en aza indirmek adına yapılan ve yapılacak olan tüm çalışmalarda, deprem tahmini araştırmaları popülerliğini her zaman koruyacak ve geniş araştırma alanları sunacaktır (Bayrak vd. 2021, Crespi vd. 2022, Doğan 2021, Jiao ve Shan 2022).

Büyük ve küçük şiddette meydana gelen depremler, günümüzde tam anlamıyla tahmin edilemez durumdadır (DeVries vd. 2018, Tan vd. 2021). Fakat depremin meydana getirdiği hasarı azaltmak için önemli adımlar atılarak, maddi ve manevi meydana gelecek kayıpları düşük seviyelere indirmek mümkündür. Deprem tahmin çalışmalarının asıl amacı, meydana gelecek depremleri önceden belirleyerek gerekli önlemlerin alınması ve bu sayede can ve mal kayıplarını azaltmaktır (Sumy vd. 2022). Depremin zamanı ve şiddetini tahmin edebilmek için, önceki depremlerin tarih, zaman, derinlik, enlem, boylam ve şiddet gibi verilerini içeren veri setleri analiz edilmekte ve bu sayede deprem tahmin çalışmaları yürütülmektedir (Joshi vd. 2022, Song vd. 2022).

Bu çalışmada, 1965-2022 yılları arasında ülkemizde meydana gelen büyük ve küçük şiddetteki depremlerin sadece deprem şiddeti verileri esas alınarak, meydana gelmesi muhtemel depremlerin klasik yapay sinir ağları kullanılarak geliştirilen Deprem şiddeti tahmin modeli (YSA ile DŞTM) ile olası depremlerin şiddetlerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın bir diğer amacı ise, depremin temel paremetleri olan tarih, zaman, derinlik, enlem, boylam ve şiddet verileri LSTM (Long-Sort Term Memory) ile DŞTM geliştirilmiştir. LSTM ile DŞTM modeliyle, depremin meydana geldiği zaman periyodunu dikkate alarak meydana gelmesi muhtemel depremin şiddet tahmininin yapılması amaçlanmaktadır. Belirlenen bu amaçlar doğrultusunda, depremlerin şiddetini tahmin edebilmek için, Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma Kurulundan elde edilen deprem katalog verileri kullanılarak, iki farklı model geliştirilmiştir. Önerilen bu iki modelin tahmin sonuçları hem gerçek deprem sonuçlarıyla hem de Otomatik Regresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) modelinin tahmin sonuçları ile karşılaştırılmış ve geliştirilen modellerin başarısı sunulmuştur.

1.1.Literatür Taraması

Bu alandaki çalışmalardan bazıları aşağıda belirtilmiştir. Ren vd. (2023), çalışmada deprem erken uyarı sistemlerinde sismik şiddetin tahmini için bir konvolüsyonel sinir ağı (CNN) kullanılmıştır. CNN, 4 saniyelik tek kanallı dalga formlarını analiz ederek deprem şiddetini sınıflandırır. Model, 5 büyüklüğünün üzerindeki depremleri %97.9 doğrulukla tespit etmiştir. Eğitim ve test verileri, Çin Deprem Ağı Merkezi (CENC) ve Stanford Deprem Veritabanı'ndan (STEAD) alınmıştır. Model, iki büyük deprem dizisi (Çangning ve Tangshan) üzerinde test edilmiş ve genel anlamda başarılı sonuçlar elde etmiştir. CNN'nin hızlı ve güvenilir tahmin yetenekleri, geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında önemli avantajlar sunmaktadır. Model, gerçek zamanlı testlerde de iyi bir performans göstermiştir.

Sebatlı-Sağlam ve Çavdur (2021), çalışmada yapay sinir ağı (YSA) ile deprem şiddeti tahmini gerçekleştirilmiştir. Depremin büyüklüğü, derinliği ve merkez üssüne olan uzaklık verileri, YSA'nın girdileri olarak kullanılmıştır. ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu'nun (USGS) veri tabanından elde edilen önemli depremler bu analizlerde temel alınmıştır. Farklı ağ tasarımları değerlendirilmiş ve en iyi sonuçları veren iki gizli katmanlı bir ağ yapısı

belirlenmiştir. Her katmanda beş ve on gizli nöron bulunan bu yapı, ortalama karesel hata (OKH) açısından en iyi performansı sağlamıştır. Eğitim için Levenberg-Marquardt algoritması ile Bayes düzenlemesi kullanılmış ve %96'ya yakın doğruluk elde edilmiştir. Bu yöntemle, deprem sonrası zarar tahmininde kullanılabilecek güvenilir bir model geliştirilmiştir. Çalışma, afet operasyonları yönetiminde de kullanılabilir ve gelecekteki çalışmalarda yaralı sayısı ve ekonomik kayıp gibi parametrelerin tahmini için temel oluşturabilir.

Abri ve Artuner (2022), çalışma depremlerin tespiti için iyonosferdeki Toplam Elektron İçeriği (TEC) değerlerine dayalı LSTM tabanlı derin öğrenme modelleri önermektedir. Araştırmada, iki GPS istasyonundan toplanan TEC verileri kullanılarak depremler ile iyonosferdeki bozulmalar arasındaki ilişki incelenmiştir. Şili bölgesi, güçlü depremlerle bilinirken, Karratha bölgesi daha sakin bir bölge olarak ele alınmıştır. Önerilen LSTM modellerinin performansı, SVM, LDA ve Rastgele Orman sınıflandırıcıları ile karşılaştırılmıştır. Deprem öncesi günlerdeki iyonosferik bozulmaları tahmin eden LSTM tabanlı modeller, test setlerinde %80-85 doğruluk oranı elde etmiştir. Stacked-LSTM modeli, doğruluk, geri çağırma, kesinlik, F1-skora ve ROC eğrisi gibi metriklerde SVM'den daha başarılı bulunmuştur. LSTM tabanlı modellerin deprem tahmininde daha güvenilir olduğu belirlenmiştir. Araştırma, iyonosfer bozulmalarının deprem öncesinde tespit edilebileceğini göstermiştir. Bu bulgular, LSTM tabanlı modellerin iyonosfer gözlemlerine dayalı olarak deprem tahmininde önemli bir araç olabileceğini ortaya koymaktadır. Model, özellikle şiddetli ve orta büyüklükteki depremler için etkili sonuçlar vermektedir.

Pura vd. (2023), çalışma depremlerin tahmin edilmesine yönelik RNN (tekrarlayan sinir ağı) yöntemini kullanarak Düzce İlçesi'nde 1990-2022 yılları arasında meydana gelen 3.0 ve üzeri büyüklükteki depremler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, depremlerin b ve d değerleri hesaplanarak öğrenme potansiyelinin artırılması hedeflenmiştir. Marmara bölgesinde belirli bir zaman diliminde depremlerin tespit edilmesi, sismik verilerin yapay sinir ağları ile sınıflandırılması ve geleceğe yönelik tahminler yapılması çalışmanın önemini vurgulamaktadır. Sonuçlar, RNN yöntemlerinin yanı sıra, ay ile Dünya arasındaki mesafe verileri ve b ve d katsayılarının dahil edilmesiyle tahmin performansının önemli ölçüde artırılabileceğini göstermiştir. Kullanılan veri seti, deprem büyüklüğü, derinlik, ay mesafesi, b değeri ve d değerini içermektedir. Çalışma, farklı yöntemlerin uygulanmasına rağmen, verilerin düzensiz yapısı nedeniyle %100 doğru tahmin yapmanın zor olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, araştırma sonuçlarına ve uygulanan yönteme göre oluşturulan veri seti ile tahmin edilen büyüklüklerin gerçek depremlerin büyüklüklerine yakın olduğu bulunmuştur.

Senkaya vd. (2023), çalışma 6 Şubat 2023 Türkiye depremlerinde yerel sismik özelliklerin hasar üzerindeki etkisini makine öğrenmesi yöntemleriyle analiz etmiştir. Kullanılan giriş özellikleri arasında Vs30 (30 m derinlikte ortalama kayma dalgası hızı), f0 (alanın baskın frekansı), A0 (HVSR oranı) ve EBd (mühendislik temeli derinliği) bulunmakta olup, hedef özellik olarak hasar durumu değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi kapsamında Random Forest (RF), K-en yakın komşu (KNN), Lojistik Regresyon (LR), Karar Ağaçları (DT), Destek Vektör Makineleri (SVM), Stokastik Gradyan İnişi (SGD) ve Çok Katmanlı Algılayıcı (MP) algoritmaları kullanılmıştır. Beş katlı çapraz doğrulama ile uygun hiperparametreler belirlenmiş ve küçük örneklem setlerinde modelleme etkinliği artırılmıştır. RF, hasar ve hasar olmama durumları için sırasıyla %94 ve %92 geri çağırma skorları ile en yüksek performansı göstermiş ve hasar tahmin doğruluğu %93 olmuştur. Diğer algoritmalar da %89 doğruluk oranı ile dikkat çekmiştir, MP hasar olmama durumunda %80, SVM ve SGD ise hasar durumu için sırasıyla %88 ve %80 geri çağırma skorları elde etmiştir. EBd, hasar oluşumunda %52 önem ile en kritik parametre olarak belirlenmiştir; f0, Vs30 ve A0 sırasıyla %24, %18 ve %6 önem değerlerine sahiptir. Bu bulgular, yüksek sismik riskli bölgelerde ilk hasar tahminlerinin makine öğrenmesi yöntemleriyle etkili bir şekilde yapılabileceğini göstermektedir. Gelecek çalışmalar, yerel veri setlerinin artırılması ve küresel veri setlerinin oluşturulmasına odaklanacaktır.

Wang vd. (2023), çalışmada deprem erken uyarı (EEW) sistemleri için derin öğrenme tabanlı yeni bir yaklaşım olan EEWNet'i önermektedir. EEWNet, herhangi bir ön işleme yapmadan tek bir istasyondan kaydedilen ilk birkaç saniye P-dalgasını giriş olarak kullanarak, maksimum yer değiştirmeyi tahmin etmekte ve böylece büyüklüğü hesaplamaktadır. Geniş bir yer altı güçlü hareket kayıtları veri seti kullanılarak eğitim, doğrulama ve test işlemleri gerçekleştirilmiştir. EEWNet'in sonuçları, geleneksel Pd (empirik tepe yer değiştirme) yöntemine kıyasla daha hızlı ve doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir. EEWNet, 4.0 ile 5.9 büyüklüğündeki depremleri ilk 0.5 saniyede tahmin edebilmekte ve bu yöntem, Pd'nin 3 saniyelik verilerini kullandığı büyüklükler arasında 1 ile 2.5 saniye kadar önde tahmin yapabilmektedir. Ayrıca, EEWNet, ilk 0.5 ila 3 saniyelik verilerle büyüklüğü daha iyi tahmin edebilmektedir. Derin öğrenmenin, P-dalgasının ilk saniyelerinden büyüklüğe ilişkin özellikleri insanlardan

daha etkili bir şekilde çıkarabildiği kanıtlanmıştır. Bu bulgular, derin öğrenmenin EEW ve diğer sismoloji alanlarında büyük potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Khosravikia ve Clayton (2021), bu çalışmada farklı makine öğrenimi tekniklerinin yer hareketi şiddetini tahmin etme konusundaki avantajları ve dezavantajları analiz edilmiştir. Geleneksel olarak, yer hareketi tahminleri doğrusal regresyon modelleri kullanılarak önceden tanımlanmış denklemler ve katsayılar aracılığıyla yapılmaktadır; ancak bu modeller, veride bulunan karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri yakalamada yetersiz kalabilmektedir. Bu bağlamda, çalışmada yapay sinir ağları (ANN), rastgele orman (RF) ve destek vektör makineleri (SVM) gibi makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak yer hareketi şiddeti tahmin edilmiştir. Model eğitimi, 2005 yılından bu yana Oklahoma, Kansas ve Teksas'ta kaydedilen 4528 yer hareketi kaydı ve 376 deprem olayını (büyüklük 3 ile 5.8 arasında) içeren bir veri seti ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, rastgele orman algoritmasının doğruluk açısından diğer algoritmalardan üstün performans gösterdiğini ve yeterli veri olduğunda tüm alternatif modellerin geleneksel doğrusal regresyon yöntemine kıyasla daha yüksek tahmin doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Ek olarak, olaylar ve bölgeler arasındaki değişkenlikler rastgele etkiler olarak modele entegre edilmiş, bu sayede aleatorik belirsizlikler azaltılmıştır. RF ve SVM algoritmalarının, mühendislik analizlerinde kullanılacak doğrudan matematiksel denklemler sunmamasına rağmen, yazılım ortamında yeni veri için tahmin yapılmasına olanak tanıdığı vurgulanmıştır.

Nicolis vd. (2021), Şili'deki sismik oranları tahmin etmek için iki Derin Sinir Ağı (DNN) mimarisini, Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) ve Evrişimsel Sinir Ağları (CNN) kullanmaktır. Önerilen metodoloji üç modülden oluşmaktadır: ön işleme, uzaysal ve zamansal tahmin ve nihai tahmin modülü. İlk modül, Epidemik Tip Artçı Şok Dizileri (ETAS) modelini kullanarak sismik oran tahminleri için yoğunluk fonksiyonunu hesaplamaktadır. LSTM, son 30 günün maksimum sismik yoğunluk verilerini kullanarak bir sonraki günün maksimum yoğunluğunu tahmin ederken, CNN, son 30 günün uzaysal verilerini analiz ederek bir sonraki gün olası deprem alanını tahmin etmektedir. Modeller, R^2 ve doğruluk gibi performans ölçütleriyle doğrulanmıştır.

Kuang vd. (2021), Güney Kaliforniya'da bulunan RIDGECREST bölgesinde bulunan bir sismik ağdan gelen verileri kullanarak depremin odak mekanizmasını tahmin etmeyi sağlayan derin öğrenme tabanlı yeni bir algoritma önermişlerdir. Yerel veya bölgesel, orta veya büyük ölçekli deprem hareketlerini izlemek için FMnet modeli geliştiren araştırmacılar sonuç olarak otomatik deprem izleme ve raporlama sistemi geliştirmişlerdir.

Karcı ve Şahin (2022), Türkiye'deki depremlerden elde edilen enlem, boylam, tarih, deprem derinliği ve yer yüzeyindeki sismik şiddet gibi parametreleri kullanarak derin öğrenme tabanlı bir uzun-kısa süreli bellek (LSTM) modeli geliştirmiştir. Araştırmada, geliştirilen modelin performansı, geleneksel regresyon yöntemleri, karar ağaçları ve rastgele orman teknikleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, LSTM modelinin %93.4 doğruluk oranı ile en yüksek tahmin başarısını sağladığını göstermektedir. Diğer yöntemlerin ise %85.2 ile %88.7 arasında değişen doğruluk oranlarıyla daha düşük performans sergilediği gözlemlenmiştir. Çalışma, derin öğrenme tabanlı yaklaşımların deprem tahmininde sağladığı avantajları vurgulamaktadır. Sonuç olarak, önerilen model, sismik tehlike değerlendirmeleri için önemli bir katkı sunmakta ve gelecekteki araştırmalara yön vermektedir.

Jena vd. (2020), Hindistan bölgesinden elde edilen yükseklik, deprem büyüklüğü yoğunluğu, merkez üssü yoğunluğu, merkez üssünden olan uzaklık, sismik aktivite yoğunluğu, Deprem derinliği, zemin yapısı, tarihsel deprem verileri, jeolojik özellikler gibi 9 farklı deprem göstergesini girdi parametresi olarak kullanarak deprem olasılığı haritalaması yapmıştır. Araştırmada, derin öğrenme tekniklerinden konvolüsyonel sinir ağı (CNN) kullanılarak bir sınıflandırma modeli geliştirilmiştir. Modelin performansı, doğruluk, F1 skoru ve kesinlik gibi değerlendirme kriterleri ile ölçülmüş ve geleneksel yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen CNN modelinin %95.1 doğruluk oranı ile geleneksel yöntemlere göre daha yüksek bir başarı sağladığını göstermektedir. F1 skoru ve kesinlik değerleri de geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında belirgin bir üstünlük sergilemiştir. Bu çalışma, derin öğrenme tekniklerinin deprem risk analizi ve haritalama süreçlerindeki potansiyelini ortaya koymaktadır.

Li vd. (2020), Japonya, Filipinler, Losangeles gibi bölgelerden elde edilen, sekiz farklı veri setiyle derin öğrenme kullanarak DLEP (Explicit and implicit features for accurate Earthquake Prediction) deprem modelini geliştirmişlerdir. Kullandıkları modeldeki örtük özellikleri çıkarmak için CNN ağını kullanmışlardır. Daha sonra DLEP modelini ve CNN ağını birleştirerek başarılı bir şekilde deprem tahmini yapmışlardır.

Wang vd. (2020), derin öğrenme tekniği olan LSTM yöntemini kullanarak deprem tahmini modelleri

geliştirmişlerdir. Farklı bölgelerden elde ettikleri depremler arasındaki uzay-zaman ilişkisinden yararlanarak başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Altan ve Karasu (2020), topluluk ampirik kip ayrışımı, dalgacık dönüşümü ve ampirik kip ayrışımı olmak üzere üç farklı ayrıştırma yöntemi kullanarak, derin öğrenme yöntemlerinden olan LSTM ile elde ettikleri tahmin modelini başarımını araştırmışlardır. Daha sonra üç ayrı ayrıştırma yöntemiyle elde edilen birleşik modellerin başarımlarını istatistiksel hata ölçütlerine göre değerlendirmişlerdir.

Duman (2016), Batı Anadolu Bölgesinde bulunan ve yoğun sismik aktivite bulunduran dört bölgenin deprem verileri kullanılmıştır. Gutenberg-Richter ölçeğini kullanarak ileri beslemeli geri yayılımlı yapay sinir ağı geliştirmiştir. Eğitim tamamlandıktan sonra bu dört farklı bölge için ayrı ayrı test gerçekleştirilmiş ve ağın başarısı sunulmuştur. Tahmin sonuçlarına bakıldığında ise, gerçekleşmesi beklenen deprem tahmin sonuçları çalışılan dört bölgede de belli oranlarda farklı sonuçlar vermiş fakat bu yöntem kabul edilebilir bir oranda başarılı bulunmuştur.

Utku ve Akcayol (2020), doğal afet, müşteri davranışı gibi bazı olayların meydana gelmeden önce, oluş zamanını önceden tahmin edilmesine yönelik çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu kapsamda geliştirdikleri model ile elde edilen sonuçları ARIMA (İstatistiksel Zaman Serisi Tahminleme Yöntemi) ile karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlara bakıldığında ise derin öğrenme tabanlı geliştirilen bu modelin ileriye dönük oluş zamanı tahmininde, ARIMA'dan daha başarılı olduğunu ileri sürüp kanıtlamışlardır.

Sevinç ve Kaya (2021), Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan bazı il ve ilçelerin verilerini kullanarak LSTM ve ARIMA modelleriyle analiz gerçekleştirilmiştir. Bu iki modelin, tahmin performansını karşılaştırmak için farklı değerlendirme parametreleri kullanmışlardır. Gerçek değer ile tahmin değeri arasındaki ilişkiyi veren R Kare skor değeri, ARIMA Modelinde, LSTM modeline göre daha yüksek çıkmış ve bu iki modelinde tahmin çalışmalarında başarılı sonuçlar vererek kullanılabilirliğini göstermişlerdir.

Sevinç ve Kaya (2021a), Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan bazı il ve ilçelerin verilerini kullanarak Özyinelemeli Sinir Ağlarının özel türü olan LSTM modelini kullanarak depremin büyüklük tahmini modelini gerçekleştirmeye çalışmışlardır. Daha sonra bu model ile eğittikleri sistemin R kare skoruna göre değerlendirme yapıp modelin başarısı ortaya konulmuştur.

Fidanboy vd. (2022), resmi kaynaklardan elde ettikleri verileri derin öğrenme teknikleri ile işleyerek yeni bir model geliştirmişler ve bu model ile risk haritası elde etmişlerdir. OYAT (Orman Yangını Tahmini) bu model, dinamik veriler ile güncellenebilir yapıda olup görsel olarak da saklanabilirdir. OYAT modelinin, veri setinin de zamanla büyümesiyle daha verimli ve başarılı sonuçlar vereceği öngörülmektedir. Bu modelle geliştirilen yapının şuan %98 doğruluk oranına sahip olduğu görülmektedir.

Sabah ve Bayraktar (Sabah ve Bayraktar 2020), çeşitli deprem senaryoları oluşturarak Düzce ili ve çevresindeki deprem şiddet bölgeleri seçilmiş daha sonra Türkiye İstatistik Kurumundan (TÜİK) aldıkları resmi veriler ile az hasarlı, orta hasarlı ve çok hasarlı binalar için istatistiksel olarak hasar tahmin sistemi geliştirmişlerdir. Bu hasar tahmin sistemi ile bölgede gerekli olan çadır ihtiyacını belirlemeye çalışarak bölge halkının maddi imkanındaki eksikliklerini gidermeyi amaçlamışlardır.

Akyüz (2019), deprem büyüklüğü verilerini inceleyerek, her yıl max deprem büyüklüğünü kaydetmiş ve veri seti oluşturmuştur. Daha sonra oluşturmuş olduğu bu veri setini kullanarak deprem olma olasılığını incelemiştir. Bu incelemeyi, kısa süreli elde edilen verileri göz önünde bulundurarak, uzun süreli depremlerin olma olasılığını elde ederek gerçekleştirmiştir. K- kare, Ortalama Hata, Ortalama Mutlak Hata vb. gibi birden çok istatistiksel dağılım kullanarak yapılan bu çalışmaya göre, gelecek 10 yıl içinde 5 ve üzeri şiddetinde deprem olma olasığı %10 olarak belirlenmiştir.

Emeksiz ve Tan (2021), hibrit ayrıklaştırma yöntemi geliştirerek bu yöntem ile veri seti oluşturmuşlardır. Daha sonra bu veri setini Geri Beslemeli Sinir Ağına uygulayarak çok adımlı bir tahminleme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Önerilen bu modelin tekil ayrıklaştırma ile oluşturulan yöntemden daha başarılı olduğunu tespit etmişlerdir. Tahmin performansını ise determinasyon katsayısı, ortalama mutlak yüzde hata ve ortalama karakök hata ile hesaplayıp incelemişler. Önerilen hibrit modelin, yüksek hassasiyette tahminler gerçekleştirmesi modelin başarısını göstermiştir.

Özmen (2011), Kastamonu ili ve çevresinde 4.0 ve daha büyük şiddette meydana gelmiş olan depremlerin verilerini kullanarak Gutenberg-Richter ölçeğinde magnitüd-frekans parametreleri arasındaki bağıntıdaki a ve b değerlerini bulmuştur. Ve bu değer parametrelerden yararlanarak, Poisson modelini farklı büyüklükteki depremlerin meydana gelme olasılığını istatistiksel olarak incelemişlerdir. Bu modele göre gelecek 100 yıl içerisinde 7.5 şiddetinde deprem olma olasılığı %75 olarak tahmin edilmiştir.

Topçu vd. (2017), iyonosfer toplam elektron içeriği, atmosferin ısı ve sıcaklık değerleri, bağıl nem miktarı ve TUSAGA-Aktif konumlama sistem istasyonunun kinematik deprem verilerini, kullanarak deprem tahmini yapmışlardır.

Sağlam ve Çavdur (2022), ileri beslemeli geri yayılımlı yapay sinir ağı ile deprem büyüklüğünü (earthquake magnitüde), derinliğini ve depremi birebir yaşayan afetzedelerin depremin gerçekleştiği Merkez üssüne olan uzaklık mesafelerine bakarak deprem şiddet tahmini yapmışlardır. Farklı yapay sinir ağı tasarımları denemişler ve en uygun sinir ağı tasarımı elde edip önermişlerdir. Uygun görülen sinir ağı ile çeşitli eğitim algoritmalarını kullanarak eğitim gerçekleştirmişler. Daha sonra farklı sinir ağı tasarımlarını ve farklı eğitim algoritmalarının performanslarını karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma için, ortalama karesel hata ve korelasyon katsayısı kullanılmış ve analiz edilmiştir. Bu çalışma için iki gizli katman ve her katman için beş ve on gizli nöron kullanılmıştır. Ağ, Bayes düzenlemesi ve Levenberg-Marquardt eğitim algoritmasının kullanıldığı durumda en iyi performansı sergilemiştir. Turgut vd. (2019), analog bilgileri sersörler ile elde ettikleri verileri veri kaybına uğramadan veri tabanına, kaydetmişlerdir. Daha sonra oluşturulan bu veri tabanını KNN (K-Nearest Neighbors), RF (Random Forest) algoritmaları tarafından işlenmiş ve YSA ağ modeli oluşturulmuştur. Bu şekilde oluşturulan systemin tahmin değeri %87 olarak hesaplanmıştır.

Literatürde de görüldüğü üzere deprem şiddeti tahmin çalışmalarında yapay sinir ağları, makine öğrenmesi algoritmaları ve derin öğrenme mimarileri kullanılarak yeni modeller geliştirerek deprem şiddeti tahmin edilmeye çalışılmıştır. Fakat derin öğrenme modellerine dayalı çalışmaların oldukça kısıtlı olduğu ve bu yöntemlerle yapılan çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda tarih, zaman, enlem, boylam ve derinlik gibi parametreler kullanılarak deprem şiddeti tahmini yapılmaya çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot / Materials and Methods

2.1. Deprem veri setinin hazırlanması

Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma Kurulundan elde edilen 3.0- 10.0 şiddetlerindeki depremler .csv formatında indirilip, kaydedilmiştir. Daha sonra deprem şiddet tahmininde kullanılacak depremin meydana geliş tarihi, depremin meydana geldiği zaman, enlem, boylam, derinlik ve büyüklük bilgileri haricindeki alanlar ve veri setinde yer alan istenmeyen boş veri alanları temizlenmiştir.

Çizelge 1. Xm>=3.0 veri kümesinin detayları.

Tarih	01.01.1965 - 31.12.2022
Enlem	36.0 – 42.0
Boylam	26.0 – 45.0
Derinlik	0-500
Büyüklük	3.0- 10.0
Sarsıntı Türü	Deprem
Deprem Sayısı	24.007

2.2. Çalışmada önerilen deprem tahmin modelleri ve uygulama süreçleri

Bu çalışmada deprem tahmini ile ilgili bir model önerilmiştir. Deprem büyüklüğü tahmin modeli, Python programlama dili ve Python için bir derin öğrenme kütüphanesi olan keras kullanılarak hazırlanmıştır. 1965-2022 yılları arasında meydana gelen depremler için, meydana gelecek depremleri tahmin edebilmek amacıyla Long Short Term Memory kullanılarak bir model oluşturulmuştur.

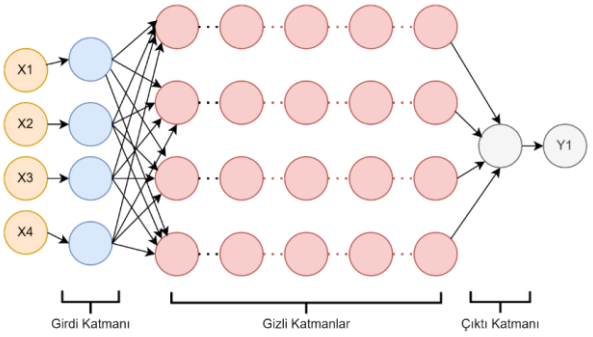
2.2.1. Yapay sinir ağı ile deprem şiddeti tahmin modeli

Yürütülen çalışmada, önerilen modelin programlaması için Python programlama dili, geliştirilmesi için ise PyCharm IDE'si kullanılmıştır. Derin öğrenme modellerini oluşturmak için ise Keras ve Tensorflow kütüphaneleri kullanılmıştır. Keras kütüphanesi, farklı türden derin öğrenme modellerinin tanımlanması ve eğitilmesini sağlayan derin öğrenme kütüphanesidir. Tensorflow ise, derin öğrenme modelleri geliştirmek ve değerlendirmek için güvenilir ve açık kaynaklı Python kütüphanesidir.

Keras kütüphanesi kullanılarak tasarlanan YSA ile DŞTM;

- 4 girişli girdi katmanı
- 5 gizli katmanı
- 1 çıkışlı çıktı katmanı

kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan YSA ile DŞTM modelinin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deprem şiddeti tahmini için önerilen YSA modeli

Deprem şiddeti tahmin modelini oluşturmak ve modelden bir çıktı değeri almak için, modelde kullanılacak veriler sırasıyla, Girdi (Xn) ve Çıktı (Y) olarak bölünmesi gerekmektedir. Bu uygulamada girdi parametreleri;

- Zaman Damgası (X1)
- Derinlik (X2)
- Enlem (X3)
- Boylam verileridir (X4).

Çıktı olarak ise deprem şiddeti bilgisi alınmaktadır. Keras kütüphanesi kullanılarak model oluşturuldu. Daha sonra oluşturulan bu modele belirtilen sayıda gizli katmanlar eklendi ve bu katmanların düğüm sayıları, aktivasyon fonksiyonları ve eğitim sayıları belirlendi. Bu modelde aktivasyon fonksiyonu olarak Relu, Lineer ve Softmax olmak üzere üç tane aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Kayıp fonksiyonu olarak ise Mean Squared Error kullanılmış ve optimizasyon fonksiyonu olarak da Adam fonksiyonu kullanılmıştır. Oluşturulan model 20'şer batchler halinde Adam optimizasyon fonksiyonunu çalıştırmaktadır. Modelde kullanılan veri seti, eğitim ve test veri kümeleri olmak üzere iki farklı veri kümesine bölünmüş ve tüm veri seti 100 kez eğitilmiştir. Model veri kümelerinin, 0.80'ini kullanarak eğitilmekte ve kalan 0.20 ile de test edip, hatalarını düzeltmektedir.

Deprem şiddeti tahmin modelinde kullanılan epochs, batch, katmanlardaki nöron sayıları, optimizasyon fonksiyonu, kayıp fonksiyonu ve aktivasyon fonksiyonları değiştirilip farklı kombinasyonlarla tekrar eğitilmiş ve en iyi sonuç veren parametreler belirlenmiştir. YSA ile DŞTM'de en iyi performans veren parametreler Çizelge 2'te gösterilmiştir.

Çizelge 2. YSA ile deprem şiddeti tahmin modelinde kullanılan parametreler

Parametreler	Değerler
Epoch	100
Gizli Katman Sayısı	5
Batch	20
Katmanlardaki Nöron Sayısı	128,64,64,32,32
Aktivasyon Fonksiyonları	Lineer, Relu, Softmax
Optimizasyon Fonksiyonu	ADAM
Kayıp Fonksiyonu	Mean Squared Error

2.2.2. Uzun kısa süreli bellek ile deprem şiddeti tahmin modeli

Genellikle bir sonraki meydana gelecek durumu tahmin edebilmek için kullanılan özyinelemeli sinir ağlarından biri olan LSTM, girdiler arasında ilişki kurarlar ve kurdukları tüm ilişkileri hatırlamaktadırlar (Wang vd., 2020b). LSTM, aynı zamanda uzun süreli bağımlılık durumunu tekrarlayan sinir ağlarından doğru bir şekilde modellemek için oluşturulmuş ve derin öğrenme için kullanılan, tekrarlayan sinir ağı mimarilerinden birisidir. LSTM'ler zaman serisi verilerini kullanarak, tahmin problemlerinin çözümünde kullanılan uygun yapılardır. LSTM ağları kullanılarak tasarlanan bu model;

- Katmanda 128 LSTM hücresi
- 2. Katmanda 64 LSTM hücresi
- 3. Katmanda 64 LSTM hücresi
- 4. Katmanda 32 LSTM hücresi
- 1 tane dropout katmanı
- 1 tane çıktı katmanı

kullanılarak tasarlanmıştır. Önerilen LSTM ile DŞTM modelinin şematik gösterimi Şekil 2' de verilmiştir.

Şekil 2. LSTM ile deprem şiddeti tahmin modeli

LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinde, Aktivasyon fonksiyonu olarak ReLu, Lineer ve Softmax kullanılmıştır. Optimizasyon fonksiyonu olarak ADAM, kayıp fonksiyonu olarak ise Mean Squared Error kullanılmıştır. Oluşturulan modelde dropout oranı 0.2 olarak alınmıştır. LSTM ağları için girdi verileri, veri normalizasyon işlemleri yapılarak tekrardan şekillendirilmiştir. LSTM ile model eğitiminde, parametre değerlerinin sırası önemlidir. Bu sebeple, veri kümesi sıralandıktan sonra bölünmektedir. Veri kümeleri, 0.80 eğitim ve 0.20 test veri kümesi olmak üzere bölünmüştür.

LSTM modeli 20'şer batchler halinde ADAM optimizasyon fonksiyonunu çalıştırmaktadır. Tüm veri kümesi eğitim için 100 kez tekrarlanmıştır. Oluşturulan bu modelde, eğitim için kullanılan veri kümesi 1'er haftalık periyotlar halinde alınmaktadır. İlk 1 haftalık deprem verileri alınarak sekizinci günün, daha sonra ikinci 1 haftalık deprem verileri alınarak dokuzuncu günün deprem şiddeti tahmin edilmeye çalışılmıştır. 1'er haftalık periyotlar halinde, eğitim kümeleriyle model eğitilmektedir. Modelde gelecek günlerin depremlerinin tahmini için gerekli değişken tanımlamaları yapılmaktadır. Gelecek dönemlerde meydana gelmesi muhtemel depremleri tahmin etmek için, kullanılmak istenen geçmiş günlerin sayısı ve geçmiş günlere bağlı olarak, tahminde bulunmak istenilen gelecek günlerin sayısı belirlenmiştir. Modelin performansını ortaya koymak adına hem eğitim kümesiyle hemde test kümeleri kullanılarak tahminler yapılmaya çalışılmıştır.

Oluşturulan LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinde farklı farklı epoch, batch, nöron sayıları, aktivasyon fonksiyonları, kayıp fonksiyonu ve optimizasyon fonksiyonu parametreleriyle eğitilmiş ve en iyi sonuç veren parametre değerleri belirlenmiştir. En iyi performans veren parametre değerleri Çizelge 3'de sunulmuştur.

Çizelge 3. LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinin parametleri

Parametreler	Değerler
Epoch	100
1.LSTM Hücresi	128
2.LSTM Hücresi	64
3.LSTM Hücresi	64
4.LSTM Hücresi	32
Batch	20
Dropout Oranı	0.2
Aktivasyon Fonksiyonu	Lineer, ReLU, Softmax
Optimizasyon Fonksiyonu	ADAM
Kayıp Fonksiyonu	Mean Squared Error

3.Bulgular

Bu bölümde önerilen iki modelin ve istatistiki tahmin modeli olan ARIMA modelinin performans sonuçları ölçülmüş ve detayları verilmiştir.

3.1.Elde edilen performans sonuçlarının değerlendirilmesi

Hem önerilen YSA ile deprem şiddeti tahmin modelinin hem LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinin hemde tahmin araştırmalarında sıklıkla kullanılan ARIMA modelinin performansları, xM ≥ 3.0 veri kümesi için performans değerleri ölçülmüştür.

3.2. ARIMA

İstatistiksel modelleme yöntemi olan ARIMA ile deprem tahmini için oluşturulan xM≥ 3.0 veri kümesi eğitilmiştir.

3.2.1. ARIMA Modelinin Performans Sonuçları

ARIMA modeli, deprem tahmini için oluşturulan xM ≥ 3.0 veri kümesi ile eğitilmiş ve performans sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. ARIMA modelinin performans sonuçları

Ölçüm Metriği	Performans Sonucu
R-Kare	*0.268*
MAE	0.312
MSE	0.173
RMSE	0.513

3.2.2. ARIMA modelinin gerçek veri seti ile test edilmesi

Meydana gelen depremlerin bazıları tarih, derinlik, enlem ve boylam değerleri ARIMA modeli ile test edilmiş ve gerçek deprem sonuçları ile modelin tahmin ettiği deprem sonuçları Çizelge 5'te karşılaştırılmıştır. Çizelge 5'teki sonuçlara bakıldığında ARIMA modelinin gerçek deprem değerlerine çok yakın olmayan ve birbirine çok yakın deprem tahmininde bulunduğu görülmektedir.

Çizelge 5. ARIMA modelinin gerçek veri seti ile karşılaştırılması

Tarih	Enlem	Boylam	Der(km)	Yer	xM	ARIMA İle DŞTM
18.10.2022	38.6562	39.7057	007.0	Malatya	5.9	4.0
10.08.2022	39.8423	39.4025	005.3	Elazığ	5.6	4.52
07.07.2022	38.5530	39.4844	022.3	Elazığ	6.1	5.22
22.03.2022	38.3819	26.9856	012.0	İzmir	6.7	5.10
26.02.2022	38.1943	38.8520	002.7	Malatya	5.5	4.5

3.3. Yapay sinir ağı ile deprem şiddeti tahmin modeli

3.3.1. Yapay sinir ağı ile DŞTM'nin performans

Yapay Sinir Ağı Deprem şiddeti tahmin modeli, deprem tahmini için oluşturulan xM ≥ 3.0 veri kümesi ile eğitilmiş ve sonuçlar Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. YSA ile DŞTM modelinin performans sonuçları

Ölçüm Metriği	Performans Sonucu
R-Kare	*0.3*
MAE	0.220
MSE	0.158
RMSE	0.357

3.3.2. Yapay sinir ağı ile DŞTM'nin gerçek veri seti ile test edilmesi

Meydana gelen depremlerin bir kısmı; zaman, tarih, derinlik, enlem ve boylam bilgileri ile deprem şiddeti tahmin modeli test edilmiş ve gerçek deprem sonuçlarıyla YSA ile DŞTM'nin tahmin ettiği deprem sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 7'de gösterilmiştir.

Çizelgeye bakıldığında YSA ile Deprem Şiddeti Tahmin Modelinin gerçek deprem değerlerine yakın deprem tahmininde bulunduğu görülmektedir.

Çizelge 7. YSA ile DŞTM modelinin gerçek veri seti ile karşılaştırılması

Tarih	Enlem	Boylam	Der(km)	Yer	xM	YSA İle DŞTM
18.10.2022	38.6562	39.7057	007.0	Malatya	5.9	4.40
10.08.2022	39.8423	39.4025	005.3	Elazığ	5.6	4.72
07.07.2022	38.5530	39.4844	022.3	Elazığ	6.1	5.67
22.03.2022	38.3819	26.9856	012.0	İzmir	6.7	5.42
26.02.2022	38.1943	38.8520	002.7	Malatya	5.5	4.70

3.4. Long Short Term Memory ile deprem şiddeti tahmin modeli

3.4.1. LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinin performans sonuçları

LSTM ile deprem şiddeti tahmin modeli, deprem tahmini için oluşturulan xM ≥ 3.0 veri kümesi ile eğitilmiş ve sonuçlar Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8. LSTM ile DŞTM modelinin performans sonuçları

Ölçüm Metriği	Performans Sonucu
R-Kare	*0.561*
MAE	0.2
MSE	0.160
RMSE	0.373

LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinin xM ≥ 3.0 veri kümesi ile eğitim sonuçlarına bakıldığında R-Kare değerinin 0.561 ile DŞTM'ne göre daha yüksek olduğu ve ortalama mutlak hata değerinin de daha düşük olduğu görülmektedir. LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinin xM ≥ 3.0 veri kümesiyle tahmin sonuçları incelendiğinde 1 haftalık tahminde en yüksek 5.7 şiddetinde, en düşük 3.5 şiddetinde deprem şiddeti tahmininde bulunmuştur. Kısaca LSTM ile deprem şiddeti tahmin modeli 1 haftalık kısa bir periyotta 5.7 şiddetinin üzerinde herhangi bir deprem meydana gelmeyeceğini tahmin etmiştir. İki haftalık tahmin sonuçları incelendiğinde ise en yüksek 5.0 şiddetinde, en düşük 3.7 şiddetinde deprem tahmini yaptığı görülmektedir. Buda LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinin 2 haftalık süreçte 5.0 şiddetinin üstünde bir deprem meydana gelmeyeceğini tahmin ettiği anlamına gelmektedir.

3.4.2. LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinin gerçek veri ile karşılaştırılması

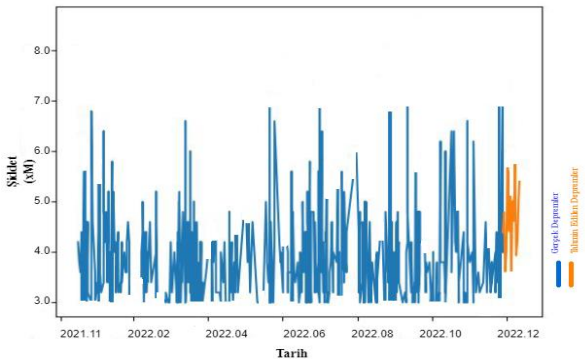
2022 yılı Aralık ayında meydana gelen depremlerin oluş zamanı, tarih, derinlik, enlem ve boylam bilgilerine bakıldığında 2022 Aralık ayında en yüksek 6.9, en düşük 3.1 şiddetinde deprem meydana geldiği Çizelge 9'da görülmektedir.

Çizelge 9. 2022 Aralık ayında meydana gelen depremlerin listesi

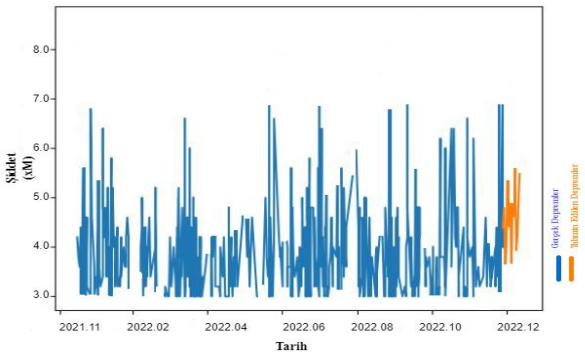
No	Kod	Tarih	Zaman	Enlem	Boylam	Derin	xM	MD	ML	Mw	Ms	Mb	Yer
000001	20221231062528	2022.12.31	06:25:28	37.1217	36.5458	010.3	3.6	0.0	3.4	3.6	0.0	0.0	Osmaniye
000002	20221231014148	2022.12.31	01:41:48	35.2116	32.4582	008.9	4.3	0.0	5.2	0.0	0.0	0.0	Akdeniz
000003	20221231124250	2022.12.31	12:42:50	39.1120	40.5025	005.0	4.0	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0	Elazığ
000004	20221231055705	2022.12.31	05:57:05	37.1217	35.5458	004.1	3.9	0.0	3.7	3.8	0.0	0.0	Adana
000005	20221231111413	2022.12.31	11:14:13	39.1717	40.6958	001.0	4.7	0.0	3.4	3.5	0.0	0.0	Elazığ
000006	20221229173159	2022.12.29	17:31:59	37.1806	32.4586	002.8	3.1	0.0	3.7	3.8	0.0	0.0	Konya
000007	20221229005018	2022.12.29	00:50:18	35.9210	32.5228	010.0	4.2	0.0	6.4	6.4	0.0	0.0	Akdeniz
000008	20221228222814	2022.12.28	22:28:14	35.1003	32.6850	009.2	6.9	0.0	4.0	4.1	0.0	0.0	Akdeniz
000009	20221226034022	2022.12.26	03:40:22	37.1947	29.3320	003.7	3.6	0.0	4.2	4.1	0.0	0.0	Denizli
000010	20221226110334	2022.12.26	11:03:34	38.2015	43.6359	005.0	3.2	0.0	3.9	4.0	0.0	0.0	Van
000011	20221223212543	2022.12.23	21:25:43	38.2879	26.3693	009.0	3.7	0.0	3.4	3.6	0.0	0.0	İzmir
000012	20221222124716	2022.12.22	12:47:16	39.3214	28.5698	005.0	5.0	0.0	4.9	4.7	0.0	0.0	Balıkesir
000013	20221222024345	2022.12.22	02:43:45	38.2563	42.5450	001.5	3.8	0.0	4.1	4.0	0.0	0.0	Muş
000014	20221221101435	2022.12.21	10:14:35	38.3265	42.2010	002.7	4.3	0.0	4.3	4.3	0.0	0.0	Muş
000015	20221220200807	2022.12.20	20:08:07	38.8957	42.2134	001.0	3.1	0.0	4.3	4.2	0.0	0.0	Muş
000016	20221219062559	2022.12.19	06:25:59	40.4574	29.6778	006.9	3.9	0.0	3.8	3.7	0.0	0.0	Bursa
000017	20221219092336	2022.12.19	09:23:36	39.6279	35.2783	004.9	5.2	0.0	3.8	4.0	0.0	0.0	Kayseri
000018	20221219055846	2022.12.19	05:58:46	39.1937	35.2846	003.5	5.0	0.0	3.6	3.4	0.0	0.0	Kayseri
000019	20221219203529	2022.12.19	20:35:29	37.2837	32.5654	003.0	4.9	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0	Konya
000020	20221215055900	2022.12.15	05:59:00	37.4121	29.5158	003.5	4.3	0.0	3.7	0.0	0.0	0.0	Denizli
000021	20221214131250	2022.12.14	13:12:50	35.3210	32.1356	007.1	4.0	0.0	3.8	3.7	0.0	0.0	Akdeniz
000022	20221213235745	2022.12.13	23:57:45	35.4620	33.0051	005.7	3.6	0.0	3.5	3.4	0.0	0.0	Akdeniz
000023	20221212024243	2022.12.12	02:42:43	39.2085	40.7410	004.8	4.7	0.0	3.8	3.7	0.0	0.0	Elazığ
000024	20221212221943	2022.12.12	22:19:43	38.3025	43.5564	005.2	4.2	0.0	5.0	5.4	0.0	0.0	Van
000025	20221211202149	2022.12.11	20:21:49	38.4560	26.1009	008.7	5.2	0.0	4.1	4.0	0.0	0.0	İzmir
000026	20221210032115	2022.12.10	03:21:15	38.1248	44.5306	002.0	4.6	0.0	4.1	4.2	0.0	0.0	Türkiye -İran Sınır Bölgesi
000027	20221210111713	2022.12.10	11:17:13	35.9817	32.4238	005.0	4.6	0.0	4.0	3.9	0.0	0.0	Akdeniz
000028	20221210004951	2022.12.10	00:49:51	39.8947	28.4613	006.0	4.7	0.0	3.6	3.4	0.0	0.0	Balıkesir
000029	20221207225508	2022.12.07	22:55:08	39.0868	28.9795	003.0	5.2	0.0	4.0	4.1	0.0	0.0	Kütahya
000030	20221206200729	2022.12.06	20:07:29	40.4225	29.8868	004.9	4.5	0.0	4.3	3.7	0.0	0.0	Bursa
000031	20221205062547	2022.12.05	06:25:47	40.0004	29.5673	006.9	4.2	0.0	4.2	4.3	0.0	0.0	Bursa
000032	20221204031929	2022.12.04	03:19:29	37.7896	35.1234	008.1	4.8	0.0	3.7	3.8	0.0	0.0	Adana
000033	20221201203537	2022.12.01	20:35:37	35.4319	32.5411	006.9	3.2	0.0	4.0	3.8	0.0	0.0	Akdeniz

Deprem şiddetine yönelik olarak kullanılan LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinin xM ≥ 3.0 veri kümesi ile yaptığı bir haftalık ve iki haftalık deprem tahminleri Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmektedir. LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinin xM ≥ 3.0 veri kümesi ile tahmin sonuçlarına bakıldığında modelin 1 haftalık tahmininde en yüksek 5.7 şiddetinde en düşük 3.5 şiddetinde, 2 haftalık şiddet tahmininde ise en yüksek 5.0 şiddetinde, en düşük 3.7 şiddetinde tahminde bulunduğu görülmektedir. LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinde 1 haftalık zaman

periyotları ve 2 haftalık zaman periyotlarındaki deprem şiddeti tahminleri karşılaştırıldığında, eğitilen modelin 1 haftalık deprem şiddeti tahmininde daha başarılı olduğu görülmektedir.



Şekil 3. LSTM ile DŞTM'nin Xm ≥ 3.0 veri kümesi ile bir haftalık deprem tahmini



Şekil 4. LSTM ile DŞTM'nin Xm ≥ 3.0 veri kümesi ile iki haftalık deprem tahmini

3.5. Modellerin performans sonuçlarının karşılaştırılması

Önerilen her iki modelin performans değerleri Çizelge 10'da gösterilmektedir. Oluşturulan modellerin Çizelge 10'da verilen xM ≥ 3.0 veri kümesindeki performansına bakıldığında ARIMA modelinin 0.268 R-Kare değeriyle en kötü performansa sahip olduğu görülmektedir. DŞTM, 0.3 R-Kare değeriyle ARIMA modeline göre daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. LSTM ile deprem şiddeti tahmin modeli ise 0.561 R-Kare değeriyle diğer iki modele göre daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca ARIMA'nın ortalama mutlak hata değeri 0.312 ile önerilen diğer iki modele göre daha yüksek çıkmıştır.

Çizelge 10. Modellerin xM ≥ 3.0 veri kümesindeki performans sonuçlarının karşılaştırılması

Model	R-Kare	MAE	MSE	RMSE
YSA ile DŞTM	*0.3*	0.220	0.158	0.357
LSTM ile DŞTM	*0.561*	0.2	0.160	0.373
ARIMA	*0.268*	0.312	0.173	0.513

Önerilen deprem şiddeti tahmin modelleri, xM ≥ 3.0 veri kümesi ile ARIMA modeline göre daha yüksek bir performans göstermektedir. Deprem şiddet tahmin modelinin R-Kare değeri 0.3 ve LSTM ile deprem şiddet tahmin modelinin 0.561 olarak görülmektedir. xM ≥ 3.0 veri kümesindeki en iyi performansı LSTM ile deprem şiddeti tahmin modeli göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

İnsanoğlunun maruz kaldığı yıkıcı doğal afetlerin başında gelen depremleri, önceden ve kesin olarak tahmin edebilen ve doğruluğu ispatlanan bir yöntem veya çalışma henüz gerçekleşmemiştir. Fakat bu alandaki çalışmalar sensör teknolojilerinin, yapay zeka tahmin modellerinin ve coğrafi bilgi sistemlerinin gelişmesiyle faydalı sonuçlar üretmeye başlamıştır.

Bu çalışmada, meydana gelecek depremin şiddetini tahmin edebilmek için DŞTM (Deprem şiddeti tahmin modeli) ve LSTM ile deprem şiddeti tahmin modeli olmak üzere iki farklı model geliştirilip eğitilmiştir. Önerilen bu tahmin modelleri, depremler arasındaki ilişkiyi analiz etmek için kullanılan, tahmin problemlerinin çözümünde başarılı olduğu bilinen özyinelemeli sinir mimarisinin örnekleridir. Çalışmada geçmişte meydana gelen depremlerin oluş zamanı, tarih, derinlik, enlem ve boylam parametreleri kullanılmıştır.

Deprem şiddeti tahmini için oluşturulan deprem veri kümesi xM ≥ 3.0 olan depremlerin bilgilerini içermektedir. Veri kümesinin 3.0 şiddeti ile sınırlandırılmasının nedeni ise artçı depremleri inceleme dışında tutmaktır. Artçı depremlerin çalışmaya dahil edilmemesinin nedeni ise deprem tahmininin olumsuz etkilenmesini önlemektir. Bu şekilde artçı depremleri temizleyerek daha doğru deprem tahmini yapılabileceği düşünülmektedir.

Önerilen iki model ve ARIMA modeli hazırlanan veri kümesi ile test edilmiştir. Genel olarak, xM ≥ 3.0 veri kümesi ile en kötü sonucu ARIMA modeli vermiştir. DŞTM ise ARIMA modeline göre daha iyi sonuç vermesine rağmen LSTM ile deprem şiddeti tahmin modeline göre genel performansının kötü olduğu görülmüştür. Sonuçlar önerilen deprem şiddeti tahmin modelinin ve LSTM ile deprem şiddeti tahmin modelinin, istatistiki model olan ARIMA modeline göre daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Ayrıca LSTM ile deprem şiddeti tahmin modeli, kendi içerisinde performans bakımından incelendiğinde ise, bir haftalık periyotlarda, iki haftalık periyotlara göre daha iyi deprem şiddeti tahmini performansına sahip olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar, deprem katalog veri kümeleri ile deprem şiddeti tahmini konusunda önerilen derin öğrenme modellerinin, gerçek deprem verileriyle kıyaslandığında kabul edilir bir performansa sahip olduğu görülmektedir. Bu durum da önerilen ve geliştirilen derin öğrenme modellerinin deprem şiddeti tahmininde iyileştirilip, geliştirilebileceğini göstermiştir.

Gelecek çalışmalarda, deprem şiddeti tahminleri için veri seti geliştirilip, artırılabilir ve bu sayede daha kesin deprem şiddeti tahminleri gerçekleştirilebilir. Deprem şiddeti tahmin çalışmalarında farklı girdi parametreleri kullanılarak aynı modeller için performans değerlendirmesi yapılabilir. Gizli katman sayısı artırılıp model daha iyi eğitilip, hafızasında daha uzun süre tutması sağlanarak modellerin performansı artırılabilir. Böylece bu alandaki deprem şiddeti tahmin çalışmaları artırılarak, önlenmesi imkansız olan bu afet için erken korunma önlemlerinin alınması sağlanabilir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışma Doç. Dr. Durmuş ÖZDEMİR danışmanlığında Rabia UYAR tarafından 25.01.2023 tarihinde tamamlanan "Derin öğrenme yöntemleriyle deprem şiddeti tahmini" başlıklı ve 790460 tez no'lu yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak, Analiz ve yorumlama

Yazar 2: Doğrulama, Biçimsel analiz, Metodoloji, Görselleştirme, Denetleme/danışmanlık

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

Abri, R. and Artuner, H., 2022. LSTM-based deep learning methods for prediction of earthquakes using ionospheric data. *Gazi University Journal of Science*, **35**, 1417-1431. https://doi.org/10.35378/gujs.950387

Akyüz, H.E., 2019. Farklı İstatistiksel Dağılımlar ile Deprem Verilerinin Modellenmesi ve Performans Karşılaştırması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science,* **7**, 7–13. https://doi.org/10.21541/apjes.401652

Altan, A. and Karasu, S., 2020. Ayrıştırma Yöntemlerinin Derin Öğrenme Algoritması ile Tanımlanan Rüzgâr Hızı Tahmin Modeli Başarımına Etkisinin İncelenmesi. *European Journal of Science and Technology,* **20**, 844-853. https://doi.org/10.31590/ejosat.785699

Bayrak, E., Ozer, C., Cakici, H. and Kocadagistan, M. E., 2021. January 24, 2020 Sivrice (Turkey) Earthquake (Mw 6.8): Evaluation of Ground-Motion Prediction Equations and Microtremor Studies. *Türk Deprem Arastirma Dergisi*, **3**, 125–148. https://doi.org/10.46464/tdad.1003057

Crespi, M., Kossobokov, V., Peresan, A. and Panza, G. F., 2022. The integration between seismology and geodesy for intermediate-term narrow-range earthquake prediction according to NDSHA. *Earthquakes and Sustainable Infrastructure: Neodeterministic (NDSHA) Approach Guarantees Prevention Rather than Cur*e, 97–112. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823503-4.00003-8

DeVries, P. M. R., Viégas, F., Wattenberg, M. and Meade, B. J., 2018. Deep learning of aftershock patterns following large earthquakes. *Nature*, **560**, 632–634. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0438-y

Doğan, A., 2021. Yapisal Tekrarlayan Sinir Ağlari İle Zaman-Mekansal Deprem Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Duman, O., 2016. Batı Anadolu Bölgesindeki Depremlerin Yapay Sinir Ağı Yöntemiyle Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Gümüşhane, 142.

Emeksiz, C. and Tan, M., 2021. Geliştirilmiş EEMD-EWT Tabanlı Yapay Sinir Ağı Modeli Kullanarak Çok Adımlı Rüzgar Hızı Tahmini. *European Journal of Science and Technology*, **26**, 165–173. https://doi.org/10.31590/ejosat.948661

Fidanboy, M., Adar, N. and Okyay, S., 2022. Derin öğrenmeye dayalı orman yangını tahmin modeli geliştirilmesi ve Türkiye yangın risk haritasının oluşturulması. *Ormancılık Araştırma Dergisi*, **2**, 206–218. https://doi.org/10.17568/ogmoad

Guo, L., He, Z. and Li, L., 2022a. Lacustrine sedimentary responses to earthquakes—soft-sediment deformation structures since late Pleistocene: A review of current understanding. *Earthquake Research Advances*, **3**, 100158. https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100158

Jena, R., Pradhan, B., Al-amri, A., Lee, C. W. and Park, H. J., 2020. Earthquake probability assessment for the indian subcontinent using deep learning. *Sensors*, **20**, 1–24. https://doi.org/10.3390/s20164369

Jena, R., Pradhan, B., Almazroui, M., Assiri, M. and Park, H. J., 2023. Earthquake-induced liquefaction hazard mapping at national-scale in Australia using deep learning techniques. *Geoscience Frontiers*, **14,** 101460. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101460

Jiao, Z. H. and Shan, X., 2022. Consecutive statistical evaluation framework for earthquake forecasting: Evaluating satellite surface temperature anomaly detection methods. *Journal of Asian Earth Sciences: X*, **7**, 100096. https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100096

Joshi, A., Vishnu, C. and Mohan, C. K., 2022. Early detection of earthquake magnitude based on stacked ensemble model. *Journal of Asian Earth Sciences: X*, **8**, 100122. https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100122

Karcı, M., 2022. Derin Öğrenme Yöntemlerinin Kullanarak Deprem Tahmini. *Artificial Intelligence Studies,* **5,** 23-34. https://doi.org/10.30855/ais.2022.05.01.03

Khosravikia F. and Clayton P., 2021. Machine learning in ground motion prediction. *Computers & Geosciences*, **148**, 104700. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104700

Kuang, W., Yuan, C. and Zhang, J., 2021. Real-time determination of earthquake focal mechanism via deep learning. *Nature Communications*, **12**, 1-8. https://doi.org/10.1038/s41467-021-21670-x

Kuyuk, H. S. and Susumu, O., 2018. Real-time classification of earthquake using deep learning. *Procedia Computer Science*, **140**, 298–305. https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.316

Laurenti, L., Tinti, E., Galasso, F., Franco, L. and Marone, C., 2022. Deep learning for laboratory earthquake prediction and autoregressive forecasting of fault zone stress. *Earth and Planetary Science Letters*, **598**, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117825

Li, R., Lu, X., Li, S., Yang, H., Qiu, J., and Zhang, L., 2020. *DLEP: A Deep Learning Model for Earthquake Prediction*. 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). 1-8. https://doi.org/10.1109/IJCNN48605.2020.9207621

Nicolis O., Plaza F. and Salas R., 2021. Prediction of intensity and location of seismic events using deep learning. *Spatial Statistics*, **42**, 100442. https://doi.org/10.1016/j.spasta.2020.100442

Özger, Y., 2020. Sultan II. Abdülhamid Döneminde İstanbul da Deprem Tahmini Tartışmaları ve Josef Nowack ın Padişaha Gönderdiği Rapor. *History Studies International Journal of History*, **12**, 227–253. https://doi.org/10.9737/hist.2020.828

Özmen, B., 2011. Kastamonu ve Yakın Çevresi İçin Deprem Olasılığı Tahminleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, **54**, 109-122.

Öztürk, S. and Alkan, H., 2022. Van Gölü ve Civarı (Türkiye) İçin Deprem Tahmini ve Tehlikesi Üzerine İstatistiksel Bir Analiz ve Değerlendirme. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, **4**, 191-209. https://doi.org/10.46464/tdad.1108730

Pura T., Güneş P., Güneş A. and Hameed AA., 2023. Earthquake Prediction for the Düzce Province in the Marmara Region Using Artificial Intelligence. *Applied Sciences,* **13**, 8642. https://doi.org/10.3390/app13158642

Ren, T., Liu, X., Chen, H., Dimirovski, G. M., Meng, F., Wang, P., Zhida, Z and Ma, Y., 2023. Seismic severity estimation using convolutional neural network for earthquake early warning. *Geophysical Journal International*, **234**, 1355-1362. https://doi.org/10.1093/gji/ggad137

Sabah, L. and Bayraktar, H., 2020. Düzce Merkez ve İlçelerinin Deprem Senaryolarına Göre Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi,* **8**, 1695- 1705. https://doi.org/10.29130/dubited.574013

Sebatlı Sağlam, A. and Cavdur, F., 2022. Earthquake intensity estimation via an artificial neural network: Examination of different network designs and training algorithms. *Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University*, **37**, 2133-2145. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.791337

Senkaya M., Silahtar A., Erkan EF. and Karaaslan H.,2024. Prediction of local site influence on seismic vulnerability using machine learning: A study of the 6 February 2023 Türkiye earthquakes. *Engineering Geology*, **337**, 107605. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107605

Sevinç, A. and Kaya, B., 2021. Derin Öğrenme ve İstatistiksel Modelleme Yöntemiyle Sıcaklık Tahmini ve Karşılaştırılması. *European Journal of Science and Technology,* **28**, 1222 – 1228. https://doi.org/10.31590/ejosat.1014106

Sevinç, A. and Kaya, B., (2021). *Derin Öğrenme Yöntemleri ile Sıcaklık Tahmini: Diyarbakır İli Örneği.* IDAP-2021: 5th International Artificial Intelligence and Data Processing symposium, 217-225. https://doi.org/10.53070/bbd.990966

Song, J., Zhu, J., Wei, Y., Li, S. and Li, S., 2022. Real-time prediction of earthquake potential damage: A case study for the January 8, 2022 MS 6.9 Menyuan earthquake in Qinghai, China. *Earthquake Research Advances*, **3**, 100197. https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100197

Sumy, D. F., Jenkins, M. R., McBride, S. K. and de Groot, R. M., 2022. Typology development of earthquake displays in free-choice learning environments, to inform earthquake early warning education in the United States. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **73**, 1-31. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102802

Tan, A., Horasan, G., Kalafat, D. and Gülbağ, A., 2021. Discrimination of earthquakes and quarries in Kula District (Manisa, Turkey) and its vicinity by using linear discriminate function method and artificial neural networks. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, **164**, 75–92. https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.757701

Topçu, O., Kara, T., Bulut, A. A., Salgın, Ö., and Bakıcı, S. (2017). *Küresel Seyrüsefer Uydu Sistemi (Gnss) Verileri İle Deprem Tahmini Yapmak*. 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı. Eskişehir, Türkiye.

Turgut, A., Temir, A., Aksoy, B. and Özsoy, K., 2019. Yapay Zekâ Yöntemleri İle Hava Sıcaklığı Tahmini İçin Sistem Tasarımı Ve Uygulaması. *In Internatıonal Journal Of 3d Prıntıng Technologıes And Dıgıtal Industry*, **3**, 244-253.

Utku, A. and Akcayol, M. A., 2020. Derin Öğrenme Tabanlı Model ile Bir Olayın Sonraki Olma Zamanının Tahmini. *Journal of Polytechnic,* **24**, 1-15. https://doi.org/10.2339/politeknik.620613

Wang, Q., Guo, Y., Yu, L. and Li, P., 2020. Earthquake Prediction Based on Spatio-Temporal Data Mining: An LSTM Network Approach. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, **8,** 148–158. https://doi.org/10.1109/TETC.2017.2699169

Wang Y., Li X., Wang Z. and Liu J., 2023. Deep learning for magnitude prediction in earthquake early warning, *Gondwana Research*, **123**, 164-173. https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.06.009

Wu, Z., 2022. Evaluation of numerical earthquake forecasting models. *Earthquake Science*, **35**, 293–296. https://doi.org/10.1016/j.eqs.2022.08.006

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1528549
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035201 (535-543)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035201 (535-543)

Efficient Power Quality Disturbance Classification Using Teager-Kaiser Energy Operator and Fast Walsh-Hadamard Transform Features

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 05.08.2024
Kabul/Accepted: 17.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Teager-Kaiser Enerji Operatörü ve Hızlı Walsh-Hadamard Dönüşümü Özelliklerini Kullanarak Verimli Güç Kalitesi Bozulması Sınıflandırması

Hatice OKUMUS

Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Electrical-Electronics Engineering Department, Trabzon, Türkiye

Abstract

Power Quality (PQ) disturbances play a critical role in ensuring the reliability and efficiency of electrical systems. These disturbances can severely impact device performance, leading to malfunctions and significant energy losses. Accurate identification and classification of PQ disturbances are therefore vital for maintaining system stability and optimizing energy consumption. The proposed method stands out by emphasizing two key feature extraction techniques: the Teager-Kaiser Energy Operator (TKEO) and the Fast Walsh-Hadamard Transform (FWHT). After applying the Fast Fourier Transform (FFT) to randomly generated PQ disturbance events from nine different types, TKEO and FWHT are used to extract features that capture both the energy dynamics and structural patterns of the disturbances. These features provide a highly detailed and compact representation of the signal, crucial for effective classification. The Random Forest (RF) classifier, powered by these robust features, achieves an impressive classification accuracy of 99.35% with pure signals. Moreover, the method demonstrates strong noise resistance, maintaining a high accuracy of 98.26% even under 40 dB noise conditions, highlighting the reliability and effectiveness of the extracted features in real-world environments where noise is a common challenge.

Keywords: *Power Quality (PQ), Fast-Walsh Hadamard Transform (FWHT), Teager-Kaiser Energy Operator (TKEO), Random Forest, Power Quality Disturbance Classification.*

Öz

Güç Kalitesi (PQ) bozulmaları, elektrik sistemlerinin güvenilirliği ve verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bozulmalar, cihaz performansını ciddi şekilde etkileyerek arızalara ve önemli enerji kayıplarına yol açabilir. Bu nedenle, PQ bozulmalarının doğru bir şekilde tanımlanması ve sınıflandırılması, sistem kararlılığını korumak ve enerji tüketimini optimize etmek için hayati önem taşır. Önerilen yöntem, iki ana özellik çıkarma tekniğine odaklanarak öne çıkmaktadır: Teager-Kaiser Enerji Operatörü (TKEO) ve Hızlı Walsh-Hadamard Dönüşümü (FWHT). Dokuz farklı türden rastgele üretilen PQ bozulma olaylarına Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulandıktan sonra, TKEO ve FWHT kullanılarak bozulmaların enerji dinamiklerini ve yapısal desenlerini yakalayan özellikler çıkarılır. Bu özellikler, sinyalin etkili bir sınıflandırma için kritik olan oldukça ayrıntılı ve kompakt bir temsilini sağlar. Bu güçlü özelliklerle donatılan Rastgele Orman (RF) sınıflandırıcısı, saf sinyallerde etkileyici bir doğruluk oranı olan %99.35'e ulaşmaktadır. Ayrıca yöntem, 40 dB gürültü altında %98.26 doğruluk sağlayarak güçlü bir gürültü direnci sergilemekte, bu da gerçek dünya ortamlarında yaygın bir sorun olan gürültüye karşı çıkarılan özelliklerin güvenilirliğini ve etkinliğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Güç Kalitesi (PQ), Fast-Walsh Hadamard Dnüşümü (FWHT), Teager-Kaiser Enerji Operatörü (TKEO), Rastgele Orman, Güç Kalitesi Bozulmalarının Sınıflandırması.*

1. Introduction

Power quality (PQ) has emerged as a critical concern in modern electrical systems due to rising power demands and the integration of renewable energy sources. The inclusion of these renewables necessitates the use of more switching devices and power electronics, contributing to PQ disturbances (PQDs). These disturbances manifest as voltage sags when large loads are connected, voltage swells often caused by load disconnections, and a variety of other issues such as harmonics. Such disruptions can negatively impact the performance and lifespan of electrical devices, damage electronic equipment, reduce energy efficiency, and lead to significant economic losses (Singh et al. 2014). Therefore, accurately identifying these PQDs is essential for maintaining reliable and efficient electrical system operations and for designing and implementing effective compensation devices to improve power quality.

Traditionally, the identification and classification of PQDs have relied on various signal processing techniques, including Fourier Transform (Gonzalez-Abreu et al. 2021), Wavelet Transform (Thirumala et al. 2018), and Short

**Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hatice OKUMUS* *e-posta / e-mail: haticeokumus@ktu.edu.tr*

Time Fourier Transform (Priyadarshini et al. 2024). These methods are instrumental in detecting and analyzing transient disturbances, harmonic distortions, and other anomalies within power systems. PQ disturbances can include both single and mixed event types, as both have been studied extensively in the literature.

Yılmaz et al. (2022) have proposed a novel method combining the Undecimated Wavelet Transform (UWT) and support vector machine (SVM) using the "à trous" algorithm to classify nine different PQDs containing only single events in distributed generators (DGs). This method was tested using a LabVIEW-based experimental DG system, a MATLAB Simulink model, and real data under various grid conditions and noise levels, demonstrating high accuracy in both pure and noisy conditions. Singh et al. (2023) have developed a method for classifying 29 types of PQDs using dimensionality reduction, employing Linear Discriminant Analysis (LDA) to transform the dataset from a higher to a lower dimensional space by eliminating unnecessary features. This method, evaluated with four machine learning classifiers (k-Nearest Neighbor, Naive Bayes, SVM, and Random Forest), has achieved high classification accuracy under varying noise levels. Qaisar (2021) has introduced a novel method combining signal-piloted acquisition, adaptive-rate segmentation, and time-domain feature extraction with machine learning tools for classifying three types of PQDs involving single events. This approach facilitates real-time compression, significantly reducing data storage, processing, and transmission requirements, while also lowering computational costs and classifier latency. Robust machine learning algorithms, such as k-Nearest Neighbor, Naive Bayes, Artificial Neural Network, and SVM, are employed for classification, achieving acceptable results for the automated recognition of major voltage and transient disturbances. Mozaffari et al. (2022) addressed the real-time detection and classification of four types of PQDs in power delivery systems. Their proposed supervised approach learns both standard and anomalous patterns from training data that includes clean and disturbance signals. By processing data from multiple meters simultaneously, the method achieves faster detection through cooperative analysis. Additionally, the method is extended to a multi-hypothesis framework, enabling the prompt and accurate classification of disturbance events in real-time. Narayanaswami et al. (2020) have discussed a technique for detecting PQDs in power systems using mystery curves (MC). The method first estimates the analytic signal of real-valued input signals via the Hilbert transform. By representing this signal in polar form, which reveals magnitude and frequency variations, informative MCs are discovered in two dimensions and extended to three dimensions using Euler's rotation hypothesis. The technique's effectiveness was validated with synthetic signals generated in MATLAB and experimentally tested on a prototype bench. In recent years, there has been a substantial shift towards leveraging Deep Learning (DL) techniques for PQD analysis (Wang and Chen 2019, Wang et al. 2019). Notably, Convolutional Neural Networks (CNNs) and Recurrent Neural Networks (RNNs) have emerged as effective tools, demonstrating exceptional ability in identifying and classifying various PQDs with high accuracy. These DL models are particularly valued for their ability to autonomously learn complex patterns and dependencies in the data, bypassing the need for explicit programmatic instructions. Rodrigues Jr et al. (2021) have developed a deep learning-based approach to detect and classify 16 types of PQ disturbances, including both single and multiple events. Their method leverages CNNs with 1D convolution and Long Short-Term Memory (LSTM) networks to automatically extract, select, detect, and classify features in an integrated manner. The input for this method is a data window of one cycle, which moves incrementally to cover the entire signal length. The robustness of the method was tested with various sampling rates, and the impact of noise was also examined in this study. Guerrero-Sánchez et al. (2023) have introduced a novel Multitasking Deep Neural Network (MDL) designed to classify and analyze multiple electrical disturbances. This methodology employs Empirical Mode Decomposition (EMD) to extract characteristics from non-stationary signals. The MDL was tested on a diverse dataset comprising 4500 records of electrical disturbances, taking into account factors such as severity, disturbance duration, and varying noise levels. The results demonstrate high accuracy in both classifying multiple disturbances and analyzing crucial signal aspects, including crest factor, per unit voltage analysis, Short-term Flicker Perceptibility (Pst), and Total Harmonic Distortion (THD).

There has been a growing trend in converting signals into images (Sindi et al. 2021). This approach uses advanced techniques to transform raw signal data into visual representations, making the analysis of complex data patterns more intuitive and effective. The increasing adoption of these methods highlights their potential to enhance accuracy and efficiency. Liu et al. (2018) have introduced a novel approach for detecting and classifying PQD signals using singular spectrum analysis (SSA), curvelet transform (CT), and deep convolutional neural networks (DCNNs). PQD signals are decomposed using

SSA and fast discrete curvelet transform (FDCT), with initial six and three levels of decomposition serving as features. DCNNs and multiclass SVMs are then employed for classification. Tested on thirty-one categories of real and synthetic PQD waveforms, the proposed SSA-FDCT-DCNN classifier outperforms multiclass SVM and other existing methods, proving effective in classifying both single and complex PQ disturbances. Chen et al. (2022) have proposed a power quality classifier that utilizes signal processing techniques to convert signals into 2D grayscale images. These images are then processed through a deep CNN to classify five different quality disturbances. Tested on data from the Amrita Honeywell Hackathon 2021, the method demonstrated that using grayscale images captures more PQD information than 1D signals, thereby enhancing identification performance on real-world data. Özer et al. (2021) have introduced a novel deep learning algorithm for classifying power quality disturbances using an inverse signal approach. The method combines a CNN and bidirectional long short-term memory (Bi-LSTM) with spectrograms. It focuses on the region where the PQD event occurs, aiming to increase classification success rates. The approach involves finding the time shift of the signal relative to a pure sine wave, generating an inverse sine wave based on this shift, and combining it with the original signal to create spectrograms. These spectrograms are converted into RGB images and combined for classification via CNN/Bi-LSTM. The model was tested on 29 different disturbance events, both single and combined. As stated, DL methods are powerful but come with notable disadvantages, including a high demand for labeled data, substantial computational resources, and a heavy reliance on specific hyperparameter settings. This can make the practical implementation of DL for PQD analysis particularly difficult when access to adequate and relevant data is constrained.

This study introduces a signal processing-based methodology designed to classify PQ disturbances. Initially, the Fast Fourier Transform (FFT) is applied to a varied collection of nine types of synthetically generated PQ disturbance events. Following this preliminary transformation, we apply the Teager-Kaiser Energy Operator (TKEO) and the Fast Walsh-Hadamard Transform (FWHT) to further refine the signal analysis. These extracted features are subsequently used to train a Random Forest (RF) classification model. Remarkably, the model achieves an accuracy of 99.35% with pure signals and maintains an impressive accuracy of 98.26% even with 40 dB noise.

2. Proposed Methodology

Figure 1 illustrates the proposed methodology for classifying PQ disturbances. First, disturbances from nine different event types are generated randomly and processed using FFT. TKEO and FWHT values from the transformed signals are extracted as features, which are then used as input for a RF classifier. Detailed explanations of each stage are provided in the following subsections.

2.1 Creation of the Dataset

Due to the limited availability of real PQD data, this study generates cases of PQDs (including both single and multiple disturbances) by randomly varying the parameters of their numerical models as described in Igual et al. (2018). The dataset is created in MATLAB according to IEEE-1159 standards, closely mimicking real-time data.

For each class, 400 (Ns) samples are generated using a sampling frequency of 1.6 kHz (fs). The fundamental frequency is set to 50 Hz (f), with each class containing 10 cycles (N). The signal amplitude is set to 1 p.u. (A) Using these parameters, the total dataset size becomes 3600 x 320. Samples for each class are generated using the mathematical models and parameters given in Table 1 and 2 as described by Igual et al. (2018). Moreover, an example of each disturbance type is illustrated in Figure 2.

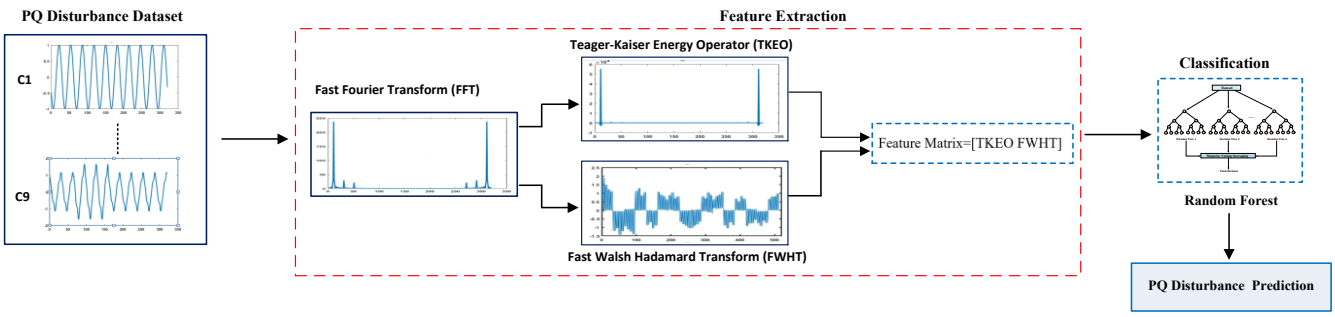


Figure 1. General block diagram of the proposed method.

Table 1. Mathematical model of the PQ Disturbance classes

Class	Disturbances	Mathematical Model
C1	Pure sinusoidal	$v(t) = Asin(\omega t - \varphi)$
C2	Sag	$v(t) = A(1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2)))sin(\omega t - \varphi)$
C3	Swell	$v(t)=A(1+\beta(u(t-t_1)-u(t-t_2)))sin(\omega t - \varphi)$
C4	Interruption	$v(t) = A(1 - \rho(u(t - t_1) - u(t - t_2)))sin(\omega t - \varphi)$
C5	Transient/impulse/spike	$v(t) = A[sin(\omega t - \varphi) - \psi(e^{-750(t-t_a)} - e^{-344(t-t_a)})((u(t - t_a) - u(t - t_b))]$
C6	Oscillatory transient	$v(t) = A[sin(\omega t - \varphi) + \beta e^{-(t-t_I)/\tau} sin(\omega_n(t - t_I) - \theta)((u(t - t_{II}) - u(t - t_I)))]$
C7	Harmonics	$v(t) = A[sin(\omega t - \varphi) + \sum_{i=3}^{7} \alpha_i \, sin(i\omega t - \theta_i)]$
C8	Harmonics with sag	$v(t) = A(1 - \alpha(u(t - t_1) - u(t - t_2)))[sin(\omega t - \varphi) + \sum_{j=3}^{5} \alpha_j \, sin(j\omega t - \theta_j)]$
C9	Harmonics with swell	$v(t) = A(1 - \beta(u(t - t_1) - u(t - t_2)))[sin(\omega t - \varphi) + \sum_{j=3}^{5} \alpha_j \, sin(j\omega t - \theta_j)]$

Table 2. Parameter ranges for disturbance types

Disturbances	Parameters
General	$\omega = 2\pi f; -\pi \le \varphi \le \pi; u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \ge 0 \end{cases}$
Harmonic	$i = \{3,5,7\}; 0.05 \le \alpha_i \le 0.15; -\pi \le \theta_i \le \pi$ $j = \{3,5,7\}; 0.05 \le \alpha_j \le 0.15; -\pi \le \theta_j \le \pi$ $\left[\begin{array}{c} k = \{1,3,5\}; \alpha_k = 1 \xrightarrow{for} k = 1; \\ 0.05 \le \alpha_k \le 0.15 \xrightarrow{for} k = \{3,5\}; -\pi \le \theta_k \le \pi \end{array}\right]$
Sag, swell, interruption	$T \le t_2 - t_1 \le (N-1)T; 0.1 \le \alpha \le 0.9; 0.1 \le \beta \le 0.8; 0.9 \le \rho \le 1$
Transient/impulse/spike	$0.222 \le \psi \le 1.11; T \le t_a \le (N-1)T; t_b = t_a + 1ms$
Oscillatory transient	$300Hz \le f_n \le 900Hz; \omega_n = 2\pi f_n; 8ms \le \tau \le 40ms; -\pi \le \theta \le \pi$ $0.5T \le t_{II} - t_I \le \frac{N}{3.33}T; 0.2T \le t_{II'} - t_{I'} \le t_2 - t_1; t_1 \le t_{I'}; t_{II'} \le t_2$

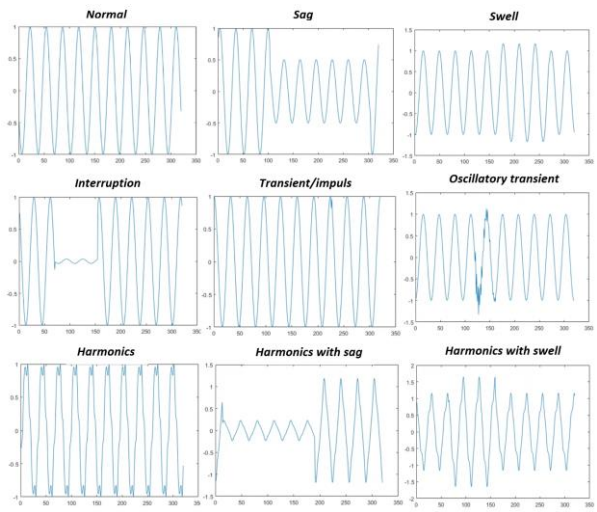


Figure 2. Example for each disturbance type

2.2 Feature Extraction

Fast Fourier Transform (FFT)

The Fourier Transform, a method commonly used in feature extraction, decomposes signals into their frequency components. This decomposition highlights various characteristics of the signals. In this study, the signals are initially transformed using the Fast Fourier Transform (FFT). Then, Teager-Kaiser Energy Operator (TKEO) and Fast Walsh-Hadamard Transform (FWHT) values are calculated separately for feature extraction.

Teager-Kaiser Energy Operator (TKEO)

The Teager-Kaiser Energy Operator (TKEO) is a method primarily designed for analyzing the energy content within a signal (Biswal et al. 2021). Operating as a nonlinear, local differential operator, the TKEO swiftly responds to variations in signal intensity, making it invaluable in various research areas. For an $x(n)$ signal TKEO is calculated as given in eq.1.

$$\Psi[x(n)] = x(n)^2 - x(n-1).x(n+1) \quad (1)$$

Fast Walsh Hadamard Transform (FWHT)

The Fast Walsh-Hadamard Transform (FWHT) is a transformation method developed to eliminate the computational complexity of the Walsh-Hadamard

Transform. The FWHT matrix (H_n) is a transformation matrix size of $2^n x 2^n$as given in eq. 2. This matrix only takes the values of +1 or -1 (Ergün et al. 2020).

$$H_n = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \begin{bmatrix} H_{n-1} & \cdots & H_{n-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n-1} & \cdots & -H_{n-1} \end{bmatrix}, H_0 = 1 \quad (2)$$

2.3 Classification Stage

To accurately classify various PQ disturbance events, a Random Forest (RF) classification model is employed. Random Forest is a powerful machine learning method used for both classification and regression tasks. It operates as an "ensemble" learning model by combining many decision trees, thereby reducing problems like overfitting and instability that a single decision tree might encounter. At the core of Random Forest is the technique known as "bagging" (Bootstrap Aggregating), where each tree is independently trained using randomly selected subsets of the training data. This ensures that each tree learns different aspects of the data. Additionally, at each split point in the tree, a random subset of features is chosen, which enhances the model's ability to generalize and prevents overfitting.

The typical configuration of a Random Forest is depicted in Figure 3. The accuracy of the model is assessed using out-of-bag data, which are the data not used by each tree during training. This allows performance testing without the need for an additional validation set like cross-validation. During prediction, the final outcome is determined either by averaging the predictions from all trees (for regression) or by selecting the class with the most votes (for classification). With its capability to handle high-dimensional data and model complex relationships in the data, Random Forest is a reliable model with a broad range of applications (Seyrek et al. 2022).

Performance Metrics

The performance of the proposed method is evaluated using a confusion matrix. In this study, we aim to classify 9 different types of PQ disturbances, making it a multi-class problem. Each PQ disturbance is assigned a label (*C1, C2, ..., C9*) as described in the previous section. For an *n*-class classification problem, the confusion matrix is an *n×n* matrix, given in Table 3, where each element r_{ij} represents the number of instances where the true class is *i* and the predicted class is *j*. From this confusion matrix, various performance metrics such as accuracy, sensitivity (Recall), precision, and the F1 score for each class can be derived to assess the classifier's performance, as shown in eq. (3) to (6). The overall accuracy is determined by dividing the number of correctly classified instances by the total number of predictions made.

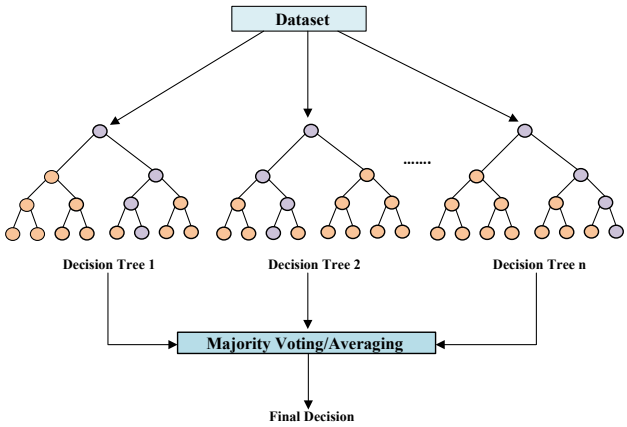


Figure 3. Structure of RF.

Table 3. Confusion Matrix

		Predicted Class				
		C1	***C2***	***C3***	***....***	***Cn***
Actual Cllass	***C1***	r_{11}	r_{12}	r_{13}	...	r_{1n}
	C2	r_{21}	r_{22}	r_{23}	...	r_{2n}
	C3	r_{31}	r_{32}	r_{33}	...	r_{3n}
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$
	Cn	r_{n1}	r_{n2}	r_{n3}	...	r_{nn}

$$Accuracy_i = \frac{r_{ii} + \sum_{j \neq i}^{n} \sum_{l \neq i}^{n} r_{jl}}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} r_{ij}} \quad (3)$$

$$Precision_i = \frac{r_{ii}}{\sum_{j=1}^{n} r_{ji}} \quad (4)$$

$$Sensitivity_{\ i} = \frac{r_{ii}}{\sum_{j=1}^{n} r_{ij}} \quad (5)$$

$$F1 - Score_i = 2x \frac{Precision_i x Recall_i}{Precision_i + Recall_i} \quad (6)$$

3. Performance Results

In this study, 300 samples from each disturbance type are allocated for training and 100 samples for testing, ensuring equal distribution across classes. Given the randomness of the generated samples, the algorithm is executed 50 times to account for all possible variations, with the results presented as averages in the tables. Table 4 compares the performance metrics of the classification model under both no noise and 40dB noise conditions, offering insights into the model's effectiveness and robustness. When there is no noise, the model performs exceptionally well across most classes. For classes C1, C3, C5, C6, C7, and C9, the model achieves perfect scores in accuracy, precision, recall, and F1 (all 1.0). This indicates flawless identification for these classes. Classes such as C2

and C4 also perform well, with slight variations; for instance, class C2 has an accuracy of 0.99, precision of 1, recall of 0.95, and an F1 score of 0.97, indicating only minor imperfections in recall. Class C4 has a precision value of 0.95 but maintains perfect recall, along with high accuracy and F1.

In the presence of 40dB noise, the model's performance remains strong, showcasing its robustness against noisy conditions. For classes C3, C6, C7, and C9, the metrics remain perfect (all 1.0) across accuracy, precision, recall, and F1, indicating no drop in performance. Other classes also maintain high performance levels; for example, class C1 has an accuracy of 0.99, precision of 0.93, recall of 0.97, and an F1 score of 0.95. Class C2 maintains an accuracy of 0.99 and perfect precision, with a recall of 0.95 and an F1 score of 0.97. Class C4 shows similar resilience with an accuracy of 0.99, precision of 0.95, recall of 1.0, and an F1 score of 0.97. Class C5, while having an accuracy of 0.99, has precision and recall of 0.97 and 0.93 respectively, balancing to an F1 score of 0.95.

Comparing both scenarios, it is clear that the model exhibits strong resilience to noise. The high-performance metrics across classes C3, C6, C7, and C9, which are perfect even under noisy conditions, highlight the model's robustness. The slight variations observed in other classes under noise do not significantly impact the overall reliability, as the model still maintains high accuracy and balanced F1 scores. This comparison underscores the model's capability to handle both noise-free and noisy environments effectively, making it a dependable tool for classification tasks in varied conditions.

The confusion matrices in Tables 5 and 6 summarize the average performance of the model over 50 runs, providing insights into how well the classifier distinguishes between different signal classes under both pure and noisy conditions. The rows of the matrices represent the actual classes, while the columns show the predicted classes, with the main diagonal containing the correct classifications. Off-diagonal values highlight the extent of misclassification between classes. For pure signals (Table 5), the model achieves an overall accuracy of 99.35%, indicating strong classification performance across most categories. Notably, classes such as C1, C3, C5, C6, C7, and C9 are classified with perfect accuracy (100%), suggesting the model's ability to distinguish these signals with zero errors. However, there are small misclassifications in some cases, such as C2, which, while achieving 94.74% accuracy, shows some misclassification into C4 (5.14%) and a minor error in classifying a very small percentage (0.12%) into C6 Similarly, C4 is classified with near-perfect accuracy at 99.82%, with only 0.18% of signals being misclassified as C2. Class C8 also demonstrates high precision, with 99.60% correct classifications and minimal misclassification into C4 (0.32%) and C2 (0.08%). When noise is introduced (Table 6), with a signal-to-noise ratio of 40 dB, the overall accuracy remains high at 98.26%, reflecting the model's resilience in the presence of noise.

Table 4. Performance metrics results

Class Label	No noise				With 40 dB noise			
	Accuracy	*Precision*	*Recall*	*F1*	*Accuracy*	*Precision*	*Recall*	*F1*
C1	*1*	*1*	*1*	*1*	*0.99*	*0.93*	*0.97*	*0.95*
C2	*0.99*	*1*	*0.95*	*0.97*	*0.99*	*1*	*0.95*	*0.97*
C3	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*
C4	*0.99*	*0.95*	*1*	*0.97*	*0.99*	*0.95*	*1*	*0.97*
C5	*1*	*1*	*1*	*1*	*0.99*	*0.97*	*0.93*	*0.95*
C6	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*
C7	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*
C8	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*0.99*	*1*
C9	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*	*1*

Table 5. Average confusion matrix for pure signals

Classes	*C1*	*C2*	*C3*	*C4*	*C5*	*C6*	*C7*	*C8*	*C9*
C1	100	0	0	0	0	0	0	0	0
C2	0	94.74	0	5.14	0	0.12	0	0	0
C3	0	0	100	0	0	0	0	0	0
C4	0	0.18	0	99.82	0	0	0	0	0
C5	0	0	0	0	100	0	0	0	0
C6	0	0	0	0	0	100	0	0	0
C7	0	0	0	0	0	0	100	0	0
C8	0	0.08	0	0.32	0	0	0	99.60	0
C9	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Overall classification accuracy 99.35%									

Table 6. Average confusion matrix for 40 dB noise

Classes	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
C1	97.48	0	0	0	2.52	0	0	0	0
C2	0	94.84	0	5.02	0.02	0.12	0	0	0
C3	0	0	100	0	0	0	0	0	0
C4	0	0.14	0	99.86	0	0	0	0	0
C5	7.32	0	0	0	92.68	0	0	0	0
C6	0	0	0	0	0.06	99.94	0	0	0
C7	0	0	0	0	0	0	100	0	0
C8	0	0.12	0	0.36	0	0	0	99.52	0
C9	0	0	0	0	0	0	0	0	100

Overall classification accuracy 98.26%

Table 7. Comparison with the studies in the literature

Reference	Feature Extraction	Classifier	Classification Accuracy (%)	
			Pure	40dB
Li et al. 2016	DRST	DAG SVM	99.30	-
Ranjan et al. 2024	S-Transform	NN	99.50	-
Khan et al. 2021	7 features	Bagged Tree	96.3	-
Wang et al. 2017	S transform	NN	99.26	99.13
Thirumala et al. 2019	TQWT	SVM	97.22	
Garcia et al. 2020	-	CNN-LSTM	84.76	-
Proposed	TKEO+FWHT	RF	99.35	98.26

Although slightly lower than with pure signals, the drop in performance is relatively minor. Class C1, for example, maintains high accuracy with 97.48% of signals correctly classified, though there is a slight increase in misclassification, with 2.52% of the signals being mistaken for C5. Class C2 also retains a strong performance with 94.84% correct classifications, though it shows misclassifications into C4 (5.02%), C5 (0.02%) and C6 (0.12%). Class C3 continues to perform with 100% accuracy even under noisy conditions, showing that certain classes remain robust despite the added noise. Class C5 sees a more noticeable drop in accuracy, with 92.68% correct classifications and 7.32% of signals misclassified as C1. Nevertheless, Classes C6, C7, and C9 continue to maintain perfect accuracy, demonstrating the model's ability to handle noise without compromising accuracy for certain signal types. Class C8, though slightly impacted, retains 99.52% accuracy, with minimal confusion between C4 (0.36%) and C2 (0.12%).

In summary, the confusion matrices highlight the model's high reliability and its strong classification accuracy in both pure and noisy environments. The minor misclassifications observed, particularly under noisy conditions, do not significantly affect overall performance, indicating that the model is well-suited for applications involving signal classification, even in the presence of background noise. These results underscore the robustness and practicality of the model for real-world implementations.

Table 7 provides a comparative analysis of various studies in the literature on PQ disturbance classification. Li et al. (2016) employed the Double-Resolution S-Transform (DRST) in combination with a Directed Acyclic Graph Support Vector Machine (DAG SVM), achieving an accuracy of 99.30% with pure data. Although they explored the effect of noise by adding SNRs from 20dB to 50dB, the results for these noise levels were not disclosed. Ranjan et al. (2024) attained a slightly higher classification accuracy of 99.50% using the S-Transform and a Neural Network (NN), but they did not investigate the impact of noise on their method's performance. Khan et al. (2021) extracted seven features—standard deviation (std), energy, total harmonic distortion (THD), mean frequency, skewness (S kurtosis), average frequency, and total jitter—and applied a Bagged Tree classifier, reporting a lower accuracy of 96.3% under pure data conditions, which falls short compared to our proposed method. Thirumala et al. (2019) utilized the Tunable-Q Wavelet Transform (TQWT) for feature extraction, paired with SVM for classification, reaching 97.22% accuracy under pure data conditions. They also validated their approach using simulated data contaminated with white Gaussian noise across a range of SNRs from 25dB to 55dB. Wang et al. (2017) also examined the influence of noise, achieving an accuracy of 99.26% under pure data conditions and 99.13% under 40dB noise, using the S-Transform and a Neural Network classifier. In contrast, Garcia et al. (2020) employed a CNN-LSTM approach, reporting a lower accuracy of 84.76%, but they tackled a six-class PQ disturbance problem which was tested on experimental data. Our proposed method stands out by delivering highly competitive results using only two key features: TKEO and

FWHT. Despite the simplicity of using just two features, the method achieves a remarkable classification accuracy of 99.35% with pure data and demonstrates robust performance using RF under noisy conditions, reaching 98.26% at 40dB noise. The success of our approach highlights the effectiveness and efficiency of carefully selected features, offering both simplicity and high accuracy in PQ disturbance classification.

4. Conclusion

In this paper, we proposed a method to classify PQ disturbances in power systems. The method begins by obtaining the FFT of the input disturbance signals. These transformed signals are then processed through the TKEO and FWHT to extract features. Using these features, a Random Forest classifier predicts the final class of the disturbances.

The method was validated using an open dataset, where random PQ disturbance samples were generated with various parameters. The results demonstrate the method's success, achieving 99.35% accuracy with pure signals. Furthermore, the method's robustness was tested by introducing 40 dB noise to the pure signals, still resulting in an impressive 98.26% accuracy. These findings underscore the method's reliability and effectiveness, proving its suitability for PQ disturbance classification in both controlled and noisy environments. Although this study used only synthetic data, we plan to collect our own dataset in future studies, allowing us to test the proposed methods on real-world data. This will enable us to assess the method's real-world effectiveness and conduct a more detailed analysis of its impact on energy efficiency and system stability.

Declaration of Ethical Standards
The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement
Author-1: Preparation of resources, methodology development, interpreting results, and writing the manuscript.

Declaration of Competing Interest
The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability Statement
The authors declare that the primary data supporting the findings of this study are available within the article.

5. References

Biswal, M., Ghore, S., Malik, O. P., & Bansal, R. C., 2021. Development of time-frequency based approach to detect high impedance fault in an inverter interfaced distribution system. IEEE Transactions on Power Delivery, 36(6), 3825-3833. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3049572

Chen, Y. C., Syamsudin, M., & Berutu, S. S., 2022, Regulated 2D Grayscale Image for Finding Power Quality Abnormalities in Actual Data. In Journal of Physics: Conference Series, 2347(1), p. 012018 https://doi.org/10.1088/1742-6596/2347/1/012018

Ergün, E., & Aydemir, O., 2020. A hybrid BCI using singular value decomposition values of the fast walsh–hadamard transform coefficients. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 15(2), 454-463. https://doi.org/10.1109/TCDS.2020.3028785

Garcia, C.I., Grasso, F, Luchetta, A., Piccirilli, M.C., Paolucci, L., Talluri, G., 2020. A comparison of power quality disturbance detection and classification methods using CNN, LSTM, and CNN-LSTM. Appl Sci, 10(19):6755. https://doi.org/10.3390/app10196755

Guerrero-Sánchez, A. E., Rivas-Araiza, E. A., Garduño-Aparicio, M., Tovar-Arriaga, S., Rodriguez-Resendiz, J., & Toledano-Ayala, M., 2023. A Novel Methodology for Classifying Electrical Disturbances Using Deep Neural Networks. Technologies, 11(4), 82. https://doi.org/10.3390/technologies11040082

Gonzalez-Abreu A-D, Delgado-Prieto M, Osornio-Rios R-A, Saucedo-Dorantes J-J, Romero-Troncoso R-d-J., 2021. A Novel Deep Learning-Based Diagnosis Method Applied to Power Quality Disturbances. Energies, 14(10):2839. https://doi.org/10.3390/en14102839

Igual, R., Medrano, C., Arcega, F. J., & Mantescu, G., 2018. Integral mathematical model of power quality disturbances. In 18th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana, Slovenia, 1-6. https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378902

Li, J., Teng, Z., Tang, Q., and Song, J., 2016. Detection and classification of power quality disturbances using double resolution S-Transform and DAG-SVMs. IEEE Trans. Instrum. Meas., 65(10), 2302–2312. https://doi.org/10.1109/TIM.2016.2578518

Khan, M. U., Aziz, S., Usman, A., & Jalil, T., 2021. Soft computing approach for classification of complex power quality events. In IEEE International Conference on Artificial Intelligence (ICAI), Islamabad, Pakistan, 223-228). https://doi.org/10.1109/ICAI52203.2021.9445264

Liu, H., Hussain, F., Shen, Y., Arif, S., Nazir, A., & Abubakar, M., 2018. Complex power quality disturbances classification via curvelet transform and deep learning. Electric Power Systems Research, 163, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.05.018

Mian Qaisar, S., 2021. Signal-piloted processing and machine learning based efficient power quality disturbances recognition. PloS one, 16(5), e0252104. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252104

Mozaffari, M., Doshi, K., & Yilmaz, Y., 2022. Real-time detection and classification of power quality disturbances. Sensors, 22(20), 7958. https://doi.org/10.3390/s22207958

Narayanaswami, R., Sundaresan, D., & Prema, V. R., 2020. The mystery curve: a signal processing-based power quality disturbance detection. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(10), 10078-10086. https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3026268

Özer, İ., Efe, S. B., & Özbay, H., 2021. CNN/Bi-LSTM-based deep learning algorithm for classification of power quality disturbances by using spectrogram images. International Transactions on Electrical Energy Systems, 31(12), e13204. https://doi.org/10.1002/2050-7038.13204

Priyadarshini, M. S., Bajaj, M., Prokop, L., & Berhanu, M., 2024. Perception of power quality disturbances using Fourier, Short-Time Fourier, continuous and discrete wavelet transforms. Scientific Reports, 14(1), 3443. https://doi.org/10.1038/s41598-024-53792-9

Ranjan, A., Lodhi, D., Tripathi, A., Pal, C., Singh, G., & Virmani, R., 2024. Classification of Power Quality Disturbance using Stockwell Transform. In IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Bhopal, India,1-6. https://doi.org/10.1109/SCEECS61402.2024.10482166

Rodrigues, W. L., Borges, F. A., de Carvalho Filho, A. O., & Rabelo, R. D. A., 2021. A deep learning approach for the detection and classification of power quality disturbances with windowed signals. SN Computer Science, 2, 1-14. https://doi.org/10.1007/s42979-020-00435-1

Seyrek, E. C., & Uysal, M., 2022. Farklı platformlardan elde edilen hiperspektral görüntülerin sınıflandırılmasında evrişimli sinir ağları, destek vektör makineleri ve rastgele orman algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(6), 1368-1379. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1177912

Sind,i H., Nour, M., Rawa, M., ¨Oztürk, S¸, Polat, K., 2021. A novel hybrid deep learning approach including combination of 1D power signals and 2D signal images for power quality disturbance classification. Expert Syst Appl, 174:114785. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114785.

Singh, B., Chandra, A., Al-Haddad, K., 2014. Power Quality: Problems and Mitigation Techniques, John Wiley & Sons.

Singh, G., Pal, Y., & Dahiya, A. K., 2023. Classification of power quality disturbances using linear discriminant analysis. Applied Soft Computing, 138, 110181. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110181

Thirumala, K. et al., 2019. A classification method for multiple power quality disturbances using EWT based adaptive filtering and multiclass SVM. Neurocomputing, 334:265e74. 18. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.01.038

Thirumala, K., Siva. Prasad, M., Jain, T., Umarikar, A.C., 2018. Tunable-Q Wavelet Transform and Dual Multiclass SVM for Online Automatic Detection of Power Quality Disturbances. IEEE Trans Smart Grid, 9(4):3018–28. https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2624313.

Wang, H., Wang, P., Liu, T.,2017. Power quality disturbance classification using the S-transform and probabilistic neural network. Energies, 10(1):1-19. https://doi.org/10.3390/en10010107

Wang, S., Chen, H., 2019. A novel deep learning method for the classification of power quality disturbances using deep convolutional neural network. Appl Energy,235:1126-1140. https://doi.org/doi:10.1016/j.apenergy.2018.09.160

Wang, J., Xu, Z., Che, Y., 2019. Power quality disturbance classification based on compressed sensing and deep convolution neural networks. IEEE Access, 7:78336e46. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2922367.

Yılmaz, A., Küçüker, A., Bayrak, G., Ertekin, D., Shafie-Khah, M., & Guerrero, J. M., 2022. An improved automated PQD classification method for distributed generators with hybrid SVM-based approach using un-decimated wavelet transform. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 136, 107763. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107763

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1559119
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035202 (544-557)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035202 (544-557)

Üç Fazlı NNK Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Eviriciler için YSA Tabanlı Kontrolörlerin Uygulanması

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 01.10.2024
Kabul/Accepted: 08.01.2025
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Implementation of an ANN based Controllers for Three Phase NPC Grid Connected PV Inverter

Yunus Emre YAĞAN, Kadir VARDAR*

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya.

Öz

Bu çalışmada, üç fazlı üç seviyeli Nötr Noktası Kenetli (NNK) tek aşamalı ve transformatörsüz şebeke bağlantılı bir Fotovoltaik (FV) evirici sistemi için bir Yapay Sinir Ağı tabanlı Akım Kontrolcüsü (YSA-AK) ve bir YSA tabanlı Kapasitör Gerilim Dengeleyici (YSA-KGD) tasarlanmıştır. MATLAB/Simulink ortamında, Orantısal-Rezonans (PR) ve Orantısal-İntegral (PI) kontrolcüler kullanılarak hazırlanan evirici benzetimden elde edilen veriler kullanılarak YSA'lar eğitilmiştir. Tasarlanan YSA-KGD, PI tabanlı statik yapıda bir ağdır. YSA-AK ise PR tabanlıdır ve dinamik bir yapıya sahiptir. Elde edilen YSA kontrolcüler, literatürde bulanan diğer YSA kontrolcüler ile ağ yapılarının büyüklüğü ve görevleri esas alınarak karşılaştırıldığında, fazla işlem yükü gerektirmeyen, uygulanması kolay yapıda oldukları görülmüştür. YSA ve klasik kontrolcülerin performansları hem benzetim ortamında hem de laboratuvar ortamında karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Benzetim ortamındaki testler, FV evirici sisteminin güç katı MATLAB ortamında, tüm kontrol yazılımları prototip evirici kontrol kartı içerisinde olacak şekilde bir ortak çalışma yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım güç elektroniği uygulamalarında deneysel çalışmaya geçilmeden önce, hazırlanan yazılımın güvenli şekilde test edilebilmesi için genelleştirilmiş bir yöntemdir. Prototip evirici kontrol kartı tasarımında STM32F407VGT6 DISCOVERY Board kiti kullanılmıştır ve kontrol yazılımları MikroC dilinde hazırlanmıştır. Laboratuvar testleri 9kVA'lik 3 fazlı bir NNK evirici devresi ile gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Yapay Sinir Ağlar;, Kapasitör Gerilim Dengeleyici; Akım Kontrolcü; NNK Evirici; PR Kontrolcü.*

Abstract

In this study, an Artificial Neural Network-based Current Controller (ANN-CC) and an ANN-based Capacitor Voltage Balancer (ANN-CVB) for a three-phase three-level Neutral Point Clamped (NPC) single-stage and transformerless grid-connected Photovoltaic (PV) inverter system is designed. ANNs are trained using the data obtained from the inverter simulation prepared using Proportional-Resonant (PR) and Proportional-Integral (PI) controllers in MATLAB/Simulink environment. The designed ANN-CVB is a PI-based static network. ANN-CC, on the other hand, is PR based and has a dynamic structure. When the obtained ANN controllers are compared with the other ANN controllers found in the literature on the basis of the size and tasks of the network structures, it is seen that they do not require much computational burden and are easy to implement. The performances of ANN controllers and classical controllers have been comparatively tested both in the simulation environment and in the laboratory environment. Simulation tests are carried out in a cooperation simulation approach. In the cooperation simulation, the entire controller of the grid connected PV inverter is programmed on the prototype inverter control card whereas its power circuits are kept in the Simulink. Using such a cooperation approach in power electronics applications is a generalized method for testing the prepared software safely before the experimental work. In the prototype inverter control card, STM32F407VGT6 DISCOVERY Board is used and the control software is prepared in MikroC language. Laboratory tests are carried out with a 9kVA 3-phase NPC inverter circuit.

Keywords: *Artificial Neural Networks; Capacitor Voltage Balancer; Current Controller; NPC inverter; PR Controller.*

1. Giriş

Şebeke bağlantılı FV sistemlerde, FV kaynak çıkışında elde edilen Doğru Akım (DA) elektrik enerjisi, eviriciler ile şebekeye uygun formda bir Alternatif Akım (AA) elektrik enerjisine evirilir (Bouaouaou vd. 2022). Eviriciler, çıkışlarında elde edilen filtrelenmemiş gerilimin seviye (basamak) sayısına göre, iki seviyeli ve çok seviyeli olarak sınıflandırılmıştır (Yacine vd. 2017). Eviricilerde seviye sayısının artmasıyla çıkış dalga formu sinüzoidal forma yakınlaşmaktadır. Böylelikle de evirici çıkışındaki filtreleme gereksinimi azalmaktadır. Aynı zamanda kullanılan anahtarlama elemanları, DA bara geriliminin tamamına değil, yalnızca bir gerilim seviyesine maruz kaldığı için, daha küçük dayanım gerilimlerinde seçilebilmektedir. Çok seviyeli eviriciler çeşitli avantajlarından dolayı, günümüzde birçok farklı güç elektroniği uygulamasında kullanılan, güncel bir çalışma konusu konumundadır (Yağan ve Vardar 2021, Babaie vd. 2020a, Beşer ve Beşer 2021). Eviricilerdeki akım kontrolü ve gerilim kontrolü gibi önemli görevlerde YSA kontrolcülerin kullanıldığı uygulamalar giderek yaygınlaşmaktadır. YSA kontrolcüler kullanılarak klasik

**Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Kadir VARDAR* *e-posta/e-mail: kadir.vardar@dpu.edu.tr*

kontrolcülere göre performans artışının yakalanması amaçlanmaktadır. Çünkü YSA'lar, sistem modelinden bağımsız olarak tasarlanabilme, farklı tasarım/modelleme imkânları sayesinde kontrolcü yapılarının basitleştirilebilmesi ve işlem sürelerinin azaltılabilmesi gibi özellikleri ile birlikte, parametre değişimlerine ve gürültülere karşı gürbüzlüğe de sahiptir (Dong vd. 2021, Tran vd. 2019, Mohamed vd. 2019, Mehrasa vd. 2021). Literatürde var olan uygulamalar incelendiğinde tasarlanmış olan YSA kontrolcülerin çıkışlarının genel olarak; a) Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM) (Sun vd. 2019, Vinnakoti ve Kota 2018, Babaie vd. 2019) ve Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) (Mohamed vd. 2019) ve Histerezis modülasyon (Vinnakoti ve Kota 2018) yöntemleri için gerilim/akım referansı üretmek, b) doğrudan IGBT'ler için anahtarlama sinyalleri üretmek (Villalva ve Ruppert 2004, Chenai ve Benchouia 2014) ve c) PI (Venkatesan vd. 2021, Sujatha ve Anitha 2018), PR (Tran vd. 2019, Mohamed vd. 2019, Mehrasa vd. 2021) ve model tahminci (Babaie vd. 2022) kontrolcülerde kullanılan parametrelerin belirlenmesi olduğu görülmüştür. YSA girişleri olarak ise akım, akım hatası, hatan integrali, hatanın türevi, hatanın önceki değerleri vs gibi bilgiler kullanılmaktadır. YSA kontrolcülerin çevrim dışı ve denetimli öğrenmelerinde, eğitim verilerinin benzetimler üzerinden elde edilmesi gerekmektedir. Yapılan literatür taramasında, PI (Liv vd. 2014, Sujatha ve Anitha 2018), kayan kipli (Babaie vd. 2020a) ve model tahminci (Mohamed vd. 2019) kontrolcüler kullanılarak tasarlanan benzetimlerden elde edilen veriler ile eğitilen YSA'ları ile karşılaşılmıştır. PR kontrolcüler kullanılarak elde edilen veriler ile eğitilen bir YSA uygulamasına rastlanmamıştır. Bana ve Amin (2023)'de sunulan çalışmada senkron referans çerçeve (SRF) tabanlı kontrolcülerin kullanıldığı, şebeke bağlantılı bir evirici uygulaması için YSA akım kontrolcüsü önermektir. Son yıllarda bu YSA yapıları öngörülü kontrol uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır (Goh vd. 2024, Kinga vd. 2024, Massaro 2024).

Bu çalışmada, MATLAB/Simulink ortamında benzetimi yapılan, üç fazlı üç seviyeli NNK bir evirici uygulamasında kullanılan PR akım kontrolcüsünden alınan veriler kullanılarak bir YSA-AK tasarlanmış ve eğitilmiştir. Tasarlanan YSA-AK, üç adet girişe, bir adet gizli katmana, gizli katmanda bir adet nörona ve bir adet çıkışa sahip, dinamik bir YSA yapısındadır. YSA-AK'nün çıkışı SDGM için gerilim referansıdır, girişleri ise akım hatası, hatanın önceki değeri ve ağ çıkışının önceki değeridir. YSA-AK bu dinamik yapısı sayesinde fazla işlem yükü gerektirmeden, az sayıda gizli katman ve minimum sayıda nöronla eğitilebilmiştir. Literatürde var olan YSA-AK yapıları ile karşılaştırıldığında çok daha az sayıda işlem yüküne sahip olduğu görülmüştür. Liv vd. (2014) gerçekleştirdiği çalışmada, üç fazlı uygulama için tasarlanan YSA-AK'nün işlem yükü; 84 adet çarpma işlemi, 14 adet toplama işlemi, 14 adet aktivasyon fonksiyonu ve girişlerden ikisine integral alma işlemleridir. Sun vd. (2014, 2017) ve Li vd. (2019) çalışmalarında, üç fazlı uygulama için YSA-AK'nün işlem yükü 72 adet çarpma işlemi, 14 adet toplama işlemi, 14 adet aktivasyon fonksiyonu ve girişlerden ikisine integral alma işlemleridir. Babaie vd. (2020a)'da üç faz uygulaması için YSA-AK ve YSA-KGD'i birlikte içeren bir YSA kontrolcüsü tasarlanmış ve işlem yükü; 60 adet çarpma işlemi, 13 adet toplama işlemi ve 13 adet aktivasyon fonksiyonu olarak görülmektedir. Babaie vd. (2020a) ve (2020b) çalışmalarında ise tek faz uygulama için sunulan YSA-AK'nün işlem yükü; 20 adet çarpma işlemi, 11 adet toplama işlemi ve 11 adet aktivasyon fonksiyonu işlemleri içermektedir. Bu çalışmada sunulan YSA-AK'nün işlem yükü ise bir faz için 8 adet çarpma, 4 adet toplama ve 4 adet aktivasyon fonksiyonu işlemlerinden oluşmaktadır.

Ayrıca sunulan bu çalışmada, benzetimi yapılan NNK eviricinin DA bara kapasitörlerinin gerilimlerinin dengelenmesi için de, iki adet PI kontrolcü içeren evirici simülasyonundan alınan veriler kullanılarak hazırlanmış bir adet YSA-KGD tasarlanmıştır. Tasarlanan YSA-KGD, iki adet giriş, bir adet çıkış, bir adet gizli katman ve gizli katmanda bir adet nöron içeren yapısıyla oldukça az işlem yükü gerektirmektedir. Üç fazlı şebeke bağlantılı NNK FV evirici sistemi için önerilen bu YSA kontrolcülerin performansları, hem benzetim ortamında hem de deneysel ortamda incelenmiş ve klasik kontrolcülerin performansı ile karşılaştırılmıştır. Benzetim ortamındaki testler, FV evirici sisteminin güç katı MATLAB/Simulink ortamında, tüm kontrol yazılımları ise uygulama devresinde kullanmak amacıyla tasarlanan prototip evirici kontrol kartı içerisinde olacak şekilde hazırlanan, bir ortak çalışma yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir.

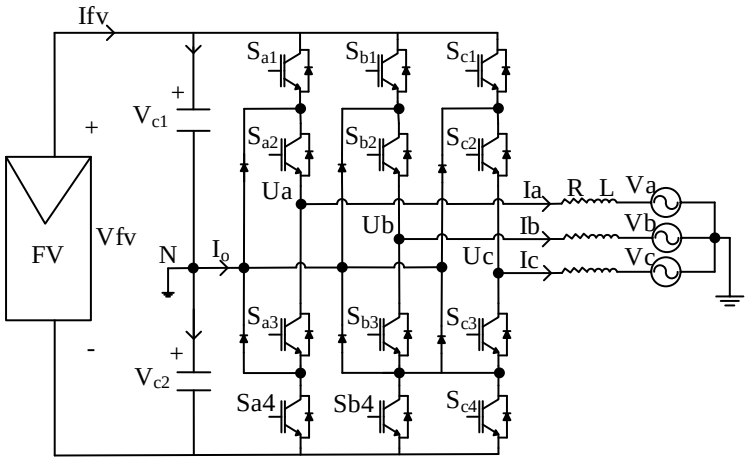
Deneysel çalışmalar için ise laboratuvar ortamında 9kVA, 3 fazlı bir NNK evirici tasarımı yapılmıştır ve bu sistem üzerinde test edilmiştir. Bu çalışmanın mevcut literatüre kıyasla yenilikçi yönü;

- NNK eviricilerde kullanılması amacı ile dinamik ağ yapısında YSA tabanlı, etkili ve az işlem yükü gerektiren bir akım kontrolcüsü tasarlanmış ve FV sistem birlikte kullanımı durumundaki performansı incelenmiştir.
- NNK eviriciler için kapasitör dengelemesi amacı ile statik bir YSA tasarımı yapılmıştır.
- Tasarlanan YSA kontrolcüler FV sistem için Matlab ile ortak çalışma (Hardware in the Loop, HIL) tekniği ile

testleri yapılmıştır. Akım kontrolcüsü ve gerilim dengeleyicisinin çalışması deneysel olarak gerçekleştirilmiştir ve incelenmiştir. Makalenin ikinci bölümünde, kullanılan FV sistemin bileşenleri ve kullanılan kontrol yapıları tanıtılmıştır. Üçüncü bölümünde, önerilen YSA kontrolcüler (akım ve dengeleme kontrolü için) ve bunların eğitimleri detaylı olarak açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, kontrolcü performansları benzetim ve laboratuvar ortamında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Beşinci bölümünde ise elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

2. Üç Faz Şebeke Bağlantılı NNK FV Eviriciler

Bir FV kaynaktan enerji üretimi, temelde güneş hücreleri ile gerçekleştirilir. Güneş hücreleri seri ve/veya paralel olarak birleştirilerek FV panel oluşturulur. FV panele modül de denilmektedir. FV modüller seri olarak birleştirilerek FV sıra (string,<10kW) oluşturulur. FV sıralar, paralel olarak birleştirilerek yüksek güçlü FV dizi (array) elde edilir (Yağan vd. 2018a, Patel ve Agarwal 2008, Zeb vd. 2018a). Şebeke ve FV kaynak arasındaki en önemli (ya da ana) bağlantı elemanları eviricilerdir (Faraji vd. 2017). Literatürde tek fazlı, üç fazlı, tek aşamalı, çok aşamalı, iki seviyeli, çok seviyeli, transformatörlü, transformatörsüz gibi farklı özelliklere sahip çok sayıda FV evirici yapısı mevcuttur (Zeb vd. 2018b). Bu çalışmada, Şekil 1'de gösterilen çok seviyeli, tek aşamalı, transformatörsüz üç fazlı bir FV evirici yapısı kullanılmaktadır. Transformatörsüz ve tek aşamalı yapının seçilmesinin sebebi, evirici sistemin maliyetini azaltmak, boyutunu küçültmek ve verimini artırabilmektir. Çok seviyeli eviriciler arasında en yaygın kullanılan Nötr Noktası Kenetli eviricidir. Çok seviyeli NNK evirici iki seviyeli olanlarla kıyaslandığında düşük Toplam Harmonik Bozulma (THB), dv/dt gerilim tranzientlerinin sınırlandırılması, aynı özelliklerdeki anahtarlama elemanları ile daha yüksek çıkış gerilimine olanak tanıması, daha küçük boyutta filtre elemanlarına müsaade etmesi, yüksek verim ve düşük ortak mod gerilimi gibi üstünlüklere sahiptir. DA bara kapasitörlerinin gerilim dengesi ve güç elemanlarındaki kayıpların eşit olmayan dağılımı ise NNK topolojisinin iki ana dezavantajıdır. Bu topoloji ile teorik olarak istenilen sayıda gerilim seviyesi elde edilebilir. Fakat teknik kısıtlamalar ve ekonomik yönü yüzünden en yaygın kullanılan yapısı üç seviyeli olanıdır (Faraji vd. 2017). Şebeke bağlantılı NNK eviricinin genel matematik modeli denklem (1)-(3) ile ifade edilebilmektedir.



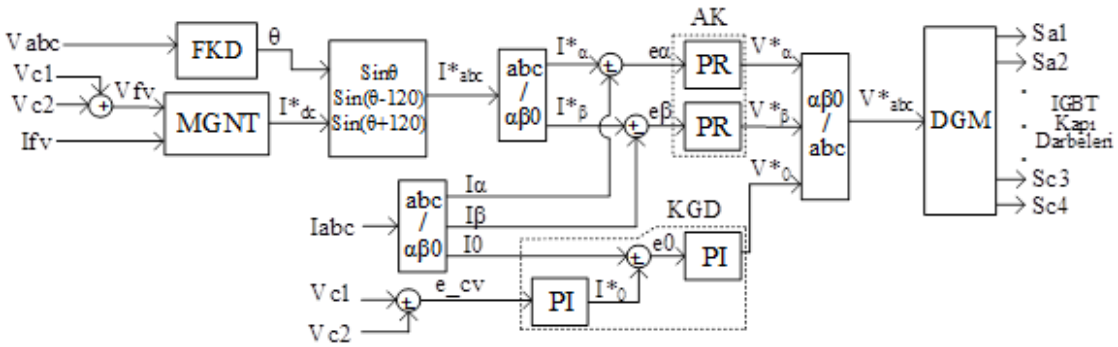
Şekil 1. Üç fazlı, üç seviyeli, tek aşamalı, transformatörsüz FV evirici

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L}\begin{bmatrix} U_a - V_a \\ U_b - V_b \\ U_c - V_c \end{bmatrix} - \frac{R}{L}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S_{xo} = \begin{cases} 0, & U_{xN} = V_{c1} \\ 1, & U_{xN} = N \\ 0, & U_{xN} = -V_{c2} \end{cases} x = a,b,c. \quad (2)$$

$$I_o = S_{ao} \cdot I_a + S_{bo} \cdot I_b + S_{co} \cdot I_c - (I_a + I_b + I_c) \quad (3)$$

Bu üç fazlı şebeke bağlantılı NNK FV evirici sistemi için klasik kontrol blok diyagramı Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'deki kontrol sistemi; MGNT kontrolü, Şebeke senkronizasyonu (FKD), Kapasitör gerilimlerinin dengelenmesi (KGD), Akım kontrolcüsü (AK) ve Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) gibi ana birimlerden oluşmaktadır. FV kaynağın verebileceği maksimum güç değeri, çevresel koşullara (ışınım şiddeti, sıcaklık, gölgelenme vb.) bağımlı olarak değişmektedir. Bir FV kaynaktan maksimum verimin alınabilmesi panelden çekilen akım ve panel gerilimin (Vfv ve Ifv) sürekli olarak takip edilerek çalışma noktasının sürekli olarak güncellenmesi gerekmektedir.



Şekil 2. Üç fazlı NNK FV evirici için klasik kontrol blok diyagramı

Maksimum güç noktası kontrolü yapan birime MGNT denilmektedir. MGNT, çok aşamalı eviricilerde FV kaynak ve DA-AA evirici arasına yerleştirilen bir DA-DA çevirici ile yapılmaktadır. Tek aşamalı eviricilerde ise DA-DA güç çevirme aşamasının getirdiği kayıplardan kaçınarak verimi artırmak amacıyla DA-AA evirici kontrol sistemi içerisine dâhil edilerek yapılmaktadır. Literatürde, birçok MGNT yöntemi vardır, bunlardan en yaygın kullanılanı Hata-Gözlem (H&G) algoritmasıdır (Yağan vd. 2018b). Bu çalışmada da maksimum güç noktasının takibi için H&G algoritması kullanılmıştır.

Şebeke etkileşimli eviriciler için şebeke senkronizasyonu, kontrol sisteminin önemli bir parçasıdır. Çünkü birim güç faktörünün sağlanabilmesi için şebekeye aktarılan akım şebeke gerilimi ile aynı frekans ve fazda olmalıdır. Literatürde, evirici ile şebekenin senkronizasyonu için birçok farklı yöntem bulunmaktadır (Hlaili vd. 2017, Crescimbini vd. 2012, İbrahim ve Altın 2009, Chatterjee ve Mohanty 2018, Panigrahi vd. 2018). Bu çalışmada, üç fazlı uygulamalarda yaygınca kullanılan Senkron Referans Çerçeve-Faz Kilitleme Döngüsü (SRÇ-FKD) yöntemi kullanılmıştır (İbrahim ve Altın 2009, Chatterjee ve Mohanty 2018, Panigrahi vd. 2018). MGNT biriminden elde edilen referans panel akım değeri ile FKD biriminden elde edilen faz bilgisinden oluşturulan üç fazlı birim sinüs vektör değeri çarpılarak, evirici referans akımları elde edilmektedir.

NNK eviricinin simetrik bir çıkış gerilimi oluşturabilmesi için eviricinin girişinde bulunan ve DA barayı ikiye bölen kondansatörlerin gerilimlerinin dengeli olması ve dengede kalması gerekmektedir. Aksi taktirde bu durum, nötr hattından yüksek frekanslı akımların akmasına, yük akımlarında yüksek THB ve DA ofsetlerin oluşmasına sebep olacaktır. Kapasitörlerin gerilim dengesizliğinin fazla olması, yarı iletken anahtarlama elemanlarının zarar görmesine de sebep olabilmektedir. Literatürde, KGD için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları, DA barayı bölen her bir kondansatör için farklı bir DA kaynak kullanmak, yardımcı bir çevirici kullanarak gerilimleri eşitlemek ve çeviricinin anahtarlama stratejisini değiştirerek dengeyi sağlamak olarak sıralanabilir (Özdemir 2013, Lim vd. 1999). Kapasitör gerilimindeki dengesizlik, faz akımlarının pozitif ve negatif çevrimlerinin tepe değerlerinde genlik farklılıklarına neden olmaktadır. Denklem (3)'te görüleceği gibi abc akım değerlerinde oluşabilecek bir dengesizlik, eviricide sıfır sıra akımlarının oluşmasını sağlayacaktır. Bu nedenle eviricinin kontrolünde, iki adet PI kontrolcü içeren bir gerilim dengeleyici kullanılmaktadır. İlk PI kontrolcü ile herhangi bir gerilim dengesizliğinde sıfır sıra bileşen akım referansı (I^*_0) çıkışı üretilir. İkinci PI kontrolcü ile ise bu referans akım ve gerçek sıfır sıra akım karşılaştırılarak kontrol yapılır ve bir sıfır sıra bileşen gerilim referansı (V^*_0) elde edilir (Lim vd. 1999). Şekil 2'deki blok diyagramda görüleceği üzere, PR kontrolcüler kullanılarak akımın alfa ve beta eksen bileşenlerinin kontrolü gerçekleştirilmektedir. PR akım kontrolcünün kullanılmasının ana sebepleri sinüzoidal referansları minimum kararlı hal ve faz hataları ile takip edebilmeleri ve seçici harmonik kompanzasyon yapabilme yetenekleridir. Ayrıca, PR kontrolcünün diğer bir avantajı da algoritmada park ve ters park dönüşümleri içermediğinden dolayı işlem yükünün daha az olmasıdır. Kullanılan PI ve PR kontrolcülere ait transfer fonksiyonları denklem (4) ve (5)'te verilmiştir (Parvez vd. 2020, Cha vd. 2009, Nazeri vd. 2019, Teodorescu vd. 2006). Bu eşitlikler, benzetim çalışmalarında sürekli zaman sisteminden ayrık zaman sistemi eşitliklerine dönüştürülerek kullanılmıştır.

$$G_P(\mathrm{s}) = \mathrm{K}_P + \frac{K_i}{s} \tag{4}$$

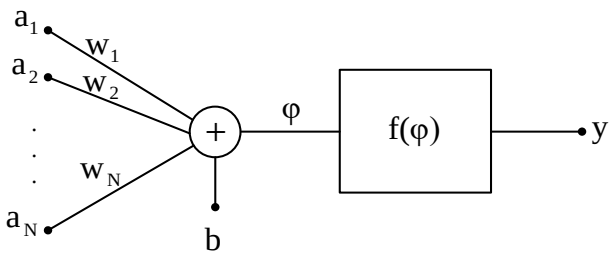
$$G_{PR}(\mathrm{s}) = \mathrm{K}_{PR} + \frac{2K_{iR}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \tag{5}$$

Denklemlerde, K_P ve K_{PR} orantısal kazançları, K_i integral kazancını, K_{iR} rezonans integral kazancını, ω_0 temel frekansı, ω_c kesim frekansını temsil etmektedir. DGM, evirici anahtarlarına kapı sinyalleri üretmek için kullanılmaktadır. Şebeke bağlantılı çok seviyeli eviricilerde, DGM yöntemleri, SDGM, Histerezis, Seçici

Harmonik Eliminasyonu (SHE) ve UVDGM olarak sınıflandırılabilir. SDGM'de, kapı sinyalleri üretmek için akım kontrolcüsü çıkışında üretilen referans gerilim sinyali, bir üçgensel taşıyıcı sinyal ile karşılaştırılır. Çok seviyeli uygulamalarda, seviye sayısının bir eksiği kadar taşıyıcı sinyal gerekmektedir. Çok taşıyıcılı SDGM, taşıyıcıların birbirlerine göre yerleştirilmeleri açısından faz kaydırmalı ya da seviye kaydırmalı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada NNK evirici için daha uygun olan faz kaydırmalı SDGM yöntemi kullanılmıştır (Latran ve Teke 2015).

3. Tasarlanan YSA Tabanlı Kontrolcüler

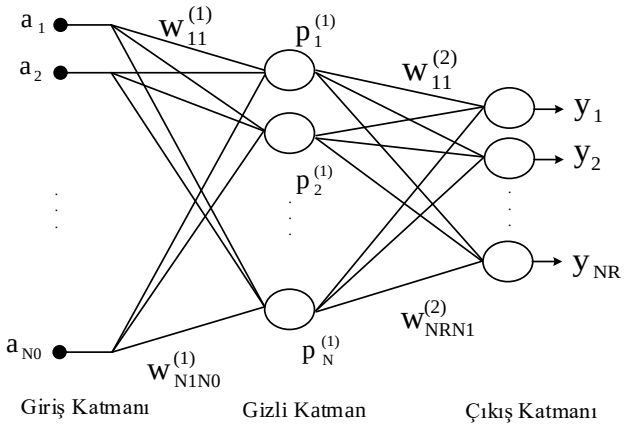
Yapay sinir ağları, biyolojik sinir ağlarına benzetilmek amacıyla geliştirilen bir yapay zekâ tekniğidir. Çok girişli ve tek çıkışlı bir biyolojik nöronun basitleştirilmiş bir modeli Şekil 3'te verilmiştir. Bu modelin tipik ismi tek katmanlı tek nöronlu ileri beslemeli ağdır (tek katmanlı tek nöronlu perceptron ağı) (Hagan vd. 2014, Mohamed vd. 2019).



Şekil 3. Tek katmanlı tek nöronlu ileri beslemeli YSA

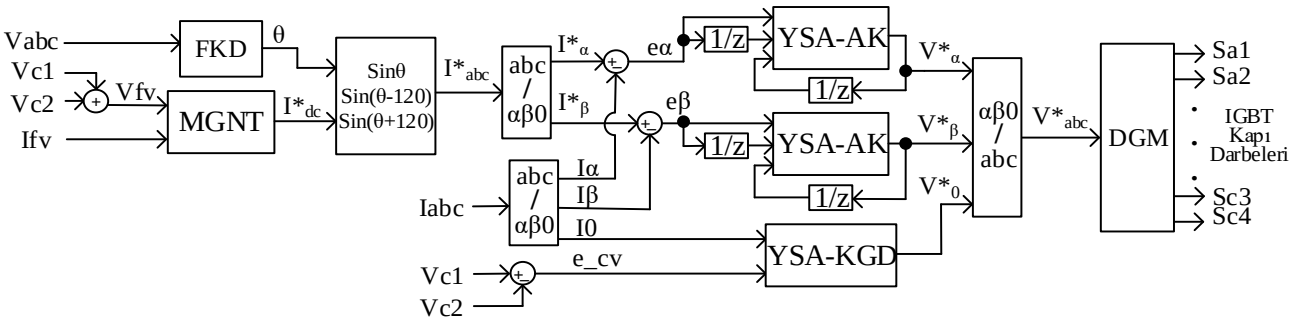
$$y=f(\varphi)=f\left(\sum_{i=1}^{N_0} w_i a_i\right) \quad (6)$$

Burada; y nöron çıkışını, f aktivasyon fonksiyonunu, φ toplam çıkış sinyalini, w_i i. ağırlık değerini ve a_i i. girişi ifade etmektedir. Birden fazla nöron bir araya getirilerek çeşitli YSA yapıları oluşturulmaktadır. Şekil 4'te görülen YSA çok katmanlı ileri beslemeli bir ağ yapısıdır. Giriş sayısı, gizli katman sayısı, katmanlarda kullanılan aktivasyon fonksiyonu türü ve çıkış sayısı her uygulamada farklı olabilir. Bu tür ağlar, herhangi bir geri besleme girdisi içermediğinden ve girişlerin önceki değerlerine bağımlı olmadığından dolayı hafızasız ya da statik ağlar olarak isimlendirilirler. Bunun dışında literatürde hafızalı ağlar olarak adlandırılan dinamik yapıda ağlar da mevcuttur. Dinamik ağlar, potansiyel olarak ileri beslemeli ağlara göre gürültü ve parametre değişimlerinde daha iyi performans göstermektedirler. Bu tip ağlarda çıkış, girişin, gizli katmanların ya da çıkışın önceki değerlerine bağlı olarak üretilmektedir (Hagan vd. 2014).



Şekil 4. Çok katmanlı ileri beslemeli bir YSA

Bu çalışmada, Şekil 2'de verilen şebeke bağlantılı FV evirici kontrol blok diyagramındaki KGD kontrolcüsü (2 adet PI kontrolcüsü içeren) ve PR akım kontrolcüsü yerine kullanılması amacıyla iki farklı YSA tabanlı kontrolcü tasarlanmıştır. YSA-KGD, sadece o anki girişlere bağlı olan statik yapıda bir ağ olarak hazırlanmıştır. YSA-AK ise hem girişin önceki değerlerine hem de çıkışın önceki değerlerine bağlı dinamik yapıda bir ağ olarak oluşturulmuştur. Önerilen bu iki YSA kontrolcüsünün üç fazlı NNK şebeke bağlantılı FV evirici devresindeki kullanımı Şekil 5'te verilmiştir.



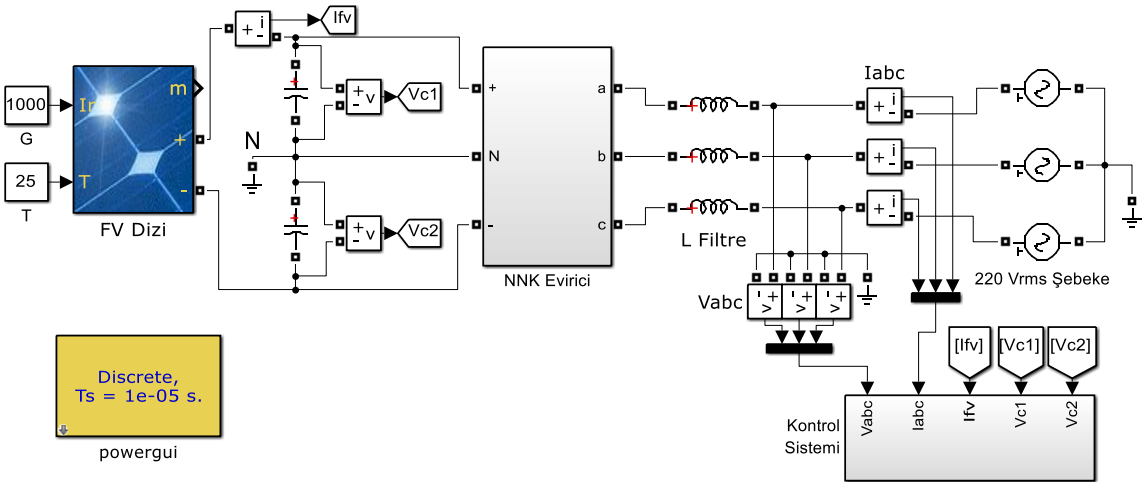
Şekil 5. Üç fazlı NNK FV evirici için YSA tabanlı kontrol blok diyagramı

Şekil 5'ten görülebileceği gibi, YSA-KGD girişleri ve çıkışı, Şekil 2'deki gerilim dengeleme kontrolcüsü ile aynı parametreler olacak şekilde (I_0, e_cv ve V^*_0) tasarlanmıştır. İki adet PI kontrolcü içeren KGD yerine bir adet YSA-KGD tasarlanmıştır ve ağ eğitimleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. YSA-AK için ise öncelikle Şekil 2'deki PR akım kontrolcüsü ile aynı giriş/çıkış parametrelerine sahip, (giriş akım hatası (eα/eβ), çıkış

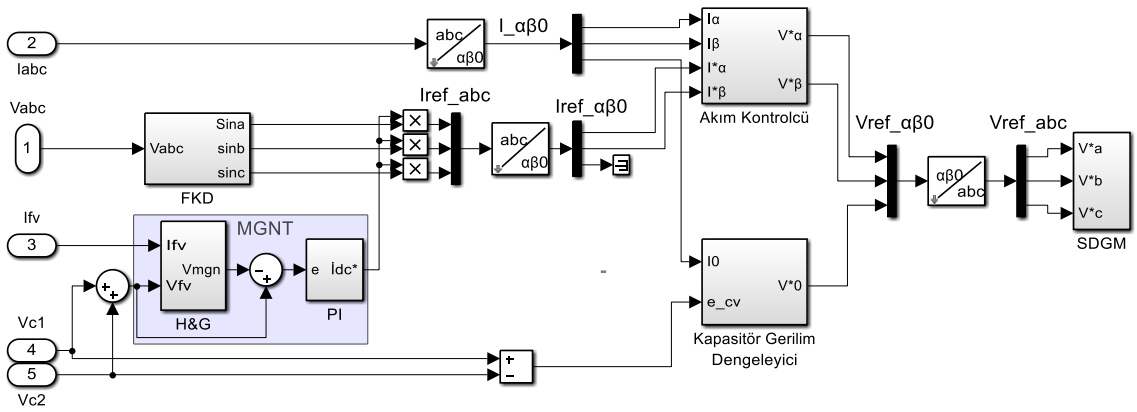
evirici referans gerilimi (V^*_α/V^*_β) bir ağ yapısı oluşturulmuş, fakat bu ağın başarılı bir şekilde eğitimi mümkün olmamıştır. Bundan dolayı, klasik yapının dışına çıkılarak tasarımı yapılan ağa farklı giriş parametreleri eklenerek çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda; önerilen YSA-AK'ın eğitimi, Şekil 5'te görülen, parametre olarak hata, hatanın ve çıkışın bir önceki değerlerini içeren, üç girişli dinamik bir ağ yapısı ile mümkün olmuştur. YSA-KGD ve YSA-AK ağlarının eğitilmesinde, klasik kontrolcüler (PI ve PR) içeren NKK evirici simülasyonundan (Şekil 2) alınan veriler kullanılmıştır. 210V DA bara besleme gerilimi ve 10 ohm dengeli rezistif yük durumunda, evirici referans akımının 7, 8 ve 9 amper değerleri için çalıştırılan benzetimlerden kontrolcülerin giriş ve çıkış verileri transient ve kararlı hal durumlarını içerecek şekilde kaydedilmiştir. Benzetimden elde edilen veriler eğitim aşamasında kullanılmadan önce herhangi bir ön işleme tabi tutulmamıştır. Kaydedilen YSA-KGD eğitim veri seti 2x1788 adet giriş ve 1x1788 adet çıkış verisinden YSA-AK eğitim veri seti ise 3x1755 adet giriş ve 1x1755 adet çıkış verisinden oluşmaktadır. Her iki ağın eğitimi birbirinden bağımsız yapılmıştır. Eğitim verileri, %70'i eğitim, %15'i onaylama ve kalan %15 ise test verileri olacak şekilde ayrılmıştır. Ağların eğitimi Matlab ortamında yapılmıştır. Kontrolcüler için eğitimler Levenberg-Marquart geri yayılım algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Eğitimler ile gizli katmandaki nöron sayısını azaltarak performanstan ödün vermeden en az sayıda nöron ile çalışacak şekilde ağ yapıları elde edilmiştir. Eğitim sonunda elde edilen minimum nörona sahip her iki YSA tabanlı kontrolcülerde de, gizli katmanda bir adet ve çıkış katmanında bir adet nöron bulundurmaktadır. YSA tabanlı kontrolcülerde, gizli katmanlarda tanjant-sigmoid, çıkış katmanlarında ise lineer aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Eğitim sonuçlarının analiz edilmesinde Mean Square Error (MSE) ve Regression (R) değerleri dikkate alınmıştır. MSE geri-yayılım algoritmasında kullanılan ve çıktılar ve hedef çıktılar arasındaki ortalama kare farkını gösteren performans indeksidir. R ise yine çıktılar ve hedef çıktılar arasındaki korelasyonu ölçer (Hagan vd. 2014). YSA-KGD ve YSA-AK için eğitim performansları sırasıyla, MSE=2.25×10^{-6}, R=0.99988 ve MSE=0.00286, R=0.99737'dir. Bu değerler önerilen YSA'ların oldukça başarılı şekilde eğitildiğini göstermektedir.

4. Klasik ve YSA Tabanlı Kontrolcülerin Performanslarının Değerlendirilmesi

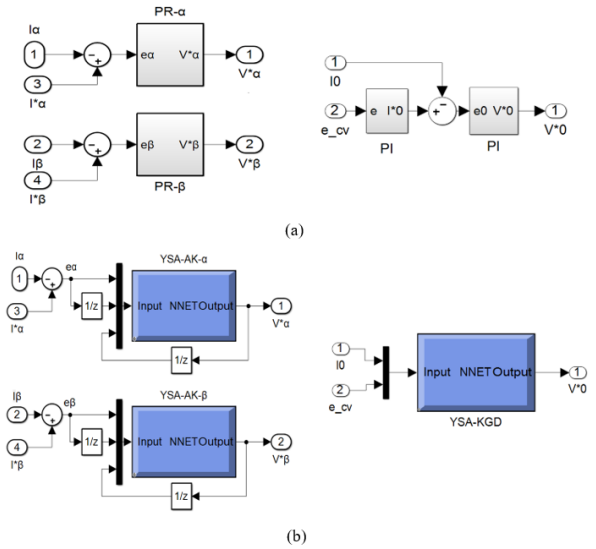
Bu bölümde, şebeke bağlantılı FV evirici sistemi için, önceki bölümlerde detayları sunulan klasik ve YSA tabanlı iki farklı kontrol sisteminin performansları incelenmiştir. Bu amaçla, öncelikle üç fazlı üç seviyeli NNK FV evirici sistemi MATLAB/Simulink kullanılarak benzetimi yapılmıştır ve gerçekleştirilen benzetime ait ekran görüntüsü Şekil 6'da verilmiştir. Burada bulunan "Kontrol Sistemi" isimli bloğa ait alt bloklar Şekil 7'de görülmektedir. Şekil 7'de gösterilen Akım Kontrolcüsü ve Kapasitör Gerilim Dengeleyicisi bloklarının iç yapısı klasik metot için Şekil 8(a) ile YSA tabanlı metot için ise Şekil 8(b) ile verilmiştir. Benzetimde, güç sistemi için örnekleme zamanı olarak 10 µs değeri kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, MGNT algoritması için örnekleme zamanı 1ms, PI, PR ve YSA kontrolcüler için örnekleme zamanı ise 0.1ms olarak belirlenmiştir. DGM anahtarlama sinyalinin taşıyıcı frekansı 20kHz'dir. Benzetimde kullanılan devre parametreleri Çizelge 1'de görülebilmektedir.



Şekil 6. Üç fazlı şebeke bağlantılı NNK FV evirici MATLAB benzetimi



Şekil 7. Kontrol Sistemi alt blokları

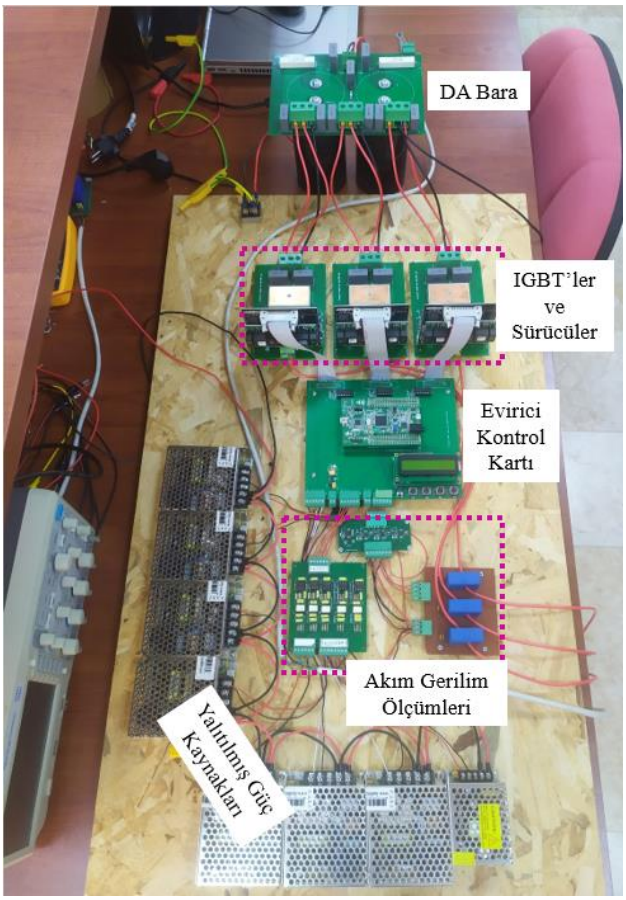


Şekil 8. Akım Kontrolcü ve Kapasitör Gerilim Dengeleyici alt blokları (a) Klasik kontrolcüler, (b) YSA tabanlı kontrolcüler kullanıldığı durumlarda

Çizelge 1. NNK FV evirici devre parametreleri

Devre Parametreleri	Değer	Birim
Seri Bağlı Paneller	23	--
Panel-Vmgn	30.51	V
Panel-Imgn	8.36	A
FV Kaynak Gücü	5866	W
DA Bara Kondansatörleri	4700	µF
Filtre Bobinleri	7.7	mH
Şebeke Gerilimi	220	Vrms
Şebeke Frekansı	50	Hz

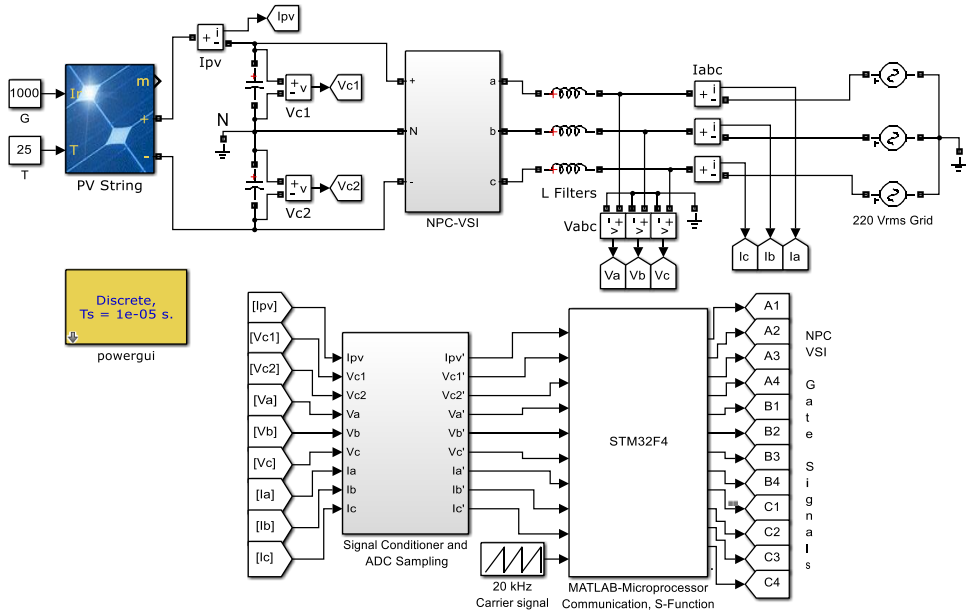
Deneysel çalışmalarda kullanılmak için tasarlanan 9kVA'lik üç faz NNK evirici devresinin fotoğrafı Şekil 9'da verilmiştir. Tasarlanan kontrol kartında; kontrol yazılımları, MikroC Pro for ARM derleyicisi kullanılarak hazırlanmış ve STM32F407 mikrodenetleyicisi üzerinde çalıştırılmıştır. MikroC derleyicisi programlama kolaylığı nedeni ile tercih edilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 5 ile verilen kontrol algoritmaları C dilinde kodlanmıştır. Hazırlanan evirici kodu devre üzerinde sensörlerden gelen verileri analog dijital çevirici vasıtasıyla okumakta ve kontrol algoritmalarından geçirerek IGBT'ler için anahtarlama sinyallerini üretmektedir. Yazılım ayrıca LCD ekran ve veri haberleşmesi için UART seri haberleşme rutinlerini de içermektedir.



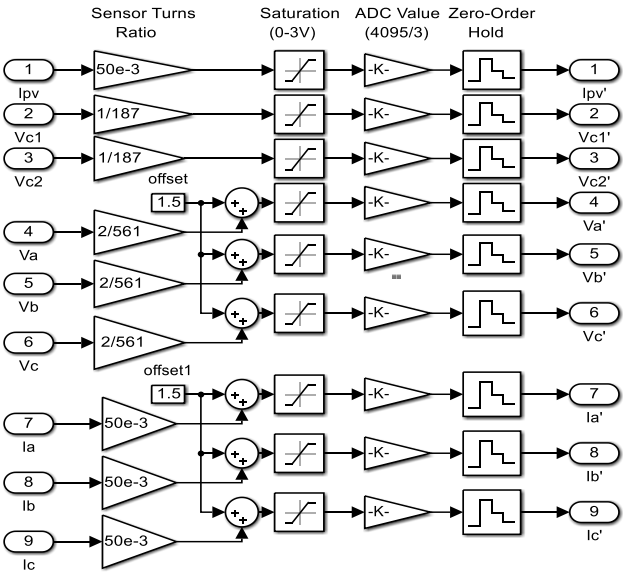
Şekil 9. Tasarlanan NPC evirici deneysel sisteminin fotoğrafı

Bunun dışında evirici devresinin güç katında SK50MLO066 IGBT modülleri kullanılmıştır. Akım ölçümleri LA100P hall etkili akım sensörleri ile yapılmıştır. Gerilim ölçümleri ise gerilim bölücü direnç devresi ve izolasyon için HCPL7840 optik amplifikatör entegresi ile gerçekleştirilmiştir. Eviricinin DA bara besleme gerilimi, şebeke üzerinden

varyak ve 1 faz tam dalga doğrultucu ile elde edilmiştir. FV evirici sistem için hazırlanan yazılım, uygulama safhası öncesinde, güvenli bir şekilde test edilebilmesi için MATLAB/Simulink ve Evirici Kontrol Kartı arasında veri haberleşmesini esas alan bir ortak çalışma benzetimi hazırlanmıştır (Yarıkkaya ve Vardar 2020, Yağan ve Vardar 2021). MATLAB/Simulink ile ortak çalışmayı gerçekleştiren benzetim yapısı Şekil 10'da verilmiştir. Ortak çalışma simülasyonu hazırlanırken, genel simülasyonda bulunan Kontrol Sistemi blokları (Şekil 7) çıkarılarak yerine haberleşme amaçlı bir adet S-function bloğu eklemiştir. Bu blok, seri haberleşme protokolünü kullanarak Simulink ile kontrol kartı arasındaki veri alışverişini gerçekleştirmektedir. FV evirici sisteminin güç katı MATLAB ortamında bulunurken, tüm kontrol yazılımları prototip evirici kartı içerisine programlanmıştır. Simülasyonda güç katından alınan akım ve gerilim bilgileri kontrol kartına gönderilmektedir.

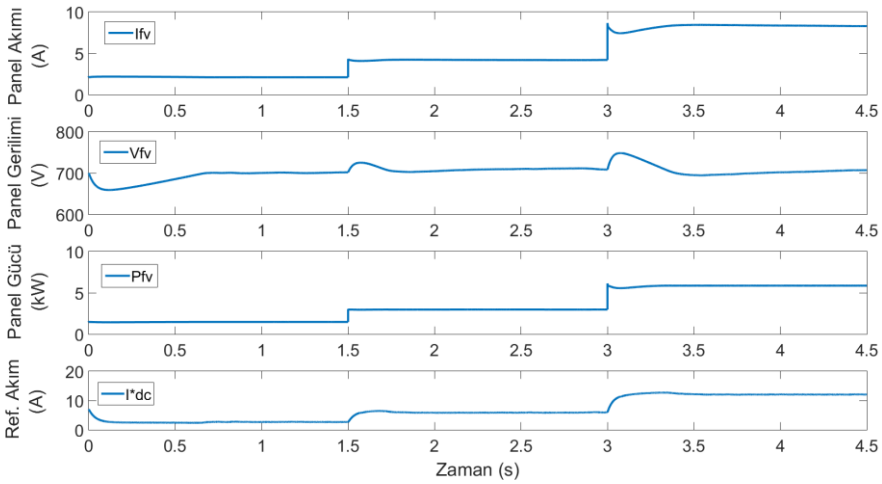


Şekil 10. Üç fazlı NNK FV evirici ortak çalışma benzetimi (Yağan ve Vardar 2021)

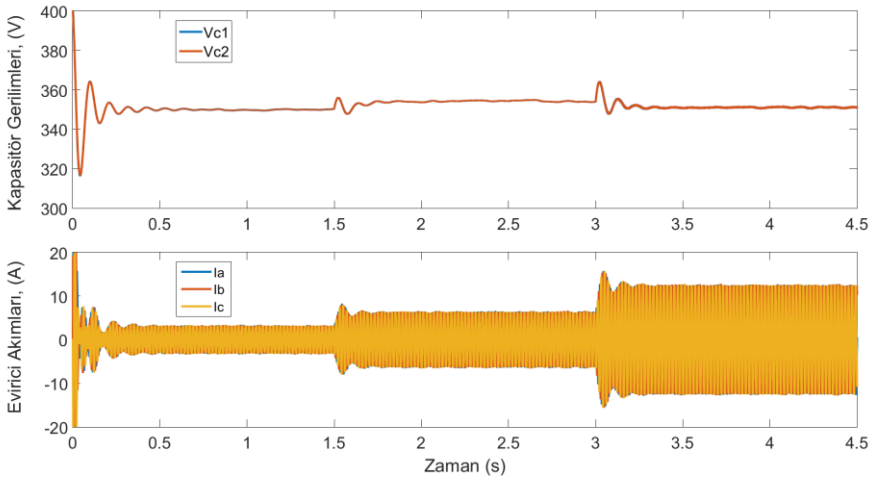


Şekil 11. Sinyal koşullandırıcı ve ADC örnekleyici bloğu (Yağan ve Vardar 2021)

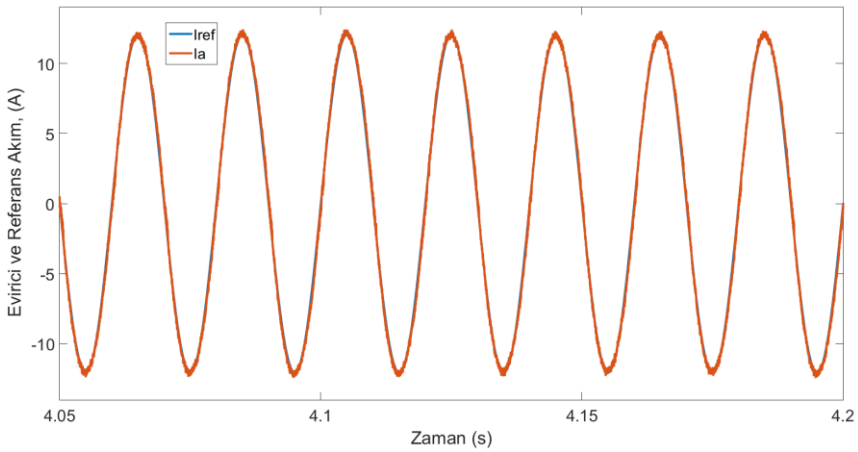
FV evirici kontrol yazılımı bu bilgileri analog-dijital dönüştürücü (ADC) yerine benzetimden alarak kontrol algoritmalarını işletir ve sonucunda oluşan IGBT anahtarlama bilgileri simülasyona yollanır. Bu şekilde, güç katını bağlamadan önce prototip kart ve gerçekleştirilen yazılımın doğruluğu test edilerek olası hataların önüne geçilmiştir. Ortak çalışma simülasyonu çalıştırıldığında, her bir simülasyon zaman adımında: Güç sistemindeki FV kaynak akımı, DA bara kapasitörleri gerilimleri, şebeke gerilimleri ve şebeke akımları olmak üzere 9 adet sistem bilgisi simülasyondan elde edilerek kontrol kartına iletilmektedir. Fakat, gerçeğe yakın sonuçlar alabilmek için, bu 9 veri kontrol kartına iletilmeden önce sanki gerçek sistemdeki gibi sensörlerden alınıp evirici üzerindeki sinyal şartlandırıcı devresinden geçip, işlemcinin analog-dijital dönüştürücüsünün kabul ettiği 0-3V aralığında bir bilgiye dönüştürülür. Sinyal şartlandırıcı ve ADC örnekleyici bloğu olarak isimlendirilen bu işlem Şekil 11'de verilmiştir. ADC örnekleme işlemini temsilen Zero-Order Hold kullanılmıştır. Burada, sensör dönüştürme oranları ve ADC örnekleme aralıkları gerçek sistemdeki değerlere uygun olarak belirlenmiştir (Yarıkkaya ve Vardar 2020, Yağan ve Vardar 2021). Ortak çalışma benzetim sistemi kullanılarak klasik kontrolcüler ve YSA kontrolcülerin değişen çevresel koşullar altında akım kontrolü ve kapasitör gerilimleri dengeleme performansları karşılaştırılmıştır. Güneş ışınım şiddeti (G), t=1.5 sn'de 250 W/m^2'den 500 W/m^2'e, sonrasında t=3sn'de 500 W/m^2'den 1000 W/m^2'ye adım değişimi olacak şeklinde değiştirilmiştir.



Şekil 12. Değişen Işınım Şiddeti altında FV dizi akımı (Ifv), gerilimi (Vfv), gücü (Pfv) ve MGNT referans akımı (I*dc)

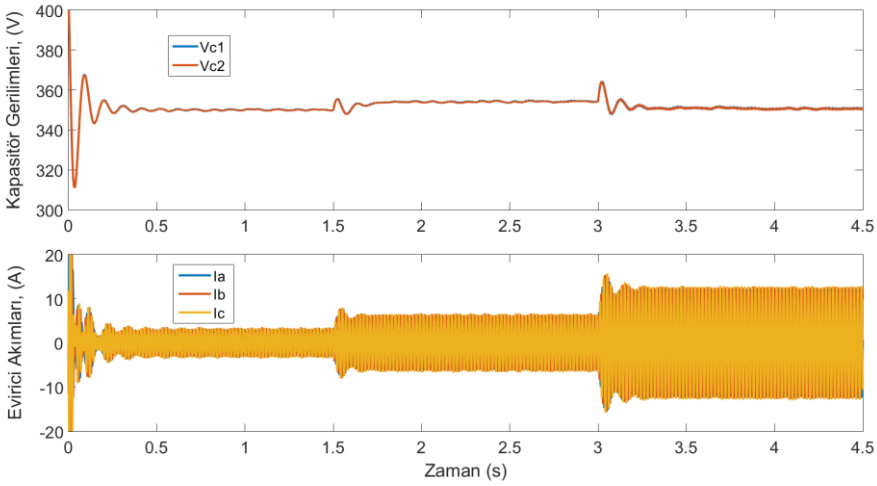


(a)

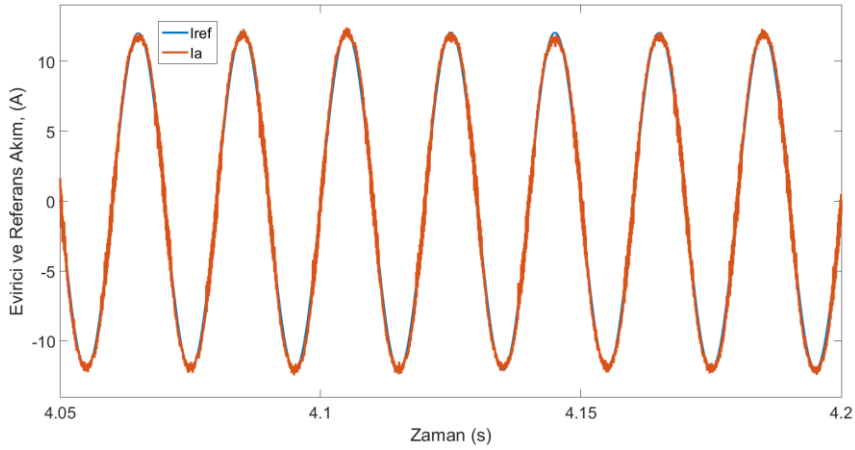


(b)

Şekil 13. Klasik kontrolcülerin kullanıldığı durumda; (a) Evirici DC bara Kapasitör gerilimleri ve Evirici akımları, (b) Evirici akımının bir fazı ve referans akım



(a)



(b)

Şekil 14. YSA tabanlı kontrolcülerin kullanıldığı durumda; (a) Evirici DC bara Kapasitör gerilimleri ve Evirici akımları, (b) Evirici akımının bir fazı ve referans akım

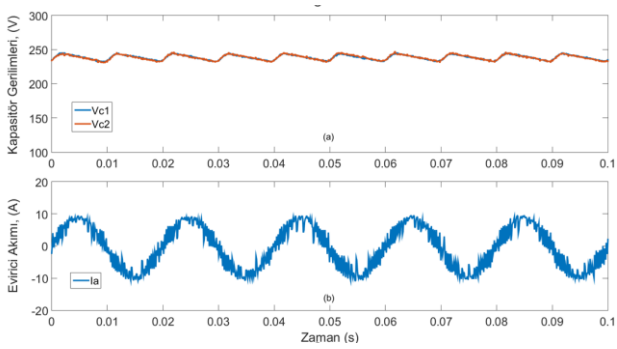
Bu çevresel koşullarda MGNT algoritması tarafından belirlenen evirici giriş gerilimi, akımı ve gücü ve akım kontrolü için DA referans akımı bilgileri Şekil 12'de verilmiştir. MGNT yöntemi iki kontrol sisteminde de aynı şekilde kullanılmış ve programlanmıştır. Şekil 12'de ışınım şiddeti arttığında FV kaynağın akımının (I_{fv}) ve gücünün (P_{fv}) de doğru orantılı olarak arttığı ve dolayısıyla şebekeye aktarılacak akımın referans değerinin (I^*_{dc}) de arttığı görülmektedir.

Klasik kontrolcüler ve YSA kontrolcüler kullanıldığında elde edilen benzetim sonuçları sırasıyla Şekil 13'te ve Şekil 14'te gösterilmiştir. Şekil 13 ve Şekil 14 incelendiğinde her iki kontrol sistemi için de sonuçların benzer olduğu ve metotların birbirlerine yakın performans gösterdiği fark edilmektedir. Şekil 13 (a) ve Şekil 14 (a)'dan ışınım şiddeti arttığında şebekeye aktarılan akımın da doğru orantılı olarak arttığı, kapasitör gerilimlerinin ise sürekli olarak dengeli kaldığı görülmektedir. Şekil 13 (b) ve Şekil 14 (b) ile ise sırasıyla PR-AK'nün ve YSA-AK'nün referans akımları takip etme performansları sunulmuştur. Bu iki grafiğe göre, her iki akım kontrolcü ile de sinüzoidal referans akımın doğru şekilde takip edilebildiği görülmektedir. Şekil 13 (b) deki Ia akımının THB değeri %3 ve Şekil 14 (b) deki Ia akımının THB değeri %5.7 dir. Sonuç olarak, değişen ışınım şiddeti altında her iki kontrol sistemi ile de FV kaynaktan şebekeye güç aktarımı maksimum güç noktasında ve düşük akım THB değerleri ile gerçekleştirilmiştir. FV kaynağın maruz kaldığı bir başka çevresel koşul olan, ortam sıcaklığında meydana gelen değişikliğe karşı da kontrolcülerin performansları incelenmiştir. Değişen sıcaklık altında yapılan testlerde de aynı kontrol başarısının sağlandığı görülmüştür ve tasarlanan YSA kontrolcülerin klasik kontrolcüler gibi iyi bir kontrol performansına sahip olduğu görülmüştür.

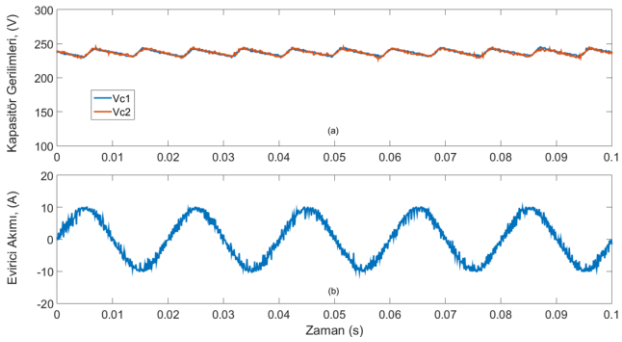
Uygulama aşamasında Şekil 9'da verilen deneysel sistem kullanılmıştır fakat burada FV kaynak ile değil şebekeden doğrultulan DA gerilim ile evirici beslenmiştir. Evirici çıkışında şebeke yerine RL yük kullanılmıştır. Böylelikle kapasitör dengeleyici ve akım kontrolcülerin performansı diğer koşullar yok edilerek incelenmiştir ve çalışabilirliği gösterilmiştir. Bu deneysel durum için; DA bara gerilimi 475 V, faz başına yük olarak 3mH şok bobini ve 22.5 ohm

rezistif yük ve referans akımı değeri ise 10 A olarak kullanılmıştır. THB ölçümleri FLUKE 43B güç kalitesi analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Klasik ve YSA tabanlı kontrolcülerin kullanıldığı deney sonuçları sırasıyla Şekil 15 ve Şekil 16 ile verilmiştir.

Şekil 15(a)'da ve Şekil 16 (a)'da sırasıyla Klasik ve YSA tabanlı kontrolcüler kullanıldığında deneysel sistemden alınan kapasitör gerilimleri sunulmuştur. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, her iki kontrolcünün de kapasitör gerilimlerini dengede tutabildiği görülmektedir.



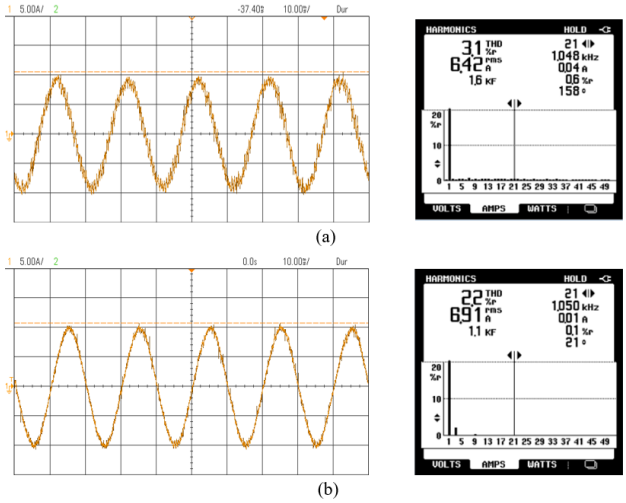
Şekil 15. Klasik kontrolcüler için deneysel sonuçlar: a) Kapasitör Gerilimi, b) Evirici Akımı



Şekil 16. YSA tabanlı kontrolcüler için deneysel sonuçlar: a) Kapasitör Gerilimi, b) Evirici Akımı

Klasik ve YSA tabanlı kontrolcüler kullanıldığı durum için deneysel sistemden alınan bir faz için evirici akımları sırasıyla Şekil 15 (b)'de ve Şekil 16 (b)'de verilmiştir. Evirici akımlarının THB değerleri, Klasik kontrolcüde %9.4 iken, YSA tabanlı kontrolcüde %4 olarak ölçülmüştür. Şekilden de görülebildiği gibi YSA tabanlı kontrol sistemi kullanıldığında evirici çıkış akımı dalga şekilleri sinüzoidale daha yakındır ve böylelikle akımın THB değerleri de daha düşük olmaktadır.

Yükte kullanılan endüktans değeri 3mH'den 8mH değerine artırıldığında kararlı haldeki evirici akımlarının osiloskop görüntüsü ve THB değerinin ölçü aleti ile elde edilen değeri Şekil 17 'de sunulmuştur. Bu durumda THB değeri, klasik kontrolcüler kullanıldığında %3.1, YSA kontrolcülerin için ise %2.2 olarak ölçülmüştür.



Şekil 17. 8mH yük endüktansı kullanımı durumunda kararlı hal evirici akımı ve THB değeri için deneysel sonuçlar: a) Klasik kontrolcüler ile, b) YSA kontrolcüler ile

Bu sonuçlar, YSA tabanlı kontrolcülerin deneysel ortamdaki kaçınılmaz parametre değişimlerinden/ farklılıklarından ve gürültülerden çok daha az etkilenerek klasik kontrolcülerden daha iyi performans sağladığını göstermiştir. Ortak çalışma simülasyonu ve deneysel çalışma testlerinden elde edilen sonuçlara göre önerilen YSA-KGD ve YSA-AK, hem referans akımını takip etmede hem de DA bara kapasitörlerinin dengelenmesinde oldukça iyi performanslar sergilemiştir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, üç fazlı, üç seviyeli, üç bacaklı ve dört bağlantı yollu NNK şebeke bağlantılı bir FV evirici, için bir YSA akım kontrolcüsü (YSA-AK) ve bir YSA kapasitör gerilim dengeleyicisi (YSA-KGD) tasarlanmıştır. Geliştirilen YSA-AK, dinamik YSA yapısındadır ve PR kontrolcü tabanlıdır. YSA-KGD ise statik YSA yapısındadır ve PI kontrolcü tabanlıdır. YSA-AK ve YSA-KGD'den oluşturulan kontrol sisteminin değişen çevresel koşullar (güneş ışınım şiddeti ve ortam sıcaklığı) altındaki performansları akım kontrolcüsü olarak PR kontrolcü ve kapasitör gerilim dengeleyicisi olarak PI kontrolcünün kullanıldığı klasik kontrol sistemi ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma hem benzetim ortamında hem de deneysel ortamda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaya geçmeden önce, evirici için hazırlanan yazılım, MATLAB ve prototip kontrol kartı ortak çalıştırılarak test edilmiştir. Ortak çalışma benzetim sonuçlarından her iki kontrol sisteminin performanslarının oldukça benzer olduğu ve yaklaşık %5 THB değerinde şebeke akımları sağlayabildikleri görülmüştür. Deneysel sonuçlardan ise ANN kontrolcülerin, PR ve PI kontrolcülere göre fiziksel ortamın getirdiği gürültülerden ve parametre farklılıklarından daha az etkilendiğinden dolayı daha iyi performansa sahip

olduğu tespit edilmiştir. YSA tabanlı kontrol sistemi kullanıldığında, evirici çıkış akımı dalga şekilleri sinüzoidal forma daha yakındır ve THB değerleri de daha düşüktür. Ayrıca, bu çalışmada tasarlanan PR tabanlı YSA-AK, literatürde rastlanan diğer YSA tabanlı akım kontrolcüleri ile karşılaştırıldığında; çok daha az karmaşık bir ağ yapısına sahip olduğu ve çok daha az işlem yükü gerektirdiği görülmüştür. Sonuç olarak, geliştirilen YSA tabanlı kontrol sistemi ile mikroişlemcili devrelerde kolaylıkla uygulanabilir, hızlı ve gürültü performansı iyi bir akım kontrolcüsü ve kapasitör gerilim dengeleyicisi elde edilmiştir. Gelecek çalışmalarda, tasarlanan YSA kontrolcüleri NNK eviriciler için öngörü özelliği kazanacak şekilde eğitimlerinin gerçekleştirilmesi önerilebilir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışma, Doç.Dr. Kadir VARDAR danışmanlığında Yunus Emre YAĞAN tarafından hazırlanan 26/4/2023 tarihinde tamamlanan "Üç fazlı nötr noktası kenetli eviriciler için ysa tabanlı kontrolcüler tasarlanması ve uygulanması" başlıklı doktora tezi (Tez No: 803115) kapsamında gerçekleştirilmiş ve bu tezden türetilmiştir.

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Simülasyon Çalışması, Deney, Yazma – orijinal taslak

Yazar 2: Kavramsal Tasarım, Tez Danışmanı, Araştırma, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Yazma – orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

6. Kaynaklar

Babaie, M., Sebaaly, F., Sharifzadeh, M., Kanaan, H.Y., and Al-Haddad, K., 2019. *Design of an artificial neural network control based on levenberg-marquart algorithm for grid-connected packed U-cell inverter*, International Conference on Industrial Technology (ICIT), 1202-1207. https://doi.org/10.1109/ICIT.2019.8755098

Babaie, M., Sharifzadeh, M., and Al-Haddad, K., 2020a. *Three-phase grid-connected NPC inverter based on a robust artificial neural network controller*, IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 1-5. https://doi.org/10.1109/PESGM41954.2020.9281531

Babaie, M., Saeidi, M., Sharifzadeh, M., Hamadi, A., Al-Haddad, K., and Chandra, A., 2020b. *Hybrid ANN-linear controller for maximum PV energy harvesting in grid-tied packed E-cell inverter*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 871-875. https://doi.org/10.1109/SPEEDAM48782.2020.9161935

Babaie, M., Mehrasa, M., Sharifzadeh, M., and Al-Haddad, K., 2022. *Floating weighting factors ANN-MPC based on lyapunov stability for seven-level nodified PUC active rectifier*. IEEE Trans. Ind. Electron., 69(1),387-398. https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3050375

Bana, P. R., and Amin, M., 2023. *State-space modelling and stability analysis of ANN controller for grid-connected VSC system,* IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT), 1-6. https://doi.org/10.1109/GlobConHT56829.2023.10087412

Beşer, E., ve Beşer, E. K., 2021. Endüstriyel Amaçlı Yarım H-Köprü Modüllü Üç Fazlı Çok Seviyeli EviriciYapısı, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 579 - 585. https://doi.org/10.35414/akufemubid.702382

Bouaouaou, H., Lalili, D., and Boudjerda, N., 2022. Model predictive control and ANN-based MPPT for a multi-level grid-connected photovoltaic inverter, *Electrical Engineering*, 104(3), 1229-1246. https://doi.org/10.1007/s00202-021-01355-w

Cha, H., Vu, T., and Kim, J., 2009. *Design and control of proportional-resonant controller based photovoltaic power conditioning system,* IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2198-2205. https://doi.org/10.1109/ECCE.2009.5316374

Chatterjee, A., and Mohanty, K.B., 2018. Current control strategies for single phase grid integrated inverters for photovoltaic applications-a review, *Renewable Sustainable Energy Rev.,* 92, 554–569. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.115

Chenai, S., and Benchouia, M., 2014. *Three-phase Three-level (NPC) shunt active power filter performances based on PWM and ANN's controllers for harmonic current compensation*, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 6(3),532-552. https://doi.org/10.15676/ijeei.2014.6.3.7

Crescimbini, F., Lidozzi, A., Rovelli, E., Salvadore, A., and Solero, L., 2012. *A 30kw transformerless PV NPC inverter*, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), DS2c–17. https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2012.6397301

Dong, W., Li, S., Fu, X., Li, Z., Fairbank, M., and Gao, Y., 2021. Control of a buck DC/DC converter using approximate dynamic programming and artificial neural networks, *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.,* 68(4), 1760-1768. https://doi.org/10.1109/TCSI.2021.3053468

Faraji, F., Hajirayat, A., Birjandi, A.A.M., and Al-Haddad, K., 2017. Single stage single-phase three-level neutral-point-clamped transformerless grid-connected

photovoltaic inverters: Topology review, *Renewable Sustainable Energy Rev.,* 80, 197–214, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.181

Goh, H. H., Dong, H., Liang, X., Zhang, D., Dai, W., Song, S., Kurniawan, T.A., and Goh, K. C., 2024. Enhancing performance of shipboard photovoltaic grid-connected inverter through CRNN-LM-BP control optimized by particle swarm optimization of LCL parameters, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 57, 101816. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101816

Hagan, M.T., Demuth, H.B., Beale, M.H., and Jesus, O.D., 2014. Neural network desing. 2nd Edition, eBook.

Hlaili, M., Mechergui, H., Gonc¸alves, H., Exposto, B., and Afonso, J.L., 2016. *Single phase NPC inverter controller with integrated MPPT for PV grid connection*, 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 598–605. https://doi.org/10.1109/STA.2016.7952025

İbrahim, S., ve Altın, N., 2009. Güneş pili ile beslenen şebeke etkileşimli eviriciler—genel bir bakış, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(3).

Kinga, S., Megahed, T. F., Kanaya, H., and Mansour, D. E. A., 2024. Enhancing robustness and control performance of voltage source inverters using Kalman filter adaptive observer and ANN-based model predictive controller, *Neural Computing and Applications*, 36(33), 21073-21090. https://doi.org/10.1007/s00521-024-10243-w

Latran, M.B., and Teke, A., 2015. Investigation of multilevel multifunctional grid connected inverter topologies and control strategies used in photovoltaic systems, *Renewable Sustainable Energy Rev.,* 42, 361–376. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.030

Li, S., Fairbank, M., Johnson, C., Wunsch, D.C., Alonso, E., and Proao, J.L., 2014. Artificial neural networks for control of a grid-connected rectifier/inverter under disturbance, dynamic and power converter switching conditions, *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.,* 25(4), 738-750. https://doi.org/10.1109/TNNLS.2013.2280906

Li, S., Sun, Y., Ramezani, M., and Xiao, Y., 2019. Artificial neural networks for volt/VAR control of DER inverters at the grid edge. *IEEE Trans. Smart Grid*, 10(5), 5564-5573. https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2887080

Lim, S.K., Kim, J.H., and Nam, K, 1999. *A DC-link voltage balancing algorithm for 3-level converter using the zero sequence current*, 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2, 1083-1088. https://doi.org/10.1109/PESC.1999.785646

Massaro, A., 2024. ANNs Predicting Noisy Signals in Electronic Circuits: A Model Predicting the Signal Trend in Amplification Systems, *AI*, 5(2), 533-549. https://doi.org/10.3390/ai5020027

Mehrasa, M., Babaie, M., Sharifzadeh, M., and Al-Haddad, K., 2021. An input–output feedback linearization control method synthesized by artificial neural network for grid-tied packed E-Cell inverter, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 57(3), 3131-3142. https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3049456

Mohamed, I.S., Rovetta, S., Do, T.D., Dragicević, T., and Diab, A.A.Z., 2019. A neural-network-based model predictive control of three-phase inverter with an output LC filter. *IEEE Access*, 7, 124737-124749. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938220

Nazeri, A.A., Zacharias, P., Ibanez, F.M., and Somkun, S., 2019. *Design of proportional-resonant controller with zero steady-state error for a single-phase grid-connected voltage source inverter with an LCL output filter*, IEEE Milan PowerTech, 1-6. https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810554

Özdemir, Ş., 2013. Yenilenebilir enerji kaynakları için tek aşamalı MPPT denetimli çok seviyeli eviricinin gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara.

Panigrahi, R., Mishra, S.K., and Srivastava, S., 2018. *Grid integration of small-scale photovoltaic systems-a review*, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 1–8. https://doi.org/10.1109/IAS.2018.8544503

Parvez, M., Elias, M.F.M., Rahim, N.A., Blaabjerg, F., Abbott, D., and Al-Sarawi, S.F., 2020. Comparative study of discrete PI and PR controls for single-phase UPS inverter*, IEEE Access*, 8, 45584-45595. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964603

Patel, H., and Agarwal, V., 2008. MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics, *IEEE Trans. Energy Convers.,* 23(1), 302–310. https://doi.org/10.1109/TEC.2007.914308

Sun, Y., Li, S., Lin, B., Fu, X., Ramezani, M., and Jaithwa, I., 2017. Artificial neural network for control and grid integration of residential solar photovoltaic systems, *IEEE Trans. Sustainable Energy* ,8(4), 1484-1495. https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2691669

Sun, Y., Li, S., Ramezani, M., Balasubramanian, B., Jin, B., and Gao, Y., 2019. DSP implementation of a neural network vector controller for IPM motor drives, *Energies*, 12(13), 2558. https://doi.org/10.3390/en12132558

Sujatha, B.G., and Anitha, G.S., 2018. Enhancement of PQ in grid connected PV system using hybrid technique, *Ain Shams Eng. J.*, 9(4), 869-881. https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.04.007

Tran, H.N, Le, K.M, and Jeon, J.W., 2019. Adaptive current controller based on neural network and double phase compensator for a stepper motor, *IEEE Trans. Power Electron*., 34(8), 8092-8103. https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2878928

Teodorescu, R., Blaabjerg, F., Liserre, M., and Loh, P.C., 2006. Proportional resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters, *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 153(5), 750-762. https://doi.org/10.1049/ip-epa:20060008

Venkatesan, A.K., Subramaniam, U., Bhaskar, M.S., Gnana Swathika, O.V., Padmanaban, S., Almakhles, D.J., and Mitolo, M., 2021. Small-signal stability analysis for microgrids under uncertainty using MALANN control technique, *IEEE Systems Journal*, 15(3), 3797-3807. https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3020509

Vinnakoti, S., and Kota, V.R., 2018. Implementation of artificial neural network based controller for a five-level converter based UPQC, *Alexandria Eng. J.,* 57(3), 1475-1488. https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.03.027

Villalva, M.G., and Ruppert, E.F., 2004. Current controller with artificial neural network for 3-phase 4-wire active filter, *35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551*) 2, 993-998. https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355556

Yacine, A.A., Noureddine, A.A., Aissa, K., and Brahim, M., 2017. Design and implementation of three-level inverter for grid-tied PV systems, *2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/ICEE-B.2017.8191993

Yağan, Y.E., Vardar, K., and Ebeoğlu, M.A., 2018a. Modeling and simulation of PV systems, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE),* 13(2), 1–11.

Yağan, Y.E., Vardar, K., and Ebeoğlu, M.A., 2018b. Investigation of MPPT methods used in PV systems, *Journal of Electrical and Electronics Engineering, 13(2),* 84-95.

Yağan, Y.E., and Vardar K., 2021. Prototype development and verification for grid connected three-phase three-level NPC PV inverter, *2021 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO2021)*, 500-504. https://doi.org/10.23919/ELECO54474.2021.9677753

Yarıkkaya, S., and Vardar, K., 2020. Rapid prototype development of single-phase grid connected PV inverter using STM32F4 and MATLAB, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi,* 18, 213–223. https://doi.org/10.31590/ejosat.680586

Zeb, K., Khan, I., Uddin, W., Khan, M.A., Sathishkumar, P., Busarello, T.D.C., Ahmad, I., and Kim, H., 2018a. A review on recent advances and future trends of transformerless inverter structures for single-phase grid connected photovoltaic systems, *Energies*, 11(8), 1968. https://doi.org/10.3390/en11081968

Zeb, K., Uddi,n W., Khan, M.A., Ali, Z., Ali, M.U., Christofides, N., and Kim, H., 2018b. A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system, *Renewable Sustainable Energy Rev*., 94, 1120–1141. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.053

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1539113
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035401 (558-564)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035401 (558-564)

Kızartma İşlemi Sırasında Yağlarla Gıdalara Geçen Butillenmiş Hidroksianisol (BHA) ve Butillenmiş Hidroksitoluen (BHT) Maddelerinin Sitotoksik Etkilerinin İncelenmesi

***Makale Bilgisi / Article Info**
Alındı/Received: 29.08.2024
Kabul/Accepted: 17.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Investigation of the Cytotoxic Effects of Butylated Hydroxyanisole (BHA) and Butylated Hydroxytoluene (BHT) Transferred to Foods Through Oils During Frying

Büşra BAYKAN[1], Harika ATMACA[2], Tuncay YILMAZ[2*]

[1] *Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye*
[2] *Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Manisa, Türkiye*

Özet

Bu çalışmada, gıda katkı maddeleri olan Butillenmiş Hidroksianisol (BHA) ve Butillenmiş Hidroksitoluen (BHT) maddelerinin derin yağda kızartma sonrasında ortaya çıkan sitotoksik etkileri incelenmiştir. Koruyucu özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan bu maddeler, kızartma sürecinde dönüşüme uğrayarak insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Araştırmada, BHA ve BHT'nin kızartma sonrası 72 saat içinde belirlenen IC50 dozları incelenmiştir; BHA için 8.75 µg/mL ve BHT için önemli derecede yüksek olan 1761.159 µg/mL olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, bu katkı maddelerinin kızartılmış gıdalarda kullanımının güvenliği konusunda ciddi endişeler doğurmaktadır. Çalışma, bu maddelerin gıda endüstrisinde yeniden değerlendirilmesi gerektiğine ve tüketici sağlığı üzerindeki potansiyel risklerine dikkat çekmektedir. Ayrıca, bu katkı maddelerini içeren gıdaların tüketimi konusunda daha sıkı düzenleyici yönergeler ve tüketici farkındalığının artırılmasının önemini vurgulamaktadır. Yağ ve patates örnekleri üzerinde yapılan fizikokimyasal analizler ve hücre kültürü çalışmaları, farklı dozlarda belirgin sitotoksik etkiler gözlenmiştir. Özellikle HEK-273 hücreleri üzerinde yapılan incelemelerde, bu katkı maddelerinin belirli porsiyonlarda tüketildiğinde zararlı etkiler yaratabileceği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, daha güvenli kızartma yöntemleri ve alternatif katkı maddeleri geliştirilmesi yönündeki araştırmaların önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Sitotoksisite, Kızartılmış gıdalar, Gıda katkı maddeleri. İnsan sağlığı, Hücre kültürü, Gıda güvenliği*

Abstract

This manuscript delves into the cytotoxic effects of the food additives Butylated Hydroxyanisole (BHA) and Butylated Hydroxytoluene (BHT) following deep frying. Widely used for their preservative qualities, these additives transform frying that may have significant health implications. The study investigates the IC50 doses of BHA and BHT after 72 hours post-frying, with results showing a dose of 8.75 µg/mL for BHA and a notably high 1761.159 µg/mL for BHT. These findings raise serious concerns about the safety of these additives in fried foods, especially considering the widespread consumption of such foods. The research emphasizes the need for a reevaluation of these additives' use in the food industry and highlights the potential risks to public health. Additionally, the study points to the necessity for stricter regulatory guidelines and increased consumer awareness regarding the consumption of foods containing these additives. The physical and chemical analyses of oils and potatoes after frying, along with cell culture studies, revealed significant cytotoxic effects at various doses over 24, 48, and 72 hours, particularly on HEK-273 cells. These results underscore the importance of further research to develop safer frying practices and alternatives to these additives, ultimately enhancing food safety and public health standards.

Keywords: *Cytotoxicity, Deep-fried foods, Food additives, Human health, Cell culture, Food safety*

1. Giriş

Sitotoksik terimi, hücre ölümüne neden olan anlamına gelirken, sitotoksisite, incelenen maddelerin konsantrasyonuna ve maruziyet süresine bağlı olarak hücrelere zarar vermesi olgusunu ifade eder. Hücreler, bu sitotoksik maddelere maruz kaldığında nekroz, otofaji ve apoptoz gibi olaylar sonucu ölebilir veya proliferasyon özelliklerini kaybedebilirler (Yedier 2021). Bazı maddelerin sitotoksik etkisini belirlemek amacıyla çeşitli testler uygulanmaktadır. Bu testlerden biri, MTT metodudur. MTT (3-(4,5-dimetildiazol-2-il)-2,5 difenil tetrazolyum bromür) metodunda, canlı hücrelerdeki mitokondriyal redüktaz enzimi, sarı renkli MTT çözeltisini suda çözünmeyen mor renkli formazan kristallerine

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tuncay Yılmaz* *e-posta/e-mail: tuncay.yilmaz@cbu.edu.tr*

dönüştürür. Oluşan bu kristaller DMSO ile çözülerek, spektrofotometrik olarak ölçülür (Çelik 2013, Yedier 2021).

Literatüre göre, yağda doğal olarak bulunan ya da sonradan eklenen antioksidanlar, kızartma sırasında yağın kalitesini etkiler. Ayrıca, tokoferoller, C vitamini ve B grubu vitaminlerde kızartma işlemi sırasında kayıplar yaşanmaktadır. Doğal antioksidanlardan tokoferoller ve sentetik antioksidanlardan BHA (bütillenmiş hidroksianisol) ve BHT (bütillenmiş hidroksitoluen), oda sıcaklığında yağın oksidasyonunu yavaşlatırlar. Ancak, bu gıda katkı maddelerinin sürekli tüketimi, vücutta toksik etkiler yaratabilir. Bu maddeler egzama, astım, baş ağrısı, alerjik reaksiyonlar, gastrik rahatsızlıklar, ishal, hiperaktivite ve aşırı duyarlılık gibi sorunlara neden olabilir (Briggs 1997).

Antioksidanlar, yağlara lipid oksidasyonunu ve toksik etkiler yaratabilecek istenmeyen bileşiklerin oluşumunu engellemek amacıyla eklenir. Sentetik gıda antioksidanları BHA ve BHT, nispeten düşük akut toksisiteye sahip bileşiklerdir. Ancak, bu bileşiklerin biyokimyasal ve biyolojik etkileri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır (Verhagen vd. 1991). Yapılan çalışmalarda, sentetik antioksidanların sağlık açısından riskli, kanserojen ve mutajenik özellikler taşıdığı tespit edilmiştir. Bir çalışmada, kızartmalık yağda bulunan bazı sentetik katkı maddelerinin tüketim miktarına bağlı olarak böbrek epitel hücreleri üzerindeki olası sitotoksik etkisi incelenmiş ve bu konuda literatüre katkı sağlanması hedeflenmiş ve risk tespit edilmiştir (Bandoniene vd. 2002).

BHA'nın toksikolojik etkileri, enzim aktiviteleri üzerindeki doğrudan toksisitesi, diğer kimyasalların genotoksisitesinin modülasyonu ve BHA'nın kanserojenliği şeklinde üç ana başlık altında toplanabilir. Labrador ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, düşük dozlarda BHA kullanımının Vero hücrelerinde mitokondriyal fonksiyon kaybıyla ilişkili önemli bir sitotoksik etki yaptığı belirtilmiştir (Labrador vd. 2007). BHA'nın alerjik reaksiyonlar, yağ metabolizmasında dengesizlik, deri iritasyonu, kusma ve ishale sebep olabileceği; BHA ve BHT'nin ise baş ağrısı, kızarıklık, astım gibi sağlık sorunlarını tetikleyebileceği belirlenmiştir (Sheftel 2000, Fisherman ve Cohen 1973). TBHQ'nun dermatite yol açabileceği Aalto-Korte (2000) ve BHA'nın fare deneylerinde kansere neden olabileceği de tespit edilmiştir (Weber vd. 1979).

Dassarma ve arkadaşlarının yaptığı bir araştırma, BHA ve BHT alımının CCl4 kaynaklı hepatik toksisiteye bağlı dejeneratif değişiklikleri iyileştirdiğini göstermiştir. Bu bulgular, antioksidanların gıda formülasyonlarıyla alınmasının hepatik disfonksiyonu olan hastalar için faydalı olabileceğini öne sürmektedir (Dassarma vd. 2018).

Felter ve arkadaşlarının (2021) bir makalesinde, BHA'nın kemirgenlerdeki karsinojenik etkilerinin incelendiği birçok çalışmanın değerlendirildiği ve sadece ön mide tümörlerinin BHA'nın kronik oral maruziyetine bağlı olarak geliştiği sonucuna varılmıştır. Gine domuzları üzerinde yapılan çalışmalarda ise bu tür bir lezyonun gelişmediği belirtilmiştir.

Wang ve arkadaşlarının (2019) yaptığı çalışmada, çeşitli ülkelerdeki popülasyonların idrar örneklerinde BHT'nin ana metaboliti olan BHT-COOH'un yüksek oranlarda bulunduğu ve bu bileşiğin günlük alım dozlarının, kabul edilebilir günlük alım miktarlarını aştığı belirlenmiştir. Bu maruziyetin başlıca nedenlerinin katkı maddelerini içeren diyet ve kişisel bakım ürünlerinin deriyle teması olduğu düşünülmektedir (Wang vd. 2019).

Altmann ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, BHA'nın Wistar sıçanlarında epitel hasarı ve hiperplazi gibi etkilere yol açtığı, ancak BHA'sız beslemeye geçildiğinde bu etkilerin gerilediği gözlemlenmiştir (Altmann vd. 1985).

MCF-7 hücrelerinin östrojen reseptörüne bağımlı proliferasyonu incelenerek yapılan çalışmalarda, BHA'nın östrojenik aktiviteye sahip olduğu, ancak bu etkinin 17β-estradiol'e kıyasla daha zayıf olduğu belirlenmiştir (Okubo ve Kano 2003).

Sonuç olarak, memelilerde BHA ve BHT maruziyeti sonucunda kanserojen etkiler gözlemlenmiş olsa da, bu maddelerin tek başlarına bu etkilerin ana nedeni olmadığı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, gıda katkı maddeleri olan Butillenmiş Hidroksianisol (BHA) ve Butillenmiş Hidroksitoluen (BHT) maddelerinin derin yağda kızartma işlemi sonrasında gıdalara geçişini ve bu maddelerin sitotoksik etkilerini detaylı bir şekilde incelemektir. Çalışma, kızartma sırasında bu katkı maddelerinin fizikokimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimlerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini anlamaya yönelik özgün bir katkı sunmaktadır. BHA ve BHT'nin koruyucu özellikleri nedeniyle gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanıldığı bilinmekle birlikte, bu maddelerin gıdada birikim oluşturarak toksik seviyeye ulaşabileceğine dair kaygılar bulunmaktadır.

Çalışma, BHA ve BHT'nin kızartma sonrası örneklerdeki konsantrasyonlarını belirlemiş ve HEK-273 hücreleri üzerinde gerçekleştirilen sitotoksisite testleri ile bu

maddelerin insan hücreleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Özellikle, BHA ve BHT'nin IC50 dozlarının belirlenmesi, bu katkı maddelerinin potansiyel zararlarını ortaya koymak açısından önem taşımaktadır. Elde edilen sonuçlar, bu maddelerin kullanımının gıda güvenliği perspektifinden yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, bu araştırma, daha güvenli kızartma yöntemleri ve alternatif katkı maddeleri geliştirilmesine yönelik çalışmalara ilham vermeyi amaçlamaktadır.

Bu bağlamda, çalışmanın özgünlüğü, katkı maddelerinin kızartma sürecindeki davranışlarını detaylı bir şekilde inceleyerek hem fizikokimyasal analiz hem de hücresel düzeyde sitotoksisite değerlendirmelerini bir araya getirmesinde yatmaktadır. Elde edilen bulgular, gıda güvenliği ve tüketici sağlığı açısından önemli çıkarımlar sunarak bu alanda yapılan çalışmalara yenilikçi bir bakış açısı sağlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Patates cinsi olarak kızartmalık patates türü seçilmiş ve yerel bir marketten temin edilmiştir. Hücre kültürü ve sitotoksisite analizlerinde, sağlıklı hücreyi temsil etmesi amacıyla HEK-293 sağlıklı insan embriyonik böbrek hücresi kullanılmış olup, hücreler ATCC (Amerikan Tıp Kültür Koleksiyonu)'den temin edilmiştir. Yüksek performanslı sıvı kromatografi (HPLC) analizlerinde kullanılan metanol, Merck (Darmstadt, Almanya) firmasından temin edilmiştir. HPLC-grade saf su, Milli-Q sistemi (Massachusetts, ABD) kullanılarak üretilmiştir. Analitik saflıktaki asetik asit, BHA ve BHT (saflık >%98), Sigma-Aldrich (Steinheim, Almanya) tarafından temin edilmiştir.

Yerel üreticiden alınan ayçiçek yağı örneği, analiz edilinceye kadar soğukta ve karanlık bir ortamda depolanmıştır. Yağ örneğinde BHA ve BHT analizleri gerçekleştirilmiş ve yağda bu maddeler tespit edilmemiştir. Bu nedenle, BHA ve BHT için katkı maddeleri tebliğinde belirtilen maksimum değerler olan sırasıyla 200 mg/kg ve 100 mg/kg miktarları yağa eklenmiştir. Tüm kızartma işlemi bu doğrultuda gerçekleştirilmiş, katkı maddelerinin yağa eklenmesinden sonra manyetik bir karıştırıcı kullanılarak homojen karışması sağlanmıştır (Ceylan 2020).

2.1 Katkı Maddesi Analizi

Taze yağın katkı maddeleri içermediğini doğrulamak amacıyla AOAC 983.15 yöntemi ve HPLC-DAD cihazı kullanılarak analiz yapılmıştır. Yöntem kapsamında standart hazırlığı için, stok standart çözeltiler (%1 mg/mL), bütil hidroksianisol, bütil hidroksitoluen ve tersiyer bütil hidrokinonun metanol içinde çözülmesiyle hazırlanmış ve ışıktan korunarak 4°C'de saklanmıştır. Çalışma standart çözeltileri, stok çözeltilerin metanol ile seyreltilmesiyle hazırlanmıştır. Örnek hazırlama işlemi için, yağ hassas bir şekilde tartılarak (10 g) 25 mL metanol ile 100 mL'lik tıpalı konik bir şişeye yerleştirilmiş ve oda sıcaklığında 10 dakika boyunca ultrasonik olarak ekstrakte edilmiştir. Elde edilen karışım vortekslenmiş, buz banyosunda soğutulmuş ve 7700 rpm'de 10 dakika santrifüj edilmiştir. Üstteki organik faz alınmış ve metanol ile 25 mL'ye tamamlanmıştır. Bu çözelti, kromatografik analizden önce en az 1 saat boyunca dondurucuda saklanmıştır. Tüm numuneler, analizden önce 0,45 µm'lik membran filtreden geçirilmiştir. HPLC analizi için Zorbax SB-C18 kolon (150 × 4.6 mm², 5 µm) ve buna bağlı Zorbax SB-C18 koruma kolonu (20 × 4.0 mm², 5 µm), sabit bir sıcaklıkta (30°C) çalıştırılmıştır. Mobil faz, %1 sulu asetik asit (A) ve metanol (B) karışımından oluşturulmuş ve şu gradyan elüsyon programı uygulanmıştır: 0–5. dakikalar arasında %40–60 B, 5–10. dakikalar arasında %60–80 B, 10–15. dakikalar arasında %80–90 B, ve 15–20. dakikalar arasında %90 B. Akış hızı 1,0 mL/dak olarak ayarlanmış ve analizler arasında yeniden denge sağlamak için 8 dakika süreyle re-ekilibrasyon yapılmıştır. Enjeksiyon hacmi 10 µL olarak belirlenmiştir. Diod-array dedektör, 280 nm dalga boyunda çalıştırılmıştır. Elektrokimyasal dedeksiyon için camyüzey çalışma elektrodu, Ag/AgCl referans elektrodu ve paslanmaz çelik karşı elektrodu kullanılmış, potansiyel oksidatif modda 0,8 V olarak uygulanmıştır (Sun vd. 2017).

2.2 Hücre Kültürü Analizleri

2.2.1. Hücre Hatlarının Laboratuvar Ortamına Adaptasyonu ve Çoğaltımı

İnsan embriyonik böbrek hücre hattı HEK-293 (ATCC® CRL-1573), %20 FBS ve %1 penisilin içeren RPMI 1640 besiyerinde çoğaltılmıştır. Hücreler 37°C sıcaklıkta ve %5 CO_2 içeren bir ortamda inkübe edilmiştir (NUAIRE NU-5510E) (Ilhan 2020).

2.2.2. Hücrelerin Sayımı

Hücrelerin deneylerde kullanılacak miktarlarda hazırlanabilmesi için sayım işlemi gerçekleştirilmiştir. Hücre tabakası, 5 ml Tripsin EDTA ile 5 dakika muamele edilerek zeminden ayrılmıştır. Hücre çözeltisi, santrifüj işleminden sonra hücre pelletini elde etmek için santrifüj edilmiştir. Hücre pelleti besiyeri ile seyreltilip homojenize edilmiştir. Hücre süspansiyonundan alınan örnekler, 50 µl Tripan mavisi ile karıştırılarak Invitrogen Countless Automated Cell Counter otomatik hücre sayım cihazı kullanılarak sayılmıştır (Erten vd. 2009).

2.2.3. Hücre Kültürlerinde Sitotoksisite Düzeylerinin Belirlenmesi

MTT(3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-iphenyltetrazolium bromide) hücre canlılığını ölçmek için kullanılmıştır. MTT, metabolik olarak aktif hücreler tarafından mor renkli formazan tuzuna dönüştürülür. Kuyucuklara dimetil sülfoksit (DMSO) eklenerek formazan çözündürülmüş ve renk değişimi çok modlu plaka okuyucu ile analiz edilmiştir. MTT analizi sonucunda, hücrelere uygulanan katkı maddelerinin IC_{50} konsantrasyonları belirlenmiştir. 96 kuyucuklu kültür plakalarına 10^4 hücre ekilmiş ve hücreler katkı maddelerinin artan konsantrasyonlarıyla (10, 50, 100, 500, 1000 µg/mL) 24, 48 ve 72 saat muamele edilmiştir. Dozlar seçilirken TGK'nin Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliğinde belirtilen maksimum dozlar dikkate alınmıştır (Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği 2013).

Tüm hücre kültürü çalışmaları, Manisa Celal Bayar Üniversitesi DEFAM Hücre Kültürü Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Grafikler Graphpad Prism 5.0 kullanılarak çizilmiştir

2.3. İstatistiksel Analizler

Tüm fizikokimyasal analizler IBM SPSS Statistics 22 programı kullanılarak, Varyans Analizi (ANOVA) ve post-hoc Tukey testi ile $p<0.05$ önem düzeyinde yorumlanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Katkı Maddesi Analizleri

Kızartma öncesi BHA ve BHT içermediği tespit edilen yağa Türk Gıda Kodeksi'ne (TGK) göre maksimum BHA ve BHT miktarları olan 200 mg/kg ve 100 mg/kg eklenmiştir (Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği, 2013). 170°C'de 300 saniyelik kızartma parametresi kullanılarak yapılan denemeler sonrasında gerçekleştirilen ölçümler sonucunda kızartma sonrası yağda BHA 160 mg/kg ve BHT 60.7 mg/kg olarak tespit edilmiştir. Kızartma işlemi sonrasında yağdaki BHA ve BHT miktarındaki azalma, kızartma sırasında bu maddelerin patatese geçmesi veya kimyasal reaksiyonlar sonucu bileşimlerinde değişiklikler olabileceğini göstermektedir.

3.2. Hücre Kültürü Analizleri

HEK-293 böbrek epitel hücreleri, BHA ve BHT'nin artan konsantrasyonlarına 24, 48 ve 72 saat boyunca maruz bırakılmış ve hücre canlılık değerleri hesaplanarak Çizelge 1 ve Çizelge 2'de sunulmuştur.

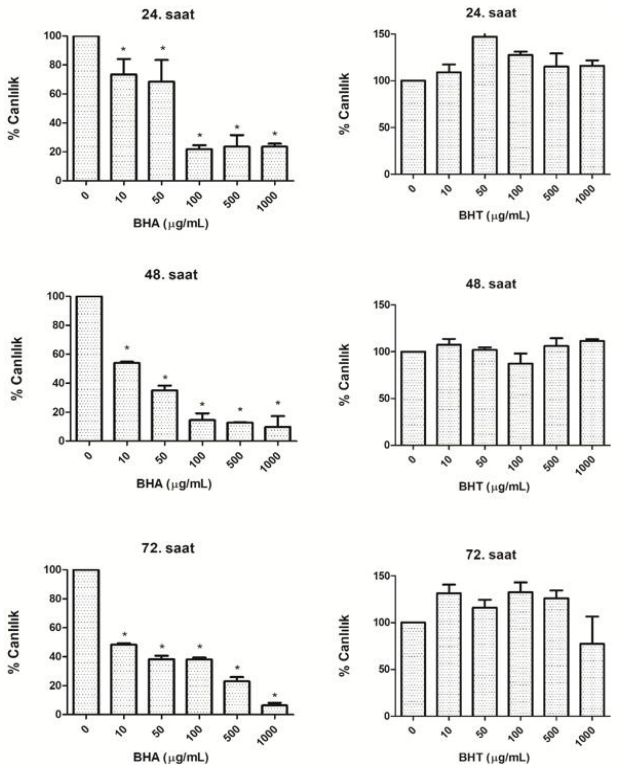
MTT yöntemi kullanılarak yapılan analizler sonucunda, BHA'nın 24., 48. ve 72. saatlerdeki IC_{50} değerleri sırasıyla 8.75 µg/mL olarak hesaplanmıştır. BHT için ise sadece 24. saatte 50 µg/mL konsantrasyonunda anlamlı bir fark gözlemlenmiştir ($p<0.05$). BHA ve BHT'nin 72. saatte IC50 dozları sırasıyla 8.75 µg/mL ve 1761.159 µg/mL olarak tespit edilmiştir (Şekil 1).

Çizelge 1. BHA Konsantrasyonlarının 24, 48 ve 72 Saatlik Maruziyet Sonucunda Elde Edilen Hücre Canlılığı (%) Değerleri.

Konsantrasyonlar (µg/mL)	24 saat Hücre Canlılığı (%)	48 saat Hücre Canlılığı (%)	72 saat Hücre Canlılığı (%)
10	45.94	54.57	25.1
50	37.84	37.38	9.7
100	18.56	11.12	8.77
500	61.41	12.89	7.85
1000	162.94	15.13	14.22

Çizelge 2. BHT Konsantrasyonlarının 24, 48 ve 72 Saatlik Maruziyet Sonucunda Elde Edilen Hücre Canlılığı (%) Değerleri.

Konsantrasyonlar (µg/mL)	24 saat Hücre Canlılığı (%)	48 saat Hücre Canlılığı (%)	72 saat Hücre Canlılığı (%)
10	40.07	32.84	6.63
50	12.05	9.62	6.66
100	28.84	9.16	5.72
500	91.52	11.17	10.11
1000	199.97	15.45	19.5



Şekil 1. HEK-293 hücrelerinde BHA ve BHT katkı maddelerinin konsantrasyona ve zamana bağlı % canlılık değişimleri. (* ile gösterilenler istatistiksel olarak anlamlı ($p<0.05$) değerleri göstermektedir)

BHA ve BHT, başlangıçta kullanılan yağda tespit edilmemiş olsa da, maksimum dozlarda (200 ve 100 µg/mL) eklenmiştir. Tüm sitotoksik analizler bu maksimum değerler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Kızartma işlemi sonrasında alınan yağ örneklerinde BHA ve BHT miktarlarında önemli bir azalma gözlenmemiş ve bu maddelerin sitotoksik etkisinin devam ettiği saptanmıştır. Hücre kültürü analizleri, BHT için sadece 24. saatte 50 µg/mL doz uygulamasında anlamlı bir fark göstermiştir. BHA için ise 24, 48 ve 72. saatlerde gerçekleştirilen tüm uygulamalarda anlamlı bir fark gözlenmemiştir. Kızartma sonrası BHA ve BHT miktarlarında belirgin bir azalma olmaması, kısa süreli kızartma işleminin bu maddeler üzerinde önemli bir bozundurma etkisi yaratmadığını göstermektedir. Fare testis mikrozomlarının kullanıldığı bir çalışmada, BHT'nin IC_{50} değeri 0.6 µM olarak hesaplanmıştır (Michelangeli ve Tovey 1996). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, insan böbrek epitel hücrelerinde IC_{50} değerlerinin daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Tüm analizler değerlendirildiğinde, patates kızartması üretim sürecinde kullanılan yağa BHA ve BHT ilavesinin, peroksit içeriğini düşük tutması dışında herhangi bir fizikokimyasal etkisi olmadığı, ancak bu ilavenin hücre kültürü analizlerinde sitotoksik etkiye neden olabileceği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, BHA ve BHT ilavesinin peroksit içeriğini düşük tutmanın sağladığı faydanın, sitotoksik etkinin yol açabileceği potansiyel zararlardan daha önemli olduğu düşünülmelidir. Patates kızartması için ortalama tek seferlik porsiyon miktarı 70 g seviyesindedir (FDA, 2018). Buradaki servis boyutu yaklaşık 10-12 kızarmış parmak patates miktarına karşılık gelmektedir. Yapılan hesaplamalar, kızarmış patates gramı başına emilimi gerçekleşen katkı maddesi kabulüne dayanmaktadır. Ortalama insan ağırlığı ise 70 kg olarak kabul edilmiştir. Patates kızartması ile alınan yağın, patatesin ve BHA-BHT'nin tamamen sindirildiği varsayıldığında, 70 kg bir bireyin 1 porsiyon (70 g) patates kızartması tükettiği durumda, vücuda alınan BHA miktarı yaklaşık 0.4-0.5 mg, BHT miktarı yaklaşık 1.5-2 mg hesaplanmıştır. Sonuç olarak, 24 saat için BHA'nın 10 µg/kg (70 g için 1.478 ppm) ve BHT'nin 50 µg/kg (70 g için 7.14 ppm) dozlarında anlamlı bir etki gözlenmiştir. Bu bulgular, BHA içeren patates kızartmasından 50 porsiyon ve BHT içeren patates kızartmasından 8 porsiyon tüketiminin sitotoksik etki yaratabileceğini göstermektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, patates kızartması üretiminde kullanılan yağlara eklenen BHA ve BHT katkı maddelerinin fizikokimyasal ve biyolojik etkileri incelenmiştir. BHA ve BHT, gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan antioksidanlardır; özellikle yağların oksidatif bozulmasını önlemek amacıyla tercih edilirler. Bu maddelerin, kızartma işlemi sırasında ve sonrasında hem kimyasal yapıları üzerindeki değişimler hem de hücresel düzeydeki etkileri araştırılmıştır.

Katkı maddesi analizleri, kızartma öncesi yağa eklenen BHA ve BHT'nin, 170°C'de 300 saniye süreyle kızartma işlemine tabi tutulması sonrasında yağdaki konsantrasyonlarının anlamlı bir şekilde azalmadığını göstermiştir. Bu durum, bu maddelerin kısa süreli kızartma işlemi boyunca kimyasal olarak kararlı kaldığını ve kızartma sırasında patatesin içine geçiş veya yağda önemli bir bozunma göstermediğini ortaya koymaktadır. Ancak, bu katkı maddelerinin varlığının yağın diğer özellikleri, özellikle de peroksit değeri üzerindeki etkileri, belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. Peroksit değerinin düşük tutulması, yağın oksidatif stabilitesini artırmakta ve ürün kalitesini korumaktadır.

Hücre kültürü analizleri, BHA ve BHT'nin insan böbrek epitel hücreleri üzerindeki sitotoksik etkilerini ortaya koymuştur. BHA'nın 24, 48 ve 72 saatlik maruziyetlerde hücre canlılığı üzerinde önemli bir düşüşe neden olduğu gözlenmiştir. BHT ise, daha düşük konsantrasyonlarda ve özellikle 24 saatlik maruziyette hücre canlılığında belirgin bir azalma göstermiştir. BHT'nin 72 saatlik maruziyet sonrasında IC_{50} değerinin oldukça yüksek olması, bu maddenin hücresel düzeyde daha az toksik olduğunu, ancak yüksek dozlarda sitotoksik etki gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Fare testis mikrozomları üzerinde yapılan önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında, insan böbrek epitel hücrelerinde BHA ve BHT'nin daha yüksek IC50 değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, hücre türleri arasında farklı toksisite profilleri olabileceğini ve BHA ile BHT'nin insan hücrelerinde daha dirençli bir yapıya sahip olabileceğini düşündürmektedir.

Bu bulgular, BHA ve BHT'nin patates kızartmasında kullanımının, yağın fizikokimyasal stabilitesini artırırken, hücresel düzeyde potansiyel bir risk taşıyabileceğini göstermektedir. BHA ve BHT ilavesinin peroksit değerini düşük tutmasının sağladığı fayda, bu maddelerin sitotoksik etkilerinin dikkate alınması gerektiğini işaret etmektedir. Özellikle, bu katkı maddelerinin düzenli ve yüksek miktarda tüketilmesi durumunda potansiyel sağlık riskleri taşıyabileceği düşünülmelidir.

Sonuç olarak, BHA ve BHT içeren patates kızartmalarının tüketiminde dikkatli olunması gerektiği, bu maddelerin

uzun süreli etkilerinin daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyduğu ortaya konmuştur. Gıda endüstrisinde bu tür katkı maddelerinin kullanımının, hem ürün kalitesi hem de tüketici sağlığı açısından dengeli bir şekilde değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışma, gıda katkı maddelerinin güvenli kullanımını ve potansiyel risklerini daha iyi anlamak için önemli veriler sunmakta ve gelecekteki araştırmalar için bir temel oluşturmaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Bu çalışma Doç.Dr.Tuncay Yılmaz ve Doç.Dr.Harika Atmaca (2.Danışman) danışmanlığında Büşra Baykan tarafından 2022 tarihinde tamamlanan "Derin Yağda Kızartma Sırasında Gıdaya Geçen Sentetik Antioksidanların Miktarının Tespiti Ve Sitotoksik Etkilerinin Araştırılması" başlıklı yüksek lisans (Tez no: 756363) tezinden türetilmiştir.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak

Yazar 2: Araştırma, Deneyleme, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak,

Yazar 3: Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Görselleştirme, Yazma –orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Kaynaklar

Aalto-korte, K. 2000. Allergic contact dermatitis from tertiary-butylhydroquinone (TBHQ) in a vegetable hydraulic oil. *Contact Dermatitis*, **43,** 303–315. https://doi.org/10.1097/00006205-200025040-00001

Altmann, H. J., Wester, P. W., Matthiaschk, G., Grunow, W., & Van Der Heijden, C. A. 1985. Induction of Early Lesions in the Forestomach of Rats by 3-Tert-Butyl-4-Hydroxyanisole (BHA). *Food and Chemical Toxicology*, **23**(8), 723–731.

Bandoniene, D., Venskutonis, P., R., Gruzdiene, D., Murkovic, M. 2002. Antioxidative activity of sage (Salvia officinalis L.), savory (Satureja hortensis L.) and borage (Borago officinalis L.) extracts in rapeseed oil. *Eur J Lipid Sci Technol*, 1**04**(5), 286–292.

Briggs, D. R. 1997. Food Additives (Wahlgvist ML, Ed.). Food and Nutrition, Allen and Unwin Pty Ltd.

Çelik, H. 2013. İnsan Lenfosit Hücre Kültürü Ortamında Alüminyumun Oluşturduğu Sitotoksisite ve Genotoksisiteye Karşı Sarımsak (Allium Sativum) ve Çörek Otu Tohumu (Nigella Sativa) Ekstraktlarının Etkilerinin Araştırılması. Gaziantep Üniversitesi.

Ceylan, M. M. 2020. Kızartma Yağlarının Oksidatif Stabilitesi Üzerine Farklı Doğal Antioksidan Maddelerin Etkisi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi.

Dassarma, B., Nandi, D. K., Gangopadhyay, S., & Samanta, S. 2018. Hepatoprotective effect of food preservatives (butylated hydroxyanisole, butylated hydroxytoluene) on carbon tetrachloride-induced hepatotoxicity in rat. *Toxicology Reports*, 5(December 2017), **31–37**. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.12.009

Erten, C., Karaca, B., Kucukzeybek, Y., Gorumlu, G., Cengiz, E., Gul, M. K., Atmaca, H., Uzunoglu, S., Karabulut, B., Sanli, U. A., & Uslu, R. 2009. Regulation of growth factors in hormone- and drug-resistant prostate cancer cells by synergistic combination of docetaxel and octreotide. *BJU International*, **104**(1), 107–114. https://doi.org/10.1111/j.1464-410X.2009.08340.x

Felter, S. P., Zhang, X., & Thompson, C. 2021. Butylated hydroxyanisole: Carcinogenic food additive to be avoided or harmless antioxidant important to protect food supply? *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **121**, 104887. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2021.104887

Fisherman, F.W., Cohen, G. 1973. Chemical intolerance to butylated hydroxyanisole (BHA) and butylated hydroxytoluene and (BHT) and vascular response as an indicator and monitor of drug intolerance. *Ann Allergy,* **31**, 126–133.

Food and Drug Administration (FDA). 2018. Guidance for Industry: Nutrition and Supplement Facts Labels – Questions and Answers Related to the Compliance Date, Added Sugars, and Declaration of Quantitative Amounts of Vitamins and Minerals. Retrieved from https://www.fda.gov/media/111144/download

Ilhan, S. 2020. Essential Oils from Vitex agnus castus L. Leaves Induces Caspase-Dependent Apoptosis of Human Multidrug-Resistant Lung Carcinoma Cells through Intrinsic and Extrinsic Pathways. *Nutrition and Cancer*, **73**(4), 694–702. https://doi.org/10.1080/01635581.2020.1823439

Karaca, B., Kucukzeybek, Y., Gorumlu, G., Erten, C., Gul, M. K., Cengiz, E, Atmaca H, Uzunoglu S, Karabulut B, Uslu, R. 2008. Profiling of angiogenic cytokines produced by hormone-and drug-refractory prostate cancer cell lines, PC-3 and DU-145 before and after treatment with gossypol. *European Cytokine Network*, **19**(4), 176–184.

Labrador, V., Fernández Freire, P., Pérez Martín, J. M., & Hazen, M. J. 2007. Cytotoxicity of butylated hydroxyanisole in Vero cells. *Cell Biology and Toxicology*, **23**(3), 189–199. https://doi.org/10.1007/s10565-006-0153-6

Michelangeli, F., S. Tovey, D. A. L. 1996. Can phenolic plasticizing agents affect testicular development by disturbing intracellular calcium homeostasis? *Biochem. Soc. Trans*., **24**, 293.

Okubo, T., & Kano, I. 2003. Studies on estrogenic activities of food additives with human breast cancer MCF-7 cells and mechanism of estrogenicity by BHA and OPP. *Yakugaku Zasshi*, **123**(6), 443–452. https://doi.org/10.1248/yakushi.123.443

Sheftel, V. O. 2000. Indirect Food Additives and Polymers: *Migration and Toxicology*. (1st ed.). CRC Press.

Sun, Z., Wang, M., Cheng, N., Gao, H., Deng, J., Zhao, J., … & Cao, W. 2017. Determination of synthetic phenolic antioxidants in vegetable oil and oil-enriched foods by high-performance liquid chromatography with electrochemical detection. *Analytical Letters*, **50**(4), 607-616. https://doi.org/10.1080/00032719.2016.1195396

Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği 2013.

Verhagen, H., Schilderman, P. A. E. L., & Kleinjans, J. C. S. 1991. Butylated hydroxyanisole in perspective. *Chemico-Biological Interactions*, **80**(2), 109–134. https://doi.org/10.1016/0009-2797(91)90019-4

Wang, W., & Kannan, K. 2019. Quantitative identification of and exposure to synthetic phenolic antioxidants, including butylated hydroxytoluene, in urine. *Environment International*, **128**(January), 24–29. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.028

Weber, R. W., Hoffman, M., Raine, D. A., & Nelson, H. S. 1979. Incidence of bronchoconstriction due to aspirin, azo dyes, non-azo dyes, and preservatives in a population of perennial asthmatics. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, **64**(1), 32–37. https://doi.org/10.1016/0091-6749(79)90080-0

Yedier, S. K. 2021. Akrilamidin İnsan Akciğer Epitel Hücreleri Üzerindeki Sitotoksisitesi, Genotoksisitesi ve Karsinojenitesinin Araştırılması. Ordu Universitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1555208
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035402 (565-575)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035402 (565-575)

Statistical Evaluation of Asbestos Exposure Awareness That May Arise From Removal of Building Debris in the 2023 Kahramanmaras Earthquakes

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 25.09.2024
Kabul/Accepted: 13.01.2025
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

2023 Kahramanmaraş Depremlerinde Bina Enkazlarının Kaldırılmasından Kaynaklanabilecek Asbest Maruziyeti Farkındalığının İstatiksel Olarak Değerlendirilmesi

Ali SUZERGOZ*, Tuba RASTGELDİ DOGAN

Harran University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Şanlıurfa, Türkiye

Abstract

In addition to the dangers posed by earthquakes, long-term health concerns arise from asbestos exposure during demolition activities. Our study aimed to assess the awareness and perceptual effects of asbestos dust on individuals involved in or near demolition sites. We conducted a survey involving 110 participants across three groups: a. Demolition Officers (DO) (27 participants), b. Environmental Safety Officers (SO) (28 participants), and c. Individuals Present (IP) (55 participants). Participants provided demographic information and answered questions related to asbestos exposure and safety practices. The SO group demonstrated relatively higher awareness levels but often failed to implement adequate safety protocols. This study makes a significant contribution by identifying the most vulnerable groups and emphasizing the systemic deficiencies in current safety practices. Practical implications include the necessity of mandatory training modules for demolition workers and public information campaigns to mitigate the health risks of asbestos exposure. By addressing these gaps, the findings provide a foundation for integrating asbestos risk management into disaster response frameworks, thereby improving occupational safety and public health in post-disaster scenarios.

Keywords: Asbestos; Kahramanmaraş earthquakes; exposure; demolition; safety precautions.

Öz

Depremlerin oluşturduğu tehlikelere ek olarak, yıkım faaliyetleri sırasında asbeste maruz kalmaktan kaynaklanan uzun vadeli sağlık sorunları da vardır. Çalışmamızın amacı, yıkım sahalarında veya yakınında bulunan kişilerde asbest tozunun farkındalığını ve algısal etkilerini değerlendirmektir. Üç grupta 110 katılımcıyı kapsayan bir anket gerçekleştirdik: a. Yıkım Görevlileri (YK) (27 katılımcı), b. Güvenlik Görevlileri (GG) (28 katılımcı) ve c. Çevredeki Halk (ÇH) (55 katılımcı). Katılımcılar demografik bilgiler sağladı ve asbeste maruz kalma ve güvenlik uygulamalarıyla ilgili soruları yanıtladılar. ÇG grubu nispeten daha yüksek farkındalık seviyeleri sergilemiş olsa da genellikle yeterli güvenlik protokollerini uygulamada başarısız olmuştur. Bu çalışma, en savunmasız grupları belirleyerek ve mevcut güvenlik uygulamalarındaki sistemik eksiklikleri vurgulayarak önemli bir katkı sağlamaktadır. Pratik çıkarımlar arasında yıkım çalışanları için zorunlu eğitim modüllerinin hayata geçirilmesi ve halkı bilgilendirmeye yönelik kampanyaların düzenlenmesi yer almaktadır; böylece asbeste maruz kalmanın sağlık riskleri azaltılabilir . Bu eksikliklerin giderilmesiyle elde edilen bulgular, asbest risk yönetiminin afet müdahale çerçevelerine entegre edilmesi için bir temel oluşturarak, afet sonrası iş sağlığı ve güvenliği ile halk sağlığının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: *Asbest: Kahramanmaraş depremleri: maruziyet; yıkım; güvenlik önlemleri.*

1. Introduction

Asbestos is a naturally occurring mineral, has a storied history of industrial use due to its exceptional physical properties (Furuya et al. 2018). Comprising fine, durable fibers, asbestos is highly resistant to heat, fire, and chemicals, which made it an invaluable material for a wide array of applications (Dirisu et al. 2022). In its natural state, asbestos can be found in rock formations worldwide, but it wasn't until the late 19th century, during the industrial revolution, that its flexibility and strength made it a revolutionary material for many sectors, most notably construction and its building components (Krówczyńska and Wilk 2019). The composition of asbestos, primarily silicate minerals, gives it a fibrous nature, making it extremely versatile. There are six fibrous minerals that have been used in commercial products. The six types of asbestos are chrysotile, crocidolite, amosite, anthophyllite asbestos, tremolite asbestos and actinolite asbestos (figure 1).

During the mid-20th century, asbestos was known as a revolutionary material due to its versatility, durability, and heat resistance. It became a staple in construction and manufacturing, featured in products such as roofing, insulation, and brake linings (Gualtieri et al. 2022; Emmett

Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ali Suzergoz *e-posta/e-mail: alisuzergoz@yahoo.com*

2021). In a study conducted in Detroit between 2014 and 2017, asbestos was found in 95% of demolished abandoned housing units.

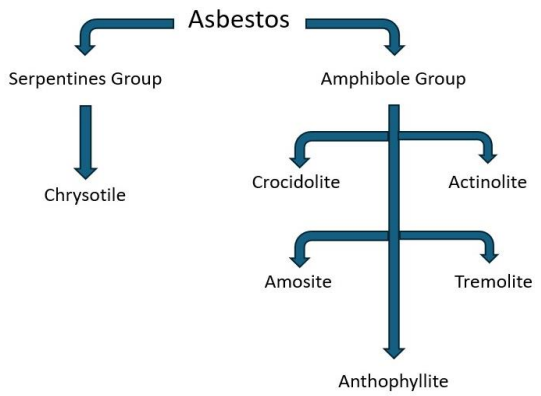


Figure 1. Types of asbestos

The most common asbestos-containing materials were flooring, roofing, siding and duct insulation (Franzblau et al. 2020). In another study conducted on 50 buildings in İzmir, asbestos was detected in 22% of the 505 samples taken (Tetik et al. 2024). The findings in these studies reveal that asbestos is widely present in demolished structures, highlighting the critical importance of conducting comprehensive asbestos surveys and abatement studies prior to demolition activities to protect public health and ensure environmental safety. Its popularity surged because of the widespread belief that asbestos posed no significant risk, particularly when it was locked within construction materials. However, over time, as more people became exposed to airborne asbestos dust, health risks began to emerge. While undisturbed asbestos is relatively stable, activities such as cutting, sanding, or damage can release microscopic fibers into the air. Inhalation of these fibers poses significant health risks, as they embed in lung tissues, causing chronic irritation and severe diseases over time (Pawełczyk and Božek 2015; Kim et al. 2020). Despite its classification as a carcinogen and bans implemented in most countries by 1983 (Magnani et al. 2023), asbestos remain prevalent, especially in structures built before its prohibition. In Türkiye, asbestos was widely used in construction until 2010, leaving a legacy of hazardous materials in many buildings, until the regulation comes into force (Republic of Turkey Official Gazette 2010). The 2023 Kahramanmaraş earthquakes, which led to the widespread demolition of older structures, have raised concerns about whether asbestos fibers are present in debris and, if so, at what concentrations—posing serious risks to public health.

Exposure to asbestos can lead to severe, often life threatening health issues, primarily targeting the respiratory system. In those exposed to asbestos, it can lead to diseases with long latent periods during which symptoms may not appear until 20 to 50 years after exposure (Sen 2015; Miao et al. 2024). One of the most aggressive diseases caused by asbestos is mesothelioma, a rare cancer affecting the thin membranes surrounding the lungs, abdomen, or heart (Valenzuela et al. 2016). Mesothelioma is almost exclusively linked to asbestos exposure, and its prognosis remains poor due to late detection (Boffetta et al. 2019). Lung cancer is another significant risk (Nielsen et al. 2014), with the combined effects of asbestos and smoking multiplying the likelihood of the disease (Berry and Liddell 2004; Ngamwong et al. 2015; Klebe et al. 2020). Prolonged exposure can also lead to asbestosis, a chronic lung condition marked by fibrosis and progressive respiratory failure, as well as pleural diseases, such as plaques and thickening of the lung lining (Baur et al., 2017; Harris et al., 2019). While some of these conditions are non-cancerous, they can serve as early warnings for more severe outcomes, underscoring the need for early detection and regular monitoring of at-risk populations.

In addition to long-term health concerns, the destruction of asbestos-containing structures during demolitions significantly heightens the risk of exposure. The release of dust containing asbestos fibers, often mixed with other toxic substances like heavy metals, can severely impact air quality and exacerbate respiratory illnesses (Bloise et al., 2018). These risks are particularly relevant in the aftermath of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, where widespread demolition operations have underscored the need for improved safety protocols. However, a gap remains in understanding how long-term health monitoring can be systematically integrated into disaster response frameworks. Best practices from countries such as the United States and Australia, where asbestos is strictly regulated, emphasize the importance of establishing registries for exposed populations, routine health screenings, and public education campaigns (URL-1), (URL-2). Similarly, Europe has strict regulations on asbestos management. The European Union has developed extensive legislation to regulate the use and management of asbestos. In this context, in addition to the ban of all types of asbestos in 2003, directives were issued to record workers exposed to asbestos, ensure regular health examinations, and protect public health during demolition operations (European Agency for Safety and Health at Work [EU-OSHA], 2020). Policies such as the establishment of national inventories of asbestos-containing buildings implemented in Europe could serve as an example for similar initiatives in Turkey.

The implementation of such measures in Turkey could increase the ability to identify and manage asbestos-related health consequences in affected regions. Implementing similar measures in Türkiye could enhance the ability to identify and manage asbestos-related health outcomes in affected regions.

The destruction caused by the 2023 Kahramanmaraş earthquakes and subsequent building demolitions has emphasized the need to reassess Türkiye's strategies for managing the risks associated with asbestos exposure. Understanding the extent of asbestos exposure following natural disasters is essential for both public health and environmental safety. Our study aims to assess the awareness and protective measures taken by various groups involved in or near demolition activities. By evaluating public knowledge of the health risks associated with asbestos exposure, the data gathered will serve as a guide for future disaster preparedness and response strategies, ensuring better protection for both workers and residents. This research, conducted across heavily affected regions such as Şanlıurfa, Adıyaman, and Kahramanmaraş, represents an important step toward public perception and the necessity of enhanced safety protocols in managing asbestos risks during post-earthquake demolitions.

2. Materials and Methods

2.1 Study area

A survey was conducted during the demolition of severely damaged buildings, as mandated by the Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change, following the February 6 earthquakes. The buildings, located in various affected provinces, including Şanlıurfa, Adıyaman and Kahramanmaraş where the survey was specifically carried out, an example from the workspace can be seen in Figure 2. In selecting the demolition area where the survey had conducted, attention was paid to ensuring that the construction dates of the buildings subject to demolition were before 2010. In this way, efforts were made to ensure that there was a high probability of toxic residues in the dust such as asbestos generated during the demolition.

2.2 Target group

The survey focused on three different groups: crane operators and other demolition workers actively involved in the process (DO, 27 individuals), security personnel responsible for maintaining environmental safety around the site (SO, 28 individuals), and individuals who were not on duty but were in the vicinity during the demolition (IP, 55 individuals). You can also see an example of the survey in Figure 3. This study aimed to evaluate potential asbestos exposure among these groups, as the demolition of damaged buildings posed a significant risk of releasing hazardous materials, particularly asbestos, into the environment.

Figure 2. One of the demolition areas (Şanlıurfa)

Figure 3. Survey of an individual from the SO group during the demolition

2.3 Survey application

Survey questions were designed to evaluate the perceptual effects of potential asbestos exposure during the demolition of severely damaged buildings in the affected region. The survey targeted DO, SO, and IP groups to gather their insights on experiences and perceptions related to these exposures and their potential health impacts. Participation was voluntary, allowing respondents to provide feedback on their observations and concerns regarding asbestos exposure during the demolition process. At the end of the survey,

masks were distributed to the participants, and they were informed about asbestos and its possible negative effects.

2.4 Statistical Analysis

The ages of the participants in the study were expressed as mean ± SD (minimum - maximum) for each group. The participants' working hours in their own sector and working hours in demolition activities were analyzed using ANOVA and Bonferroni was used as a post-hoc test for comparisons between groups. Group comparisons regarding the duration of exposure of the participants to the demolition area were performed using t-test. The non-parametric Wilcoxon-Mann-Whitney U test was used to compare the responses given to the survey questions between groups. The value of "$p<0.05$" was considered statistically significant.

3. Results and Discussions

The survey included demographic questions, which are given in Table 1, to capture a comprehensive profile of the participants. Additionally, asbestos awareness and risk perception questions, the details of which are provided in Table 2, were included to assess participants knowledge of the potential health hazards associated with possible asbestos exposure during building demolition.

Table 1. Demographic questions.

Your age?
Your gender?
Your education level?
Your working hours in this sector? (Years)
Your working hours in demolition activities? (Months)
Your average Daily presence in the demolition area? (Hours)

Table 2. asbestos awareness and risk perception questions.

Do you have information about the content of the dust generated during building demolition?
Are you aware that dust form old, demolished buildings (older than 23 years) may contain asbestos?
Do you have information about asbestos dust and its health hazards?
Do you think that exposure to asbestos during demolition could lead to serious health problems in the future?
Have you been given any information about the risks and safety precautions associated with exposure to asbestos during the demolition of dameged buildings?

The mean age of the participants was found significantly different in the group comparison (ANOVA, $p<0.032$). In the comparison between the groups (Bonferroni used as post-hoc test), the mean age of the DO group (40.04 ± 9.92 years, ranged 24 to 60) was found higher than the SO group (34.54 ± 5.68 years, ranged 25 to 43). The mean age of the IP group was found (42.29 ± 15.75 years, ranged 18 to 73), significantly higher than the SO group ($p<0.009$). This age difference suggests a mix of both experienced professionals and relatively younger workers may reflect differences in experience and familiarity with asbestos-related risks.

In terms of gender distribution, the DO group consisted of 26 males and 1 female, while the SO group included 25 males and 3 females, with the IP group having a more balanced composition of 29 males and 26 females. The low representation of women in the DO and SO groups is not surprising, given that demolition work and safety enforcement in such environments are traditionally male-dominated fields. The physically demanding nature of demolition tasks, combined with historical patterns in the workforce, may explain why female participation in these roles remains limited. Similarly, while the SO group showed slightly higher female participation, the number of women remains low primarily because we did not encounter many women in these roles during the study, even though there may be a certain number of women in such positions.

Educational levels among participants ranged from primary and secondary school graduates to those holding high school and university degrees. This diversity in education likely influenced the participants' awareness and understanding of asbestos hazards, as well as their attitudes toward safety measures. For example, 40.74% of primary school graduates were in the DO group, while 3.57% were in the SO group, and 30.9% in the IP group. Among secondary school graduates, 48.14% were in DO, 0% in SO, and 20% in IP. For high school graduates, 7.4% were in DO, 3.57% in SO, and 20% in IP. Finally, for university graduates, 3.7% were in DO, 92.85% in SO, and 29.1% in IP. This distribution of educational levels offers important context for analyzing their responses to asbestos exposure and related risks.

The duration of work of the participants in their own sectors was compared. It was observed that the DO group had been working significantly longer than the SO group (16.72 and 10.52 years, respectively. $p<0.028$). However, the duration of work in post-earthquake demolition activities was observed to be quite similar in the DO and SO groups (10.41 and 10.52 months, respectively).

According to our survey results, it was observed that the average time spent in the demolition area differed between the groups (ANOVA, $p<0.001$). In the comparison of the groups (Bonferroni used as post-hoc test), while the DO group spent an average of 9.37 hours per day in the demolition area, this time was determined

as 7.85 hours in the SO group (p<0.001). The average time spent in the demolition area by the IP group was determined as 8.86 hours, and this time was found to be significantly longer than the SO group (p<0.044), while it was found to be shorter than the DO group. These changes in daily exposure between the groups can be considered as a factor in shaping the participants' awareness and perception of asbestos-related risks.

Moreover, we posed targeted questions to participants who may have been exposed to asbestos, and the findings are presented graphically for clarity and impact. Responses are categorized as 'yes' or 'no,' with an emphasis on awareness of potential asbestos hazards.

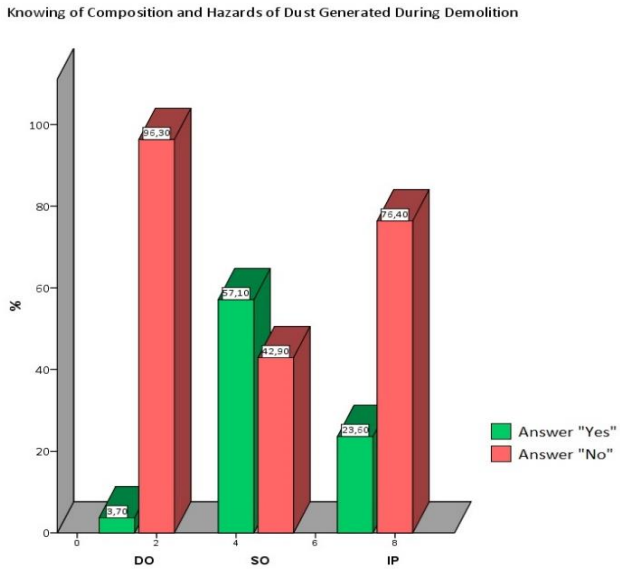


Figure 4. Responses from DO, SO, and IP groups to the knowledge of information about the content of the dust generated during building demolition.

Figure 4 shows how much knowledge different groups (DO, So and IP) have about the composition of the dust generated during demolition. It is particularly striking that security guards have a higher level of knowledge compared to other groups. However, the low level of knowledge of demolition workers shows why awareness remains limited in this group despite direct exposure. This may be related to lack of training and inadequate work safety protocols.

Figure 5 clearly shows that awareness raising efforts should focus specifically on demolition workers. It shows the awareness levels of the possibility of asbestos in dust from old buildings. The high awareness level of security guards highlights that this group is more exposed to environmental risks due to their job description and needs information on this issue. In contrast, the low awareness levels of demolition workers and individuals in the surrounding area show that these groups do not sufficiently understand the long-term health risks. The figure highlights the importance of risk communication during the demolition of old buildings and the need for targeted information campaigns on this issue.

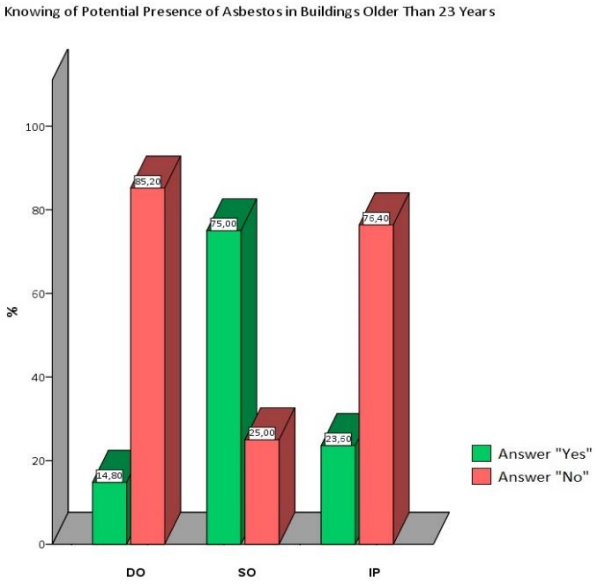


Figure 5. Awareness of the potential presence of asbestos in buildings older than 23 years, based on responses from DO, SO, and IP groups. The figure categorizes their understanding of asbestos risks in older structures, highlighting differences in knowledge levels.

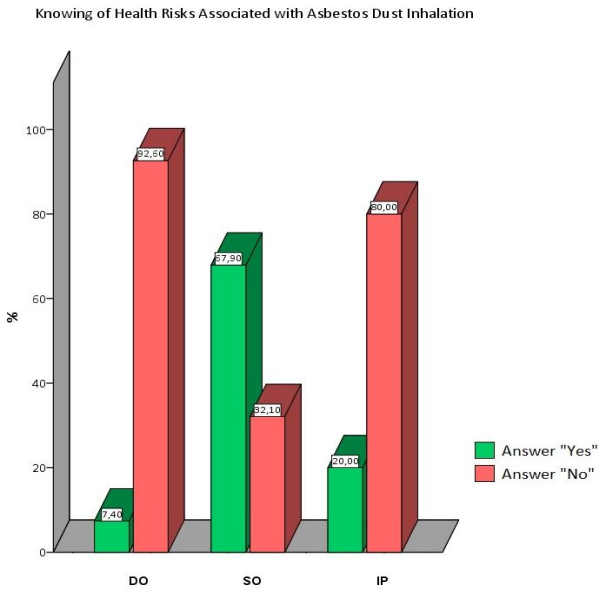


Figure 6. Results on the awareness of health risks associated with asbestos dust inhalation among DO, SO, and IP groups. The figure illustrates the variation in knowledge regarding asbestos exposure's potential health impacts across different groups.

Figure 6 shows the level of knowledge of the participants about the health effects of asbestos dust. Although security guards seem to be more aware of this issue than other groups, the lack of knowledge of demolition workers shows that they do not have sufficient access to health education despite the direct risk of exposure. The figure supports the necessity of making training modules and awareness-raising programs on the use of protective equipment mandatory for workers.

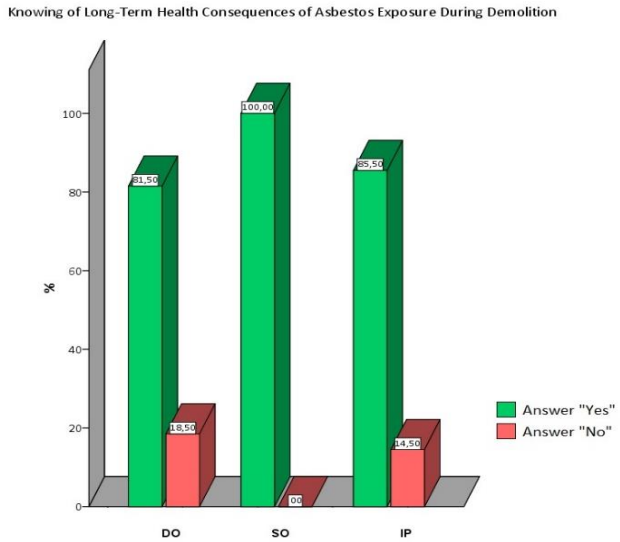


Figure 7. Results on the awareness of long-term health consequences of asbestos exposure during demolition among DO, SO, and IP groups. The figure highlights differences in understanding of prolonged asbestos-related health risks, emphasizing variations across the groups.

Figure 7 shows how aware respondents are of the long-term health effects of asbestos exposure during demolition (e.g. mesothelioma and asbestosis). The higher awareness levels among security guards than other groups highlight the role their professional role plays in raising awareness. However, the lack of awareness among demolition workers and the public suggests that the serious health consequences are poorly understood. The figure strongly suggests that more comprehensive education and information efforts are needed on this issue.

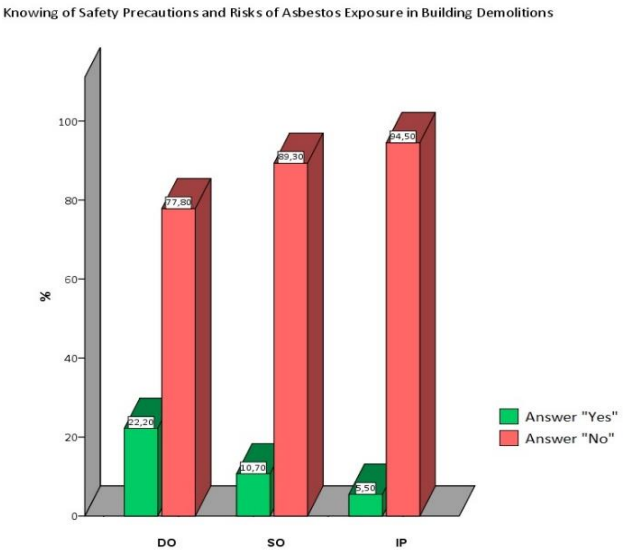


Figure 8. Survey results on the awareness of safety precautions and risks associated with asbestos exposure during building demolition among DO, SO, and IP groups. The figure illustrates varying levels of knowledge regarding protective measures and potential hazards across the groups.

Figure 8 shows whether the participants were informed about asbestos risks and protective measures. The results clearly show that all three groups have a serious lack of knowledge on this issue. The fact that demolition workers and individuals living in the area have hardly been informed on this issue reveals the inadequacy of the measures taken on site and the lack of risk communication. The figure supports the necessity of implementing regular and compulsory training programs. The responses from participants in the survey, along with the statistical analysis of the differences between groups, are presented in Table 3. In constructing the table, only the "yes" responses were highlighted, while all responses were included in the statistical analyses to ensure a comprehensive evaluation.

Table 3. Proportional evaluation of responses regarding asbestos exposure from the survey participants across the groups.

Survey questions	**Percentage of those who answered "Yes" (%)**		
	DO	**SO**	**IP**
Do you have information about the content of the dust generated during building demolition?	3,7	57,1[a]**	23,6[b]* [c]*
Are you aware that dust from old, demolished buildings (older than 23 years) may contain asbestos?	14,8	75,0[a]**	23,6[c]**
Do you have information about asbestos dust and its health hazards?	7,4	67,9 [a]**	20,0 [c]**
Do you think that exposure to asbestos during demolition could lead to serious health problems in the future?	81,5	100,0[a]*	85,5[c]*
Have you been given any information about the risks and safety precautions associated with exposure to asbestos during the demolition of damaged buildings?	22,2	10,7	5,5[b]*

Wilcoxon-Mann-Whitney U test was used for comparisons between groups. "a" shows comparisons between DO and SO, "b" between DO and IP, and "c" between SO and IP groups. "" and "*" indicate $p<0.05$, $p<0.001$, respectively.

Our data shows that awareness regarding the content of the dust generated during demolition is severely lacking, particularly in the DO group, where only 3,7% had any knowledge of what they might be exposed to. This is concerning, given that these individuals are the ones that directly handle hazardous materials during demolition.

There are several possible reasons for this situation, and further investigation of these reasons may contribute to the effective design of future training and safety protocols. First, it is thought that demolition workers may have limited access to occupational safety training and information activities related to asbestos. Studies show that high-risk groups such as demolition workers are often excluded from standard safety training and have insufficient knowledge about such specific health risks (Patel and Patel 2020). Often, these workers receive only basic information about the hazards of asbestos and lack specific training or educational materials that would create more in-depth awareness. Since demolition workers often work under the influence of daily workloads and time pressures, they may sometimes neglect issues such as safety precautions and the use of protective equipment. This situation may lead to continued lack of awareness and, as a result, continued exposure if training and safety protocols are not given sufficient priority. Another possible reason is the socio-economic factors that affect the awareness levels of the DO group. Workers are mostly selected from low-income groups and individuals in this group generally have less access to health-related education and information (Ceballos et al. 2021). Economic concerns may lead to workers being less motivated to learn about hazards such as asbestos and receive training on safety precautions. The physical conditions that workers encounter in their daily work environments may also affect their awareness levels. Demolition areas are usually noisy, dirty and dangerous work environments. DO group members working in such environments often lack opportunities to learn about safety because daily workload and environmental factors may disrupt training and precautionary processes. In this context, in order to increase the training and awareness levels of demolition workers, it is necessary not only to provide information but also to change the safety culture and make the work environment safe. These findings indicate that the low awareness level of demolition workers may be due not only to lack of training but also to socio-economic and environmental factors. It is recommended that training modules aimed at increasing the health and safety awareness of demolition workers be made mandatory, made more accessible and applicable to workers, training materials be simplified and practical application opportunities be provided. In addition, workers should be able to express their concerns about exposure and have a more open communication channel about safety precautions.

In comparison, the SO group with 57.1% awareness displayed a better understanding of the potential dangers which is likely due to their environmental safety role. However, even this number is far from ideal. A 23.6% of the IP group comprising individuals present but not directly involved in the demolition, had any awareness of these risks. This low level of knowledge raises serious concerns about the adequacy of safety orientations and public communication efforts around demolition sites.

The study also found that the SO group was far more aware of the specific risks posed by asbestos, with 75% acknowledging that older buildings (constructed more than 23 years ago) likely contain asbestos. In contrast, only 14.8% of the DO group recognized this risk. This is alarming because, while the SO group is tasked with environmental oversight, the DO group is most directly exposed to these materials. The IP group, similarly underinformed at 23.6%, suggests that individuals who are indirectly affected (such as nearby residents) are being overlooked in terms of risk communication. These findings suggest a systemic issue: those who are most at risk are often the least informed, pointing to a clear need for more comprehensive training and education efforts targeted at demolition workers and the public. When we look at the awareness of asbestos-related health hazards, 74% of the DO group had some understanding, slightly higher than the 67.9% in the SO group, but again, only 20% in the IP group. While it is encouraging that the majority of DO workers are aware of the potential health risks, it raises the question of how deeply this knowledge extends. Is this awareness translating into action, such as the consistent use of protective equipment? Or is it a passive acknowledgment of the dangers without significant behavioral change? The fact that 20% of the IP group had any awareness of these health risks is particularly troubling, as they could unknowingly be exposed during or after demolition activities. This highlights a pressing need for broader community outreach and information dissemination.

A particularly striking result is the widespread recognition of asbestos exposure as a serious long-term health risk. In the SO group, every participant believed that exposure could lead to significant health problems, compared to 81.5% in the DO group and 85.5% in the IP group. While this near unanimous concern is promising, it also

underscores the gravity of the situation. Even though participants are aware of the risks, they are not being adequately protected or informed. This disconnect between knowledge and action reflects a systemic failure to provide the necessary tools and guidance to mitigate these risks.

One of the most alarming insights from this study is the lack of formal safety information provided to participants. Only 22.2% of the DO group, 10.7% of the SO group, and a staggering 5.5% of the IP group reported receiving any formal safety orientations on the risks of asbestos exposure. It suggests that even though awareness exists in some form it is not being backed up by institutional support or preventive measures. For example, research conducted in Japan after the 2011 Tōhoku Earthquake showed that post-disaster demolition activities can increase the release of asbestos, which can lead to long-term health problems. In particular, improper handling of asbestos-containing materials during demolition posed serious health risks to both workers and the surrounding public (Kato 2015). Similarly, studies conducted in the USA after Hurricane Katrina in 2005 highlighted that inadequate controls to prevent the release of hazardous substances such as asbestos during demolition and debris removal led to an increase in long-term health problems such as respiratory diseases and cancer (Fisher Wilson 2006). While such examples demonstrate the importance of post-disaster asbestos exposure management on a global level, findings obtained after the 2023 Kahramanmaraş earthquake in Turkey provide a new perspective on local conditions and post-disaster management approaches. Lack of awareness about asbestos exposure in post-disaster demolition activities in Turkey poses a major threat not only to demolition workers but also to the surrounding public. This study emphasizes the necessity of making post-disaster awareness programs and training modules mandatory and also reveals the importance of public campaigns for public awareness. This is a strategy similarly suggested in the international literature, a review study conducted after the 2010 Haiti Earthquake demonstrated the success of regular information campaigns to increase public safety in disaster areas (Van Leeuwen and Wiepking 2013).

This disconnect could stem from a lack of enforcement of existing regulations or from insufficient allocation of resources towards training and safety programs. The absence of comprehensive safety information leaves DO and IP alike vulnerable to immediate and long-term health risks. Without clear guidance on the proper use of protective equipment or protocols for handling asbestos exposure, the likelihood of mismanagement in these high-risk environments increases dramatically (Mavroulis et al. 2023). This is particularly concerning given the well documented latency period of asbestos related diseases (Järvholm and Burdorf, 2024), where the damage may not manifest until decades later. In such a scenario, unprotected exposure could have devastating consequences. Furthermore, the data suggests that the responsibility for ensuring safety is being disproportionately placed on the workers themselves, rather than being institutionally driven. This approach not only undermines the role of regulatory bodies but also perpetuates a dangerous cycle of insufficient prevention and delayed response. It becomes clear that without a shift towards a more preventive safety culture, the potential for future public health crises can remain high.

These findings lead us to several important conclusions. First, education is not reaching the right people. Those in the most immediate danger, such as the DO group, are not receiving the necessary training and information to protect themselves adequately. Second, the public remains largely uninformed, which is a significant failure of communication strategies, especially in densely populated areas where the risk of secondary exposure is high. Finally, there is a serious gap in the provision of protective equipment. Even if knowledge is increasing, without the right tools to act on that knowledge, the health risks posed by asbestos exposure remain unacceptably high.

Considering these results, a more coordinated multi-level approach is needed. This approach should include mandatory training for all demolition workers on the risks of asbestos, public awareness campaigns to inform nearby residents and stricter enforcement of protective measures on site. Additionally, institutions must take responsibility for ensuring that protective gear is not only available but enforced. The gap between awareness and action is too large and the consequences too severe to allow these issues to persist unaddressed.

4. Conclusions

Reducing the risks associated with asbestos exposure during demolition activities requires a multi-faceted approach tailored to the specific needs and risk levels of different groups. Demolition workers, who face the highest risk of direct exposure, must be equipped with advanced protective gear such as full-face masks, respirators with asbestos-grade filters, disposable protective overalls, and gloves. Proper training is essential to ensure that this equipment is used correctly and consistently. Furthermore, protocols for the safe disposal

of used equipment and asbestos-containing materials must be strictly followed to prevent secondary exposure.

Groups responsible for environmental safety, such as security personnel, should be provided with medium-level protective gear, including half-face masks and light protective clothing designed for mobility and prolonged use. These individuals must also receive regular training to enhance their understanding of site safety and asbestos management practices.

For the public and other groups indirectly affected by demolition activities, lower level but effective protection is crucial. Individuals living near demolition sites should be encouraged to use simple dust masks to minimize exposure. Demolition boundaries must be clearly marked with visible security tape, unauthorized access must be prohibited, and nearby residents should be regularly informed about ongoing risks and safety measures.

By implementing protection measures tailored to each group's risk level and needs, not only can immediate health risks be mitigated, but the long-term burden of asbestos-related diseases on society can also be reduced. These actions, combined with public education and robust safety protocols, represent an opportunity to build a safer, more informed approach to post-disaster demolition activities.

A comprehensive and inclusive strategy, rooted in collaboration among government agencies, local authorities, and public stakeholders, will ultimately lead to more effective management of asbestos risks and create a foundation for healthier communities in the wake of future disasters.

Declaration of Ethical Standards
The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement
Author 1: Research, Analysis, Writing – original draft, Figures, Data.
Author 2: Research, Analysis, Methodology / Study design, Writing – review and editing, Supervision.

Declaration of Competing Interest
The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article

Data Availability
All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

Acknowledgement

We gratefully acknowledge the Scientific and Technical Research Council of Türkiye (TÜBİTAK) for financially supporting this study with project 1919B012317689. Also we would like to thank the Presidency of Environment, Urbanization and Climate Change of the Republic of Türkiye and the governorships of Şanlıurfa, Adıyaman and Kahramanmaraş for their contributions and support to our study.

5. References

Baur, X., Woitowitz, H. J., Budnik, L. T., Egilman, D., Oliver, C., Frank, A., ... & Lemen, R. A. (2017). Asbestos, asbestosis, and cancer: The Helsinki criteria for diagnosis and attribution. Critical need for revision of the 2014 update. American journal of industrial medicine, 60(5). https://doi.org/10.1002/ajim.22709

Berry, G., & Liddell, F. D. K. (2004). The interaction of asbestos and smoking in lung cancer: a modified measure of effect. Annals of occupational hDOiene, 48(5), 459-462. https://doi.org/10.1093/annhyg/meh023

Bloise, A., Catalano, M., & Gualtieri, A. F. (2018). Effect of grinding on chrysotile, amosite and crocidolite and implications for thermal treatment. Minerals, 8(4), 135. https://doi.org/10.3390/min8040135

Boffetta, P., Donato, F., Pira, E., Luu, H. N., & La Vecchia, C. (2019). Risk of mesothelioma after cessation of asbestos exposure: a systematic review and meta-regression. International Archives of Occupational and Environmental Health, 92, 949-957. https://doi.org/10.1007/s00420-019-01433-4

Ceballos, D. M., Herrick, R. F., Dong, Z., Kalweit, A., Miller, M., Quinn, J., & Spengler, J. D. (2021). Factors affecting lead dust in construction workers' homes in the Greater Boston Area. *Environmental research*, *195*, 110510.

Dirisu, J. O., Oyedepo, S. O., Fayomi, O. S. I., Joseph, O. O., Akinlabi, E. T., Babalola, P. O., Udoye, N. E., Ajayi, O. O., Aworinde, A. K., Banjo, S. O., & Oluwasegun, K. M. (2022). Thermal-emission assessment of building ceilings from agro-industrial wastes. Fuel Communications, 10(100042), 100042. https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100042

Emmett, E. A. (2021). Asbestos in high-risk communities: Public health implications. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(4), 1579. https://doi.org/10.3390/ijerph18041579

Fisher Wilson, J. (2006). Health and the environment after Hurricane Katrina.

Furuya, S., Chimed-Ochir, O., Takahashi, K., David, A., & Takala, J. (2018). Global asbestos disaster. International journal of environmental research and public health, 15(5), 1000. https://doi.org/10.3390/ijerph15051000

Gualtieri, A. F., Lassinantti Gualtieri, M., Scognamiglio, V., & Di Giuseppe, D. (2022). Human health hazards

associated with asbestos in building materials. Ecological and health effects of building materials, 297-325. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76073-1_16

Harris, E. J., Musk, A., de Klerk, N., Reid, A., Franklin, P., & Brims, F. J. (2019). Diagnosis of asbestos-related lung diseases. Expert review of respiratory medicine, 13(3), 241-249. https://doi.org/10.1080/17476348.2019.1568875

Järvholm, B., & Burdorf, A. (2024). Asbestos and disease–a public health success story?. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, *50*(2), 53. https://doi.org/10.5271/sjweh.4146

Kato, M. (2015). The great earthquakes and asbestos. The Annual Reports of the Tohoku Sociological Society, 44, 25–38. https://doi.org/10.11271/tss.44.25

Kim, Y. C., Zhang, Y. L., Park, W. J., Cha, G. W., & Hong, W. H. (2020). Quantifying asbestos fibers in post-disaster situations: Preventive strategies for damage control. International Journal of Disaster Risk Reduction, 48, 101563. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101563

Klebe, S., Leigh, J., Henderson, D. W., & Nurminen, M. (2020). Asbestos, smoking and lung cancer: an update. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(1), 258. https://doi.org/10.3390/ijerph17010258

Krówczyńska, M., & Wilk, E. (2019). Environmental and occupational exposure to asbestos as a result of consumption and use in Poland. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(14), 2611. https://doi.org/10.3390/ijerph16142611

Magnani, C., Mensi, C., Binazzi, A., Marsili, D., Grosso, F., Ramos-Bonilla, J. P., ... & Marinaccio, A. (2023). The Italian experience in the development of mesothelioma registries: a pathway for other countries to address the negative legacy of asbestos. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(2), 936. https://doi.org/10.3390/ijerph20020936

Mavroulis, S., Mavrouli, M., Lekkas, E., & Tsakris, A. (2023). Managing Earthquake Debris: Environmental Issues, Health Impacts, and Risk Reduction Measures. *Environments*, *10*(11), 192.

Miao, X., Yao, T., Dong, C., Chen, Z., Wei, W., Shi, Z., ... & Yan, Y. (2024). Global, regional, and national burden of non-communicable diseases attributable to occupational asbestos exposure 1990–2019 and prediction to 2035: worsening or improving?. BMC Public Health, 24(1), 832. https://doi.org/10.1186/s12889-024-18099-4

Ngamwong, Y., Tangamornsuksan, W., Lohitnavy, O., Chaiyakunapruk, N., Scholfield, C. N., Reisfeld, B., & Lohitnavy, M. (2015). Additive synergism between asbestos and smoking in lung cancer risk: a systematic review and meta-analysis. PloS one, 10(8), e0135798. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135798

Nielsen, L. S., Baelum, J., Rasmussen, J., Dahl, S., Olsen, K. E., Albin, M., ... & Sherson, D. (2014). Occupational asbestos exposure and lung cancer—a systematic review of the literature. Archives of environmental & occupational health, 69(4), 191-206. https://doi.org/10.1080/19338244.2013.863752

Pawełczyk, A., & Božek, F. (2015). Health risk associated with airborne asbestos. Environmental Monitoring and Assessment, 187, 1-11.

Patel, D. J., & Patel, D. A. (2020, March). Assessing the potential health hazards of workers of demolition sector. In *Construction Research Congress 2020* (pp. 414-423). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

Republic of Turkey Official Gazette. (2010, August 29). Regulation on Health and Safety Measures in Asbestos-Related Work. Retrieved from https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/08/20100829-3.htm (Accessed December 4, 2024).

Sen, D. (2015). Working with asbestos and the possible health risks. Occupational Medicine, 65(1), 6-14. https://doi.org/10.1093/occmed/kqu175

Tetik, Y. Ö., Zümrüt, İ. B., Çamurcu, A. G., Kale, Ö. A., & Baradan, S. (2024). Measurement and removal of asbestos in residential dwellings to be demolished—urban transformation experience in Izmir, Turkey. Environmental Science and Pollution Research, 31(6), 9857-9866.

Valenzuela, M., Giraldo, M., Gallo-Murcia, S., Pineda, J., Santos, L., & Ramos-Bonilla, J. P. (2016). Recent scientific evidence regarding asbestos use and health consequences of asbestos exposure. Current Environmental Health Reports, 3(4), 335–347. https://doi.org/10.1007/s40572-016-0109-9

Van Leeuwen, M. H., & Wiepking, P. (2013). National campaigns for charitable causes: A literature review. *Nonprofit and voluntary sector quarterly*, *42*(2), 219-240.

Internet References

1- Government of Australia. (2020). Asbestos Code of Practice: Model Code of Practice: How to Safely Remove Asbestos. Safe Work Australia. Accessed February 8, 2024, from https://www.safeworkaustralia.gov.au/sites/default/files/2020-07/model_code_of_practice_how_to_safely_ remove_asbestos.pdf

2- National Institute for Occupational Safety and Health. (1992). NIOSH recommendations for occupational safety and health: Compendium of policy documents and statements (DHHS publication No. (NIOSH) 92-100). Accessed December 5, 2024, Retrieved from https://stacks.cdc.gov/view/cdc/6139

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1513268
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035403 (576-584)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035403 (576-584)

Characterization of Cosmetics Industry Wastewater and Treatment by Coagulation-Flocculation Process

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 09.07.2024
Kabul/Accepted: 17.01.2025
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Kozmetik Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu ve Koagülasyon-Flokülasyon Prosesi ile Arıtımı

Inci KARAKAS[1*], Soner KIZIL[2]

[1] *Uskudar University, Vocational School of Health Services, Department of Environmental Health, İstanbul, Türkiye.*
[2] *Uskudar University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, İstanbul, Türkiye.*

Öz

Kozmetik ürünlerin üretiminde çok çeşitli hammaddelerin kullanılması ve üretim aşamasındaki sürecin değişkenliği atık su karakterizasyonunu önemli ölçüde etkilemektedir. Kozmetik endüstrisi atıksuları biyolojik olarak parçalanabilirliği düşük bileşenler içermekle birlikte; amonyak, yağ ve gres, fosfor ve ağır metaller gibi çeşitli kirleticileri de içerebilmektedir. Kozmetik endüstrisinde bulunabilen ağır metaller kansere, nörolojik hastalıklara, genetik mutasyonlara, saç dökülmesine ve doğum kusurlarına neden olmaktadır. Bu çalışmada, gerçek kozmetik endüstrisi atıksuyundan alınan numunelerde pH, Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), Toplam Azot (TN), Toplam Fosfor (TP), Askıda Katı Madde (SS), Bakır (Cu), Çinko (Zn), renk ve Ortofosfat (PO_4-P) analizleri yapılarak, kanalizasyon deşarj kriterlerine uygunluğu araştırılmıştır. Kirleticilerin giderimi koagülasyon-flokülasyon prosesi ile araştırılmış ve giderim verimleri KOİ: %75; Cu: %92; Zn: %94; Renk: %84; TN: %99; TP: %91; PO_4-P: %92 olarak bulunmuştur. Yüksek KOİ giderimi elde etmek için farklı arıtma proseslerinin araştırılması gerekmektedir. Çevre ve insan sağlığının korunması için gerçek kozmetik endüstrisi atıksularının karakterize edilerek ağır metallerin belirlenmesi ve giderimine yönelik çalışmaların arttırılması önemli olacaktır.

Anahtar Kelimeler: *Kimyasal arıtma; koagülasyon-flokülasyon prosesi; kozmetik atıksuları; organik kirleticiler; ağır metaller.*

Abstract

The use of a wide variety of raw materials in the production of cosmetic products and the variability of the process during the production phase significantly affect wastewater characterization. Cosmetic industry wastewater contains low biodegradable components and may contain various pollutants such as ammonia, oil and grease, phosphorus and heavy metals. Heavy metals that can be found in the cosmetics industry cause cancer, neurological diseases, genetic mutations, hair loss and birth defects. In this study, pH, Chemical Oxygen Demand (COD), Total Nitrogen (TN), Total Phosphorus (TP), Suspended Solids (SS), Copper (Cu), Zinc (Zn), color and Orthophosphate (PO_4-P) analyses were carried out in samples taken from real cosmetic industry wastewater and their compliance with sewage discharge criteria was investigated. Pollutant removal was investigated by coagulation-flocculation process and removal efficiencies were found as COD: 75%; Cu: 92%; Zn: 94%; Color: 84%; TN: 99%; TP: 91%; PO_4-P: 92%. In order to achieve high COD removal, different treatment processes should be investigated. In order to protect the environment and human health, it will be important to increase the studies on the determination and removal of heavy metals by characterising the real cosmetics industry wastewater.

Keywords: *Chemical treatment; coagulation- flocculation process; cosmetic wastewaters; organic pollutants; heavy metals.*

1. Introduction

The growth in population and industrialization, various facilities have been established in different sectors to meet human needs. With increasing and diversifying industrialization, pollutant parameters are differentiated and wastewater with different characteristics are generated. Since access to potable and usable water is becoming more and more difficult, it is inevitable to treat the wastewater (Karakas *et al.* 2020; Kizil and Sonmez, 2022; Obotey Ezugbe and Rathilal, 2020). Cosmetic ınduster have one of devleoping sectors, which lead to the production of different types of products in industry. At the same time, environmental concern have been raised due to the increasing production of cosmetic wastewater.(Can *et al.* 2024).

In the cosmetics industry; various products such as shampoo, conditioner, hair dye, sunscreens, moisturizers are produced and wastewater is generated from the production of cosmetic products (Bayhan and Değermenci, 2017). Raw materials used in the production of cosmetic products include water, detergents, emulsifiers, dyes, organic solvents and essential oils (Lima *et al.* 2022; Turkay and Kizil, 2024). The steps followed in the production of cosmetic products include receiving,

**Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Inci Karakas* *e-posta / e-mail: inci.karakas@uskudar.edu.tr*

storing, weighing and sorting of raw materials, production, physicochemical and microbiological analysis, filling and packaging (Bom *et al.* 2019).

Cosmetic industry wastewater is generated as a result of cleaning and sterilizing equipment, instruments and floors and contains mostly organic matter, oil and grease, sulfides, ammonia, surfactants, phosphates and polyphosphates (Abidemi *et al.* 2018). Since cosmetic industry wastewater contains high concentrations of phosphates and polyphosphates, eutrophication can occur in receiving environments where the wastewater is discharged (Muisa *et al.* 2020). Substances such as paraben and triclosan, which are used as preservatives in cosmetic products, could be found in cosmetic industry wastewater and pose an environmental risk. These components can cause toxic effects on aquatic organisms and have negative effects on the environment and human health (Bilal *et al.* 2020). In addition, heavy metals are used as colorants or preservatives in cosmetics products and can damage the kidneys and nervous system (Mohammed *et al.* 2023; Raza-Naqvi *et al.* 2022). For instance, high concentrations of Cu in cosmetic wastewater are toxic and carcinogenic, causing respiratory problems, liver and kidney failure and gastrointestinal bleeding. Moreover, high concentrations of Zn can cause various health problems such as fever, stomach cramps, vomiting, anaemia and nausea, and can damage the kidney, liver and immune system (Abed *et al.* 2023).

In order to remove contaminants in wastewater, different processes have been applied for treatment of cosmetic wastewater (Akbay *et al.* 2022). These processes include coagulation (Michel *et al.* 2019), advanced oxidation (Naumczyk *et al.* 2014), membrane filtration (Huisman, 2004), membrane bioreactor (Monsalvo *et al.* 2014; Zhang *et al.* 2022), anaerobic bioreactor (Wiliński *et al.* 2017). Coagulation-flocculation is recognized as one of the most fundamental methods for wastewater treatment (Ahmad *et al.* 2024; Simate, 2015). The coagulation-flocculation process is to improve water quality by removing colloidal or suspended particles (Abu-Dalo *et al.* 2022). It is stated as a highly efficient and environmentally friendly process in terms of pollutant removal. It is an attractive option for wastewater treatment due to its easy operation and low cost (Fard *et al.* 2016; Kurniawan *et al.* 2023; Zhao *et al.* 2021). In the literature, $Al_2(SO_4)_3$, polymerized aluminum chloride, $FeSO_4$ and $FeCl_3$ were used as coagulants in the treatment of cosmetic industry wastewater and Chemical Oxygen Demand (COD) removal efficiency was found 75% (Naumczyk *et al.* 2014). It was reported that the removal of anionic surfactant was not effective (24%) in the coagulation process with $Al_2(SO_4)_3$ and $FeCl_3$ (Kaleta and Elektorowicz, 2013). In the coagulation process using $FeCl_3$, tonalide, galaxolide and celestolide removal in cosmetics industry wastewater was 83.4%, 79.2% and 77.7%, respectively (Suarez *et al.* 2009).

Detailed characterization studies using real cosmetic industry wastewater are insufficient in the literature. In addition, there are also insufficient studies in which the removal efficiencies of pollutant parameters are comprehensively investigated in Türkiye. The aim of this study was to supply characterization of cosmetic wastewaters with different pollutant composition and concentration, to extend the knowledge about these wastewaters and to investigate the removal of pollutants by coagulation-flocculation process.

In this study, the real wastewater was taken from the cosmetics industry in the Gebze Organised Industrial Zone (GOIZ) and the treatability of wastewater by coagulation-flocculation process was investigated using iron III chloride ($FeCl_3$), lime ($Ca(OH)_2$) and anionic polyelectrolyte ($(NH_4)_2S_2O_8$). Chemical Oxygen Demand COD, pH, Total Nitrogen (TN), Total Phosphorus (TP), Suspended Solids (SS), Copper (Cu), Zinc (Zn), color, and Orthophosphate (PO_4-P) parameters were monitored in wastewater. The suitability of effluent concentrations after coagulation-flocculation process in terms of sewage discharge criteria was investigated and removal efficiencies of pollutant compounds were determined.

2. Materials and Methods

2.1. Description of the Cosmetics Wastewater Treatment Plant and Sample Collection

The cosmetics industry is located GOIZ in Türkiye. The facility produces cosmetic products such as face, eye and nail care products and make-up materials. The facility is located in a total area of 7840 m^2. A total of 4m^3/day of wastewater is generated as a result of production. Homogeneous mixing of industrial wastewater is ensured in the equalization basin by aeration. The wastewater is treated with cationic polyelectrolyte and then oil are removed in the DAF unit. Acid cracking, coagulation and flocculation processes are applied to the wastewater respectively. In the first stage of the coagulation process, $Ca(OH)_2$ is added to the wastewater and in the second stage, $FeCl_3$ is added and rapid mixing is performed. After the coagulation process, $(NH_4)_2S_2O_8$ is added to the wastewater and the flocculation process is completed by observing a dense floc formation in the tank with slow mixing. Flocs are kept in the chemical settling tank for 2-4

hours. After chemical precipitation, the treated upper phase is taken from the wastewater and discharged to the sewage. Figure 1 shows the stages used in the cosmetics industry.

2.2. Sample Collection

Samples were taken three times a week and a total of 2 liters of composite samples were created, half a liter sample per hour. The obtained wastewater from the different stages used in production and stored at 4 °C in refrigerator before the analyses.

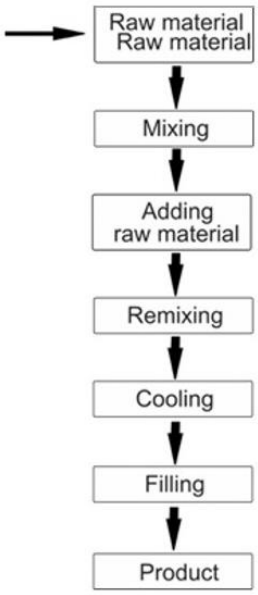


Fig. 1. Formation stages of wastewater in the cosmetics industry

2.3. Analysis Method

The COD, SS, Heavy metals (Cu and Zn), Color, TN, TP, PO_4-P and pH parameters are monitored in the raw and treated wastewater. The pH was measured using a pH meter. COD (K-7375), Cu (LCK-329), Zn (LCK-360), TP (TR-TP), TN (TR-TN) and PO_4-P (TR-PO_4) were carried out with Hach test kits. SS were determined according to Standard Methods (1994) (American Public Health Association, 1995). Color was analyzed using Hach lange DR300 spectrophotometer.

2.4. Coagulation-Flocculation Jar Test Procedure

Coagulation-flocculation study was carried out under laboratory conditions (24 °C) using a jar test device. During the research, 200 mL wastewater volume was used in the study. Each coagulation experiment was started by adding coagulant to the reactor containing wastewater, and then the appropriate initial pH was adjusted using HCl and NaOH. In the coagulation step, the reaction time was limited to 3 minutes and the process was continued at a stirring speed of 120 rpm (El Gaayda *et al.* 2023). The flocculation process was carried out at a mixing speed of 30 rpm with a contact time of 10 minutes (Kilic and Kumbasar, 2023). The precipitation step was determined as 45 minutes and at the end of the process, samples were taken from the upper phase and analyzed for COD, SS, Cu and Zn, Color, TN, TP, PO_4-P. The properties of the chemicals used are presented in Table 1 and Table 2. The values given in Table 3 were found using Table 1 and Table 2. The concentrations of coagulant used in the influent wastewater and the optimum pH values were determined at three different sets by Jar test in Table 3. Images of all jar tests applied to cosmetic industry wastewater is given in Figure 2. The percentage removal efficiency (E) was calculated according to the equation:

$$E(\%)= (C_0-C)/ C_0*100 \quad (1)$$

where: C_0 and C are, respectively, the initial and final values, as determined in raw wastewater (influent) and decanted supernatant liquid after coagulation-flocculation (effluent).

3. Results and Discussions

The parameters and concentrations monitored in cosmetics industry wastewater vary according to the process and the studies are summarized in Table 4. Cosmetics industry effluent is aimed to ensure GOIZ sewage discharge criteria. GOIZ sewage discharge limit values of treated wastewater and the characterization of real cosmetic industry wastewater is summarized in Table 5.

The standard for discharge to sewage between all jar tests was achieved with chemical concentrations applied in set 3. In the cosmetic industry wastewater 5% $Ca(OH)_2$, 40% $FeCl_3$ and 0.1% $(NH_4)_2S_2O_8$ in coagulation-flocculation. In the coagulation flocculation process, 1.250 mL $FeCl_3$, 0.170 g $Ca(OH)_2$ and 0.011 g $(NH_4)_2S_2O_8$ were applied in Set 3, respectively in Table 3.

Table 1. Properties of the chemicals used

	Coagulants and Chemicals					
	HCl	**NaOH**	**$FeCl_3$**	**$(NH_4)_2S_2O_8$**	**H_2SO_4**	**$Ca(OH)_2$**
Concentration	37%	45%	40%	0.1%	98%	5%
Density (g/cm³)	1.180	1.32	1.435	0.75	1.83	2.21
Mole (g/mole)	36.5	40	162	228	98.08	74.09
Molar concentration (mol/m³)	11.962	14.850	3.543	0.003	18.285	1.491

Table 2. Consumption of coagulants according to set 3 for 200 mL sample

Coagulants	Concentration	Consumption (mL)	Density(d) (g/cm^3)	Consumption (g)
$FeCl_3$	%40	1.250	1.435	0.718
$(NH_4)_2S_2O_8$	%0.1	-	0.75	0.011
$Ca(OH)_2$	%5	-	2.21	0.170

Table 3. Coagulants used in the study, effective volume, doses and pH values

		Doses			pH values		
		Set 1	Set 2	**Set 3**	Set 1	Set 2	**Set 3**
	Effective volume in sets	(100 mL)	(100 mL)	(200 mL)	(100 mL)	(100 mL)	(200 mL)
Coagulants and Chemicals	HCl (mL)	1.050 mL	1.050 mL	**-**	1.97	1.97	**-**
	NaOH (mL)	0.800 mL	0.800 mL	**-**	11.02	11.02	**-**
	$FeCl_3$ (mL)	1.200 mL	1.200 mL	**1.250 mL**	8.47	8.47	**4**
	$(NH_4)_2S_2O_8$ (g)	0.053 g	0.008 g	**0.011 g**	8.47	8.47	**8.61**
	$Ca(OH)_2$ (g)	**-**	**-**	**0.170 g**	**-**	**-**	**8.61**

Table 4. Raw wastewater characteristics from cosmetic industries

	Parameters				**Reference**
pH	**COD (mg/L)**	**TN (mg/L)**	**TP (mg/L)**	**SS (mg/L)**	
1-12	1000-5000	-	-	450-1440	(Araujo *et al.* 2008)
7.1	9700	-	-	-	(Alves, 2009)
6-8	4000-15000	-	-	80-160	(de Oliveira *et al.* 2009)
5.5	13570	107.37	-	2340	(Friha *et al.* 2014)
7.2	15339	-	1.4	-	(Marchetti, 2014)
4.52	7940	-	-	1900	(Bayhan and Değermenci, 2017)
11.4	7125	-	-	-	(de Melo *et al.* 2018)
7.27	1140	-	-	18	(Muszyński *et al.* 2019)
-	1042	-	-	22	(Reinehr *et al.* 2019)
-	5960	-	0.4	-	(Araújo *et al.* 2022)
11.8	**9160**	**81**	**19.3**	**3000**	**Present Study Value**

pH, COD, TN, TP, SS, Cu, Zn, Color, and PO_4-P parameters were monitored in real cosmetic industry influent wastewater. In this study, the concentration of COD in the influent wastewater was found 9160 mg/L in accordance with the literature (de Oliveira *et al.* 2009). While Friha have found TN as 107.37 mg/L in the study, it was found as 81 mg/L in this study which close to the literature (Araujo *et al.* 2008). Also, TP concentration was found 19.3 mg/L in influent wastewater, while TP concentrations in the literature were found very low at 1.4 mg/L (Marchetti, 2014) and 0.4 mg/L (Araujo *et al.* 2008). SS concentration was determined as 3000 mg/L in present study, which was higher than the values given in the literature. In addition, the pH value is 11.8 in influent wastewater in this study is similar to the literature (Araujo *et al.* 2008; de Melo *et al.* 2018). When heavy metal and PO_4-P concentrations are considered in influent wastewater; Cu, Zn and PO_4-P concentration were determined as 6.07 mg/L, 3.5 mg/L and 6.25 mg/L, respectively. The color was found to be 880 Pt-Co. Cu, Zn, Color, and PO_4-P parameters were not available in the literature.

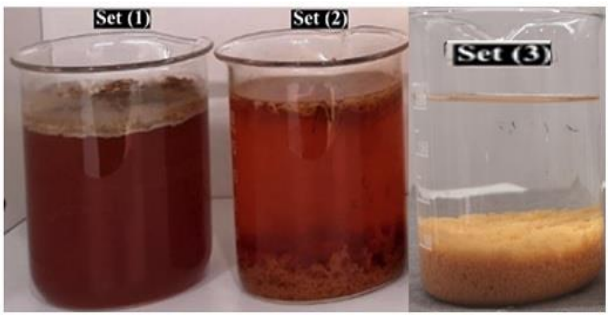


***Fig. 2**. Jar test images*

Table 5. Influent and Effluent concentrations, removal rate and discharge criteria

Parameter	Influent concentrations	Effluent concentrations	Removal Rate (%)	Discharge criteria*
COD (mg/L)	9160	2260	75	4000
pH	11.8	8.8	-	6.5-10
SS (mg/L)	3000	<50	-	500
Cu (mg/L)	6.07	0.48	92	2
Zn (mg/L)	3.5	0.22	94	10
Color (Pt-Co)	880	144	84	-
TN (mg/L)	81	1	99	80
TP (mg/L)	19.3	1.8	91	2
PO_4-P (mg/L)	6.25	0.5	92	-

***** Discharge criteria: GOIZ discharge criteria *(Water Pollution Control Regulation, Table 25)*

In this study, three jar tests were performed. As can be seen from Figure 2, the image with the best collapse in the jar test results was the Set 3. The results obtained from the first two jar tests did not provide optimum settling and removal of color. In addition, the standard for discharge to sewage could not be achieved in these results. The influent wastewater concentration, jar test results in Set 3 (effluent concentration) and removal efficiencies are given in Table 5.

COD, Cu, Zn, Color, TN, TP and PO_4-P concentration and removal rate were monitored in present study. COD removal was found 75% as seen in Table 5. COD removal from dye industry wastewater was investigated using $FeCl_3$ and dragon fruit peel. COD removal was determined between 38% and 46% using 5 mg/L $FeCl_3$ and dragon fruit peel at precipitation time of 40 min and pH 6.0 (Nguyen *et al.* 2022). In the removal of dye from industrial wastewater by coagulation-flocculation, 98% COD removal was determined at pH 11.25-11.7 using 4.07-4.25 mL $AlCl_3$ (Harfaoui *et al.* 2023). In a different study, 67% COD removal was determined in the treatment of olive mill wastewater by coagulation-flocculation using 5 g/L lime and 4 g/L alum (Fleyfel *et al.* 2024). The effect of pH on COD removal was investigated and COD removal was 32% at pH 9.0 in the coagulation process using $FeCl_3$. The lowest removal efficiency was observed 20% at pH 6.0 (Naumczyk *et al.* 2014). Similarly, using physicochemical treatment processes COD removal rate was 36.5% at hair care products wastewaters (de Melo *et al.* 2013) and 31.7% (Comin, 2017) in the literature.

It is reported that coagulation is very effective in COD removal and up to 90% COD removal is achieved in the literature. In a study using cosmetics industry wastewater, COD removal efficiency was found in the range of 13-21% as a result of the coagulation process. The low removal efficiency was associated with the lack of suspensions and colloids in the wastewater (Muszyński *et al.* 2019). It was clearly seen that it was above the COD removal efficiencies in the literature in this study. Since the main purpose of this study was to supply the criteria for discharge to sewage, the effluent wastewater concentration of 2260 mg/L was suitable for the criteria.

Cu was found above the discharge criteria for sewage while Zn was found below the discharge criteria in the influent wastewater. Cu and Zn compounds removal efficiencies were found 92% and 94%, respectively. Zn removal was found to be 63% and copper removal was found to be 77% as a result of coagulation-flocculation treatment of textile industry wastewater using aluminium sulphate (Bouaouine *et al.* 2017). In another study investigating copper and zinc removal from palm oil industry wastewater using moringa as a coagulant, removal efficiencies were found to be 94% and 82%, respectively (Jagaba *et al.* 2021). The results obtained for Cu and Zn compounds in this study are in parallel with the literature. In this study, Cu and Zn compounds in the effluent wastewater concentration supplied the discharge limits.

In this study the color removal was found to be 84%. The color in the effluent was determined as 144 Pt-Co. In the coagulation process using aluminum sulfate, the color removal efficiency was 93.63% (Araujo *et al.* 2008). Removal of indigo blue dye from an industrial wastewater using $AlCl_3$ by coagulation-flocculation process was investigated. Color removal was found to be 98.21% at pH 11.25, using coagulant dose of 4.07 mL and flocculant dose of 0.94 mL (Harfaoui *et al.* 2023). In the coagulation flocculation process using plant-based and chemical coagulants, color removal was 59.42% and COD removal was 54.63% with the addition of 0.79 mg/L plant-based coagulant. In the same study, colour removal was 97.29% and COD removal was 75.31% with the addition of 698.4 mg/L alum (Ahmad *et al.* 2024). In another study, the combination of coagulation-flocculation using PACl and hydrodynamic cavitation with O_3 was evaluated for the treatment of textile wastewater. The color removal was

92.9% and COD removal was 84.1% (Marques *et al.* 2025). In the treatment of textile wastewater, colour removal was 59.6% and COD removal was 70.7% using PGα21Ca in coagulation-flocculation process (Mohanraj *et al.* 2023). It is seen that the color removal in this study is compatible with the literature.

TN removal efficiency in cosmetic industry wastewater was found to be 99% in this study, TN was almost completely removed by supplying the discharge limit. In Set 3 with the coagulation flocculation process carried out with the chemicals applied, sewage discharge limit values were supplied for TP. In this study, TP effluent concentration was found 1.8 mg/L and removal efficiency was 91%. Pretreatment of landfill leachate by coagulation-flocculation was investigated. Under optimum conditions (polymeric iron sulfate: 12.18 g/L, initial pH: 8.12 and polyacrylamide: 11.29 mg/L), COD removal was 62.30 % and TP removal was 95.79 % (Zhang *et al.* 2023). The PO_4-P concentration in the effluent was 0.5 mg/L and the removal efficiency was found 92%. Also, there is no limit value determined for PO_4-P among GOIZ sewage discharge standards. As seen in Table 5, all of the pollutants detected in this study and included in the Water Pollution Control Regulation supplied the discharge criteria.

4. Conclusions

The cosmetic industry wastewater, which varies greatly in terms of pollutant type, was characterized and effluent wastewater found to be in compliance with sewage discharge standards by using coagulation-flocculation process. In addition, the removal of COD, Cu, Zn, Color, TN, TP and PO_4-P was investigated. In this study, while COD removal rate was found 75%; Cu and Zn removal efficiency was 92% and 94% and Color, TN, TP and PO_4-P removal rate are ≥84%.

In this study, different treatment processes should be investigated for more effective COD removal. Further studies and detailed characterization of cosmetic industry wastewater are needed to better characterize the environmental risks posed by cosmetic industry wastewater and to determine appropriate treatment processes. Additionally, when investigating the characterization of cosmetic industry wastewater, examining parameters such as sulfides, oil-grease and conductivity may be important in determining appropriate treatment processes. It is important to detail production processes in the cosmetics industry to reduce water consumption and treat wastewater with high treatment performance. The diversity of raw materials to be used and the differences in production processes lead to the formation of wastewater that can vary widely. The composition and concentration of pollutants in wastewater from the cosmetics industry can vary depending on changes in production and time. The pollutant concentration of these wastewaters is usually high and resistant to biological treatment and the pollutant concentration is usually high. Determining sustainable treatment technologies will be important in terms of protecting water resources and removing treatment-resistant pollutants can be achieved.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Sources, Research, Experiment, Methodology, Writing- original draft Visualisation, Writing- original draft.

Author-2: Research, Formal analysis, Verification, Visualisation, Writing- original draft.

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability Statement

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

5. References

Abed, M.S., Moosa, A.A., Alzuhairi, M.A., 2023. Heavy metals in cosmetics and tattoos: a review of historical background, health impact, and regulatory limits. *Journal of Hazardous Materials Advances, **13**,* 100390-100407. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100390

Abidemi, B.L., James, O.A., Oluwatosin, A.T., Akinropo, O.J., Oraeloka, U.D., Racheal, A.E., 2018. Treatment technologies for wastewater from cosmetic industry–A review. *International Journal of Chemical and Biomolecular Science* **4**, 69–80.

Abu-Dalo, M., Abdelnabi, J., Al-Rawashdeh, N.A., Albiss, B., Al Bawab, A., 2022. Coupling coagulation-flocculation to volcanic tuff-magnetite nanoparticles adsorption for olive mill wastewater treatment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* **17**, 100626-100637. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100626

Ahmad, A., Abdullah, S.R.S., Hasan, H.A., Othman, A.R., Kurniawan, S.B., 2024. Aquaculture wastewater treatment using plant-based coagulants: Evaluating removal efficiency through the coagulation-flocculation process. *Results in Chemistry*, **7**, 101390-101398. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101390

Akbay, H.E.G., Akarsu, C., Isik, Z., Belibagli, P., Dizge, N., 2022. Investigation of degradation potential of polyethylene microplastics in anaerobic digestion process using cosmetics industry wastewater. *Biochemical Engineering Journal* **187,** 108619-108628. https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108619

Alves, S.S., 2010. Conservação e reúso de água em indústria de cosméticos: estudo de caso da Natura Cosméticos. Universidade de São Paulo.

Araujo, D.J., Rocha, S.M.S., Cammarota, M.C., Xavier, A.M.F., Cardoso, V.L., 2008. Anaerobic treatment of wastewater from the household and personal products industry in a hybrid bioreactor. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **25**, 443–451. https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000300002

Araújo, N.S., Souza, N.F., de Lima-Faria, J.M., Paz, A.T.S., Scalize, P.S., de Sabóia-Morais, S.M.T., Junior, H.C.R., da Conceição, E.C., 2022. Treatment of cosmetic industry wastewater by flotation with Moringa oleifera Lam. and aluminum sulfate and toxicity assessment of the treated wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 1199–1209. https://doi.org/10.1007/s11356-021-15722-4

Bayhan, Y.K., Değermenci, G.D., 2017. Kozmetik atık sularından fenton prosesiyle organik madde gideriminin ve kinetiğinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **32 (1),** 181-188. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.300609

Bilal, M., Mehmood, S., Iqbal, H.M., 2020. The beast of beauty: environmental and health concerns of toxic components in cosmetics. *Cosmetics,* **7(1)**, 13-30. https://doi.org/10.3390/cosmetics7010013

Bom, S., Jorge, J., Ribeiro, H.M., Marto, J., 2019. A step forward on sustainability in the cosmetics industry: A review. *Journal of cleaner production,* **225**, 270–290. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.255

Bouaouine, O., Baudu, M., Khalil, F., Chtioui, H., Hicham, Z., 2017. Comparative study between Moroccan cactus and chemicals coagulants for textile effluent treatment, *Journal of Materials and Environmental Science*, **8,** 2687–2693.

Can, O.T., Gündoğdu, H., Keyikoğlu, R., ELİBOL, P.S., Aygün, A., İşleyen, M., 2024. Kozmetik sanayi atıksularının boron doped diamond, platin ve metaloksit elektrotlar ile elektrooksidasyon prosesinde arıtılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **30**, 81–86. https://doi.org/10.5505/pajes.2023.85249

Comin, A.M., 2017. Proposta de tratamento complementar ao efluente proveniente de uma indústria de cosméticos, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre.

De Melo, E.D., Mounteer, A., Reis, E., Costa, E., Vilete, A., 2018. Screening of physicochemical treatment processes for reducing toxicity of hair care products wastewaters. *Journal of Environmental Management,* **212**, 349–356. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.036

De Melo, E.D., Mounteer, A.H., de Souza Leão, L.H., Bahia, R.C.B., Campos, I.M.F., 2013. Toxicity identification evaluation of cosmetics industry wastewater. *Journal of Hazardous Materials,* **244**, 329–334. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.11.051

De Oliveira, D.S., Prinholato, A.C., Ratusznei, S.M., Rodrigues, J.A.D., Zaiat, M., Foresti, E., 2009. AnSBBR applied to the treatment of wastewater from a personal care industry: effect of organic load and fill time. *Journal of Environmental Management*, **90**, 3070–3081. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.04.019

El Gaayda, J., Rachid, Y., Titchou, F.E., Barra, I., Hsini, A., Yap, P.-S., Oh, W.-D., Swanson, C., Hamdani, M., Akbour, R.A., 2023. Optimizing removal of chromium (VI) ions from water by coagulation process using central composite design: Effectiveness of grape seed as a green coagulant. *Separation and Purification Technology*, **307**, 122805-122819. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122805

El Harfaoui, S., Zmirli, Z., Mohssine, A., Driouich, A., Sallek, B., Digua, K., & Chaair, H., 2023. Model development for the treatment of industrial wastewaters by the coagulation–flocculation process: an easy tool for linking experimental to theoretical data. *Desalination and Water Treatment*, ***291***, 72-91. https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29457

Fard, A.K., Rhadfi, T., Mckay, G., Al-marri, M., Abdala, A., Hilal, N., Hussien, M.A., 2016. Enhancing oil removal from water using ferric oxide nanoparticles doped carbon nanotubes adsorbents. *Chemical Engineering Journal*, **293,** 90–101. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.02.040

Fleyfel, M. L., Matta, J., Sayegh, F. N., El Najjar, H. N., 2024. Olive mill wastewater treatment using coagulation/flocculation and filtration processes, *Heliyon,* **10**, e40348. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40348.

Friha, I., Karray, F., Feki, F., Jlaiel, L., Sayadi, S., 2014. Treatment of cosmetic industry wastewater by submerged membrane bioreactor with consideration of microbial community dynamics. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **88**, 125–133. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.12.015

Huisman, I., 2004. Optimising UF for wastewater treatment through membrane autopsy and failure analysis. *Filtration & Separation*, **41**, 26–27. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(04)00146-6

Jagaba, A.H., Kutty, S.R.M., Hayder, G., Baloo, L., Ghaleb, A.A.S., Lawal, I.M., Abubakar, S., Al-dhawi, B.N.S., Almahbashi, N.M.Y., Umaru, I., 2021. Degradation of Cd, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn by Moringa-oleifera, zeolite, ferric-chloride, chitosan and alum in an industrial effluent. *Ain Shams Engineering Journal,* **12**, 57–64. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.06.016

Kaleta, J., Elektorowicz, M., 2013. The removal of anionic surfactants from water in coagulation process. *Environmental Technology*, **34**, 999–1005. https://doi.org/10.1080/09593330.2012.733415

Karakas, I., Sam, S.B., Cetin, E., Dulekgurgen, E., Yilmaz, G., 2020. Resource recovery from an aerobic granular sludge process treating domestic wastewater. *Journal of Water Process Engineering,* **34**, 101148-101156. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101148

Kılıç, M.Y., Kumbasar, P., 2023. Çinko-Nikel Alaşım Kaplama Atıksularının Kimyasal Arıtabilirliğinin Araştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, **28**, 307–316. https://doi.org/10.17482/uumfd.1249112

Kizil, S., Sonmez, H.B., 2022. Organogels and hydrogels for oil/water separation, in: Oil− Water Mixtures and Emulsions, Volume 2: Advanced Materials for Separation and Treatment. ACS Publications, pp. 25–50. https://doi.org/10.1021/bk-2022-1408

Kurniawan, S.B., Ahmad, A., Imron, M.F., Abdullah, S.R.S., Hasan, H.A., Othman, A.R., Kuncoro, E.P., 2023. Performance of Chemical-Based vs Bio-Based Coagulants in Treating Aquaculture Wastewater and Cost-benefit Analysis. *Polish Journal of Environmental Studies,* **32**. 1177-1187. https://doi.org/10.15244/pjoes/156419

Lima, J.P.P., Melo, E.D., Aguiar, A., 2022. Characteristics and ways of treating cosmetic wastewater generated by Brazilian industries: A review. *Process Safety and Environmental Protection,* **168**, 601–612. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.031

Marchetti, T., 2014. Tratamento de efluente líquido da indústria de cosméticos com sulfato de alumínio e biopolímero. Revista da Graduação 7.

Marques, G. D., Domingos, M. F. J., Nolasco, A. M., Campos, V., 2025. Textile effluent treatment using coagulation-flocculation and a hydrodynamic cavitation reactor associated with ozonation. *Chemical Engineering Science*, **304,** 121094. https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.121094

Mohammed, F., Ahmed, M.A., Oraibi, H.M., 2023. Health risk assessment of some heavy metals in lipsticks sold in local markets in Iraq. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*, **10**, 147–160. https://doi.org/10.18596/jotcsa.1154686

Mohanraj, R., Gnanamangai, B.M., Pommurugan, P., 2023. Kinetic modeling and process optimization of textile effluent treatment with bacterial gamma polyglutamic acid. *Journal of Environmental Biology,* **44**, 175–184. https://doi.org/10.22438/jeb/44/2/MRN-4068.

Monsalvo, V.M., Lopez, J., Mohedano, A.F., Rodriguez, J.J., 2014. Treatment of cosmetic wastewater by a full-scale membrane bioreactor (MBR). *Environmental Science and Pollution Research,* **21**, 12662–12670. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3208-x

Muisa, N., Nhapi, I., Ruziwa, W., Manyuchi, M.M., 2020. Utilization of alum sludge as adsorbent for phosphorus removal in municipal wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering* **35**, 101187. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101187

Muszyński, A., Marcinowski, P., Maksymiec, J., Beskowska, K., Kalwarczyk, E., Bogacki, J., 2019. Cosmetic wastewater treatment with combined light/Fe0/H2O2 process coupled with activated sludge. *Journal of Hazardous Materials*, **378**, 120732-120740. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.06.009

Naumczyk, J., Bogacki, J., Marcinowski, P., Kowalik, P., 2014. Cosmetic wastewater treatment by coagulation and advanced oxidation processes. *Environmental Technology,* **35**, 541–548. https://doi.org/10.1080/09593330.2013.808245

Nguyen, H. H., Tran, L. N., Luu, L. M., Nguyen, Q. T., Van Pham, Q., Van Ngo, A., & Le, O. T. H., 2022. Coagulation and flocculation of dye wastewater by FeCl3 and mucilage extracted from dragon fruit peel (Hylocereus undatus) in regard of side effects caused by the use of PACl and PAM. *Desalination and Water Treatment*, ***250***, 181-188. https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28152

Obotey Ezugbe, E., Rathilal, S., 2020. Membrane technologies in wastewater treatment: a review. *Membranes*, **10,** 89. https://doi.org/10.3390/membranes10050089

Raza-Naqvi, S.A., Idrees, F., Sherazi, T.A., Anjum-Shahzad, S., Ul-Hassan, S., Ashraf, N., 2022. Toxicology of heavy metals used in cosmetics. *Journal of the Chilean Chemical Society,* **67**, 5615–5622. http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072022000305615

Reinehr, R.C.R., Giordanni, P.R., Alves, A. de A., Klen, M.R.F., Tones, A.M., 2019. Application of the statistical experimental design to optimize the electrocoagulation technology in the treatment of cosmetic industry wastewater. *Desalination and Water Treatment*, **138**, 27–35. https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23282

Simate, G.S., 2015. The treatment of brewery wastewater for reuse by integration of coagulation/flocculation and sedimentation with carbon nanotubes

'sandwiched'in a granular filter bed. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **21**, 1277–1285. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.06.001

Suarez, S., Lema, J.M., Omil, F., 2009. Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation–flocculation and flotation. *Bioresource technology*, **100**, 2138–2146. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.015

Turkay, S., Kizil, S., 2024. Forensic examination of lipsticks as trace evidence under different environmental conditions. T*urkish Journal of Engineering*, **8**, 353–369. https://doi.org/10.31127/tuje.1363676

Wiliński, P.R., Marcinowski, P.P., Naumczyk, J., Bogacki, J., 2017. Pretreatment of cosmetic wastewater by dissolved ozone flotation (DOF). *Desalination and Water Treatment*, **71**, 95–106. https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20552

Zhang, L., Wang, L., Zhang, Y., Wang, D., Guo, J., Zhang, M., Li, Y., 2022. The performance of electrode ultrafiltration membrane bioreactor in treating cosmetics wastewater and its anti-fouling properties. *Environmental Research*, **206**, 112629. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112629

Zhao, C., Zhou, J., Yan, Y., Yang, L., Xing, G., Li, H., Wu, P., Wang, M., Zheng, H., 2021. Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review. *Science of The Total Environment*, **765**, 142795-142812. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142795

Zhang, X., Han, H., Chai, H., Gao, P., Wu, W., Li, M., Gao, P., 2023. Pre-treatment of landfill leachate via coagulation-flocculation: Optimization of process parameters using response surface methodology (RSM). *Journal of Water Process Engineering*, ***54***, 103937.

Internet Reference

1-https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103937
http://www.saydamcevre.com.tr/mevzuatdosya/su-kirliligi-kontrol-yonetmeligi.pdf
(14.01.2025)

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1545691
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035501 (585-603)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035501 (585-603)

Havalimanlarında Hava Kalite Parametrelerinin Sentinel-5P Uydu Verileri ile İncelenmesi: İstanbul ve Rize-Artvin Havalimanı Örneği

Examination of Air Quality Parameters in Airports with Sentinel-5P Satellite Data: A Case Study for Istanbul and Rize-Artvin Airports

***Makale Bilgisi / Article Info**
Alındı/Received: 09.09.2024
Kabul/Accepted: 26.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Nur YAĞMUR AYDIN*

Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Öz

Havalimanları toplumun ulaşım ihtiyacının önemli bir kısmını karşılamaktadır. Ancak, kentleşmenin artışı ile yeni havalimanlarının inşaatı için elverişli alanlar azalmış, şehre uzak noktalarda rehabilite edilmiş alanlara veya denize dolgu alanlara inşa edilmeye başlanmıştır. Ancak doğal ekosistemin tahrip edilmesiyle inşa edilen bu yapıların, çevreye verebileceği olası zararların izlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda izlenmesi gereken çevresel etkilerden biri, yeni inşa edilen bu havalimanlarının etkilediği hava kalitesidir. Uzaktan algılama kaynakları, yer istasyonları gibi nokta bazlı bir veri kaynağı olmamakla birlikte belirli periyotlarda veri sağlayarak mekânsal ve zamansal analizlere olanak sağlamaktadır. Çalışma kapsamında, ülkemizde en son faaliyete açılan İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı üzerinde hava kalite parametrelerinde meydana gelen değişimler uydu kaynaklarından elde edilen aylık zaman serileri ile incelenmiştir. Sentinel-5P uydusu ile ultraviyole aerosol indeks (UV), karbon monoksit (CO), azot dioksit (NO_2), ozon (O_3) ve kükürt dioksit (SO_2) hava kalite parametrelerinin 2018-Mayıs 2024 periyodu için zaman serileri Google Earth Engine bulut platformu kullanılarak elde edilmiştir. Parametre bazında incelenen zaman serisi analizlerinde, UV, SO_2, NO_2 ve O_3 parametrelerinde artan bir eğilim tespit edilirken, CO parametresinde stabil bir eğilim görülmüştür. Gerçekleştirilen istatistiksel analizler doğrultusunda uçak trafiği verileri ile CO ve NO_2 parametreleri arasında pozitif korelasyonların (havalimanları özelinde sırasıyla CO parametresi ile 0.48 ve 0.41, NO_2 parametresi ile 0.66 ve 0.73) yanı sıra istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Havalimanı; Sentinel-5P; Hava kalitesi; Zaman serisi analizi; Granger Nedensellik testi; Google Earth Engine.*

Abstract

Airports meet a significant part of the transportation needs of society. However, with the increase in urbanization, the areas suitable for the construction of new airports have decreased, and they have started to be built on rehabilitated areas or on sea-filled areas. However, it is necessary to monitor the possible damage of these structures, which are built by destroying the natural ecosystem. In this context, one of the environmental impacts to be monitored is air quality. Remote sensing enables spatio-temporal analysis since they are not point-based data sources and provide data at specific periods. In the study, changes in air quality parameters at two new airports (Istanbul Airport and Rize-Artvin Airport) were examined with time series analysis. Time series of five air quality parameters (ultraviolet aerosol index (UV), carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2), ozone (O_3) and sulfur dioxide (SO_2)) for the period 2018-May 2024 were obtained using the Google Earth Engine cloud platform with the Sentinel-5P satellite. In the time series analyzes examined on a parameter basis, an increasing trend was detected in UV, SO_2, NO_2, and O_3 parameters, while a stable trend was observed in CO parameter. In line with the statistical analyses performed, positive correlations between aircraft traffic data and CO and NO_2 parameters (0.48 and 0.41 with CO parameter, 0.66 and 0.73 with NO_2 parameter, respectively, for airports), as well as statistically significant results were obtained.

Keywords: *Airport; Sentinel-5P; Air quality; Time series analysis; Granger-Causality test; Google Earth Engine.*

1. Giriş

Nüfus artışı, kentsel yapılaşmada artışın yanı sıra ulaşım sistemlerinde de ihtiyacın artmasına neden olmaktadır. Ulaşım sistemlerinin büyük çoğunluğunu karayolları oluştururken, ikinci sırada havayolları gelmektedir (ÇŞİDB 2023). Havayolları, gerek yurt içi gerekse yurt dışı ulaşım ve taşımacılık sektörlerinde aktif rol oynamaktadır. Bu sebeple, yeni havalimanlarına gereksinim gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde Türkiye'de sivillerin kullandığı 59 havalimanı mevcuttur ve son 20 yılda havalimanı sayısında ciddi bir artış olduğu görülmektedir. Ancak artan şehirleşme ile elverişli alanların azalması ve havalimanı gibi büyük ölçekli altyapıların inşaatına uygun yer eksikliği sebebiyle, dolgu alanlar veya rehabilite edilerek

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nur Yağmur Aydın
e-posta / e-mail: nyagmur@gtu.edu.tr

kazandırılmış alanlar üzerine havalimanları inşa edilmeye başlanmıştır (Liu vd. 2019). Her ne kadar havalimanlarının inşası toplumsal fayda açısından önemli olsa da, rehabilite alanlarına ya da deniz dolgusu üzerine inşa edilmeleri ciddi çevresel sonuçları da beraberinde getirecektir.

Havacılığın insan ve doğal kaynaklar üzerindeki çevresel etkileri ABD'de Ulaştırma Araştırma Kurulu tarafından hazırlanan raporda; gürültü, hava kalitesi, su kalitesi ve iklim değişikliği olarak listelenmektedir (TRC 2021). Bu kapsamda, artan nüfus ile beraber yolcu sayısının artışı havacılık sektörünün faaliyetlerini de arttırdığından, havalimanlarının çevresel etkilerini takip etmek daha da önemli bir hal almıştır. Uçaklardan kaynaklanan emisyonların hava kirliliği, insan sağlığı, ozon tabakası, sera gazları ve iklim değişikliği üzerinde çeşitli olumsuz etkileri mevcuttur (Elbir 2008, Lee vd. 2010). Özellikle hava kirliliği, hem toplum sağlığını hem de iklim değişikliğini etkilediğinden takibi ve değişiminin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Hava kirleticilerin etkisini azaltmaya yönelik güvenilir bir tahmin ve karar alma modeli kurulabilmesi için hava kalitesinin sürekli ve doğru bir şekilde izlenmesi gereklidir (Hou vd. 2019).

Uçak egzoz emisyonları, havacılık yakıtı olan kerosenin yanmasından kaynaklanmaktadır (Elbir 2008). Bir hava taşıtından kaynaklanan bu emisyonlar temel olarak karbondioksit (CO_2), su buharı (H_2O), azot oksitler (NO_x), çeşitli sülfür oksitler (SO_x), karbon monoksit (CO), çeşitli metan dışı hidrokarbonlar (NMHC), partikül madde (PM), uçucu organik bileşikler ve diğer bileşikleri içerir (Kesgin 2006). Çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olduğu bilinen bu emisyonların miktarının ve etkilerinin belirlenmesi önemlidir. Bu sebeple, uçaklardan kaynaklanan emisyonların çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkisi iki bölüme ayrılabilir. İlki, uçak operasyonlarının iniş ve kalkış aşamalarında (LTO döngüsü) oluşan uçaklardan kaynaklanan kirletici emisyonlardan oluşur ve havacılıktan kaynaklanan hava kirliliği olarak görülür (Kurniawan ve Khardi 2011). Örneğin havaalanlarının yakınında üretilen SO_2 ve NO_2 emisyonları kirli havaya sebep olurken, CO toksiktir ve bazı hidrokarbonların ve isin kanserojen olduğundan şüphelenilmektedir (Kesgin 2006). İkinci bölüm ise tırmanma, seyir operasyonları (LTO döngüsü olmayan) dahil olmak üzere diğer uçuş aşamalarında oluşan emisyonları oluşturur ve bunların iklim değişikliği, stratosferik ozon ve UV radyasyonu üzerindeki etkilerini içerir (Kurniawan ve Khardi 2011). CO, NO_2, O_3 ve SO_2 kirleticileri maruz kalındığında insan sağlığı için tehlikeli maddeler olarak sıralanan hava kalite parametreleridir (De Nevers 2010). Bu noktada emisyon takibi ve azaltımı kritik bir konudur. Gelişen uzaktan algılama teknolojileri ile bahsedilen hava kalitesi parametreleri geniş mekansal ölçekte izlenebilmektedir.

Atmosferik partiküllerin ve kimyasalların atmosferdeki mekânsal dağılımı oldukça heterojendir (El-Khoury vd. 2021). Bu sebeple, istasyon bazlı hava kalitesi ağı sadece noktasal bilgi sağlayacağından partiküllerin atmosferdeki dağılımını kapsamlı bir şekilde sunamamaktadır (Pinder vd. 2019). Uzaktan algılama, geniş kapsama alanı ile atmosferik parametrelerin takibine olanak sağlamaktadır. Bodah vd. (2022), Sentinel-5P TROPOMI verilerini kullanarak Brezilya'nın Passo Fundo kenti için NO_2 ve CO parametrelerinin 2019 yılı boyunca değişimini incelemişlerdir. Halder vd. (2023), bulut tabanlı Google Earth Engine (GEE) platformunu kullanarak 2018-2021 zaman aralığında MODIS ve Sentinel-5P uydu kaynaklarından elde ettikleri hava kalitesi parametrelerinin ülkesel ölçekte yıllık analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sentinel-5P, zengin veri içeriği ve ücretsiz erişim olanağıyla son yıllarda farklı çalışmalarda oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır (Zheng vd. 2019, Magro vd. 2021, Muniraj vd. 2023, Makineci vd. 2023) ve diğer hava kalitesi gözlem uydu sensörlerinden farklı olarak TROPOMI, hava kalitesi uygulamaları için gerekli olan nispeten yüksek bir mekansal çözünürlüğe sahiptir (Abida vd. 2016). Ayrıca birçok çalışma, Sentinel-5P uydu verilerinin yerel alanlarda da kullanıma uygun olduğunu ortaya koymuştur (Beirle vd. 2019, Vîrghileanu vd. 2020, Çilek 2022).

Son yıllarda, Çin (Jiang ve Lin 2010, Zhuo vd. 2020, Song vd. 2022), Filipinler (Catane vd. 2024), Fransa (Cavalié vd. 2023) gibi birçok farklı ülkede havalimanlarının kıyı alanlara inşa edilmesi eğilimi artmıştır. Türkiye'de de dolgu veya ıslah edilen alanlara havalimanı inşa edilmeye başlanmış ve ilk olarak deniz dolgusu üzerine inşa edilen Ordu-Giresun Havalimanı 2015 yılında faaliyetlerine başlamıştır. Islah edilen alan üzerine inşa edilen İstanbul Havalimanı ve deniz dolgusu üzerine inşa edilen Rize-Artvin Havalimanı da sırasıyla 2018 ve 2022 yıllarında faaliyetlerine başlamıştır. Havalimanları neden olduğu emisyonlar sebebi ile hava kirliliğine sebep olurken, doğal ekosistemi doğrudan etkileyen dolgu havalimanlarında da hava kirliliğinin oluşması kaçınılmaz olacaktır (Durmaz vd. 2007). Ancak, atmosferde ölçülen kirleticilerin havacılıktan mı yoksa diğer kaynaklardan mı kaynaklandığını izleme ağlarından kesin olarak belirlemenin bilinen bir yolu olmadığından, hava kalitesindeki bozulmanın ne kadarının havacılıktan kaynaklandığını belirlemek zordur (TRC 2021). Bu sebeple, bu çalışma kapsamında uzaktan algılama kaynaklarının dolgu havalimanlarında hava kalitesinin takip edilebilirliğindeki efektifliğinin araştırılması

amaçlanmıştır. Literatürde Türkiye'de faaliyet gösteren havalimanlarının hava kalitesine etkilerini inceleyen çalışmalar mevcuttur.

Bu çalışmalar, yer istasyonları kullanılarak (Birinci vd. 2023) veya LTO döngüsü emisyonları belirlenerek (Ekici ve Şöhret 2021, Gürçam vd. 2021, Zeydan ve Şekertekin 2022) gerçekleştirilmiş olup, Sentinel-5P uydu verileri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaya rastlanmamıştır. Uluslararası literatürde ise havalimanlarındaki emisyonlar ve etkileri yersel ölçme verileri kullanılarak değerlendirilmiş olup (Schäfer vd. 2003, Unal vd. 2005, Popescu vd. 2011) uzaktan algılama verileri, özellikle Sentinel-5P verileri, ile gerçekleştirilen çalışmalar sadece havalimanlarındaki Covid-19 sürecini ele almaktadır (Kanniah vd. 2021, Shikwambana ve Kganyago 2021). Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMI) Genel Müdürlüğü de hazırladığı 2024-2028 Stratejik Planı'nda hava kalitesi yönetiminin yetersiz olduğu tespitinde bulunmuştur (DHMI 2024). Bu amaçla, Sentinel-5P uydu verileri kullanılarak yeni faaliyete giren İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı'ndaki uçak operasyonlarından kaynaklanan emisyonların (CO, NO_2 SO_2, UV ve O_3) atmosferdeki yayılımı ve meydana gelen zamansal değişimler incelenmiştir. Sentinel-5P uydu verisinin havalimanlarında hava kalitesinin izlenmesindeki rolü değerlendirilerek, uçak trafiğinin hava kalite parametreleri üzerindeki etkileri de Granger Nedensellik testi ile istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

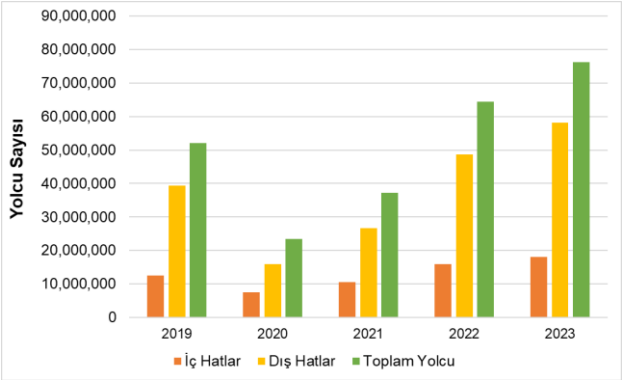
2. Materyal ve Metot

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma kapsamında, ülkemizde en son kullanıma açılan iki havalimanı; ıslah edilen alanlar üzerine inşa edilen İstanbul Havalimanı ve deniz dolgusu üzerine inşa edilen Rize-Artvin Havalimanı çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 1). Bu havalimanlarının seçilmesinin temel sebebi, her iki havalimanında da mevcut ekosistemin havalimanı inşaatı için değiştirilmesidir. İstanbul Havalimanı, İstanbul'un kuzeybatısında yer alan Tayakadın ile Akpınar köyleri arasında yer alan sulak alanların ıslah edilmesiyle 2015 yılında inşa edilmeye başlanmıştır (Yağmur ve Musaoğlu 2022). 76,5 km^2 üzerine inşa edilmesi hedeflenen havalimanı 29 Ekim 2018 tarihinde iki pisti ile kullanıma açılmıştır. Haziran 2020'de de üçüncü pisti tamamlanarak kullanıma açılmıştır. Havalimanı'nın inşa edildiği bölgenin 1970-1990 yılları arasında şehrin kömür ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanıldığı ancak doğalgazın gelmesiyle beraber terkedildiği bilinmektedir (Seker vd. 2008). Terkedilen açık maden ocaklarının yağmur ve yeraltı suları ile dolarak sulak alanları oluşturması, bölgede zaman içerisinde bir ekosistem oluşmasını sağlamıştır (JMO 2014). Ayrıca, maden ocaklarından çıkarılan kum yığınları da ağaçlandırılarak rehabilitasyon çalışmaları yapılmıştır (Turnacıgil 2008). Havalimanı inşaatı, Yeniköy tarafında yer alan bölgenin tahrip edilmesine ve sulak alanların kurutularak doldurulmasına sebebiyet vermiştir.

Şekil 1. Çalışma kapsamında incelenen havalimanları: İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı ve konumları.

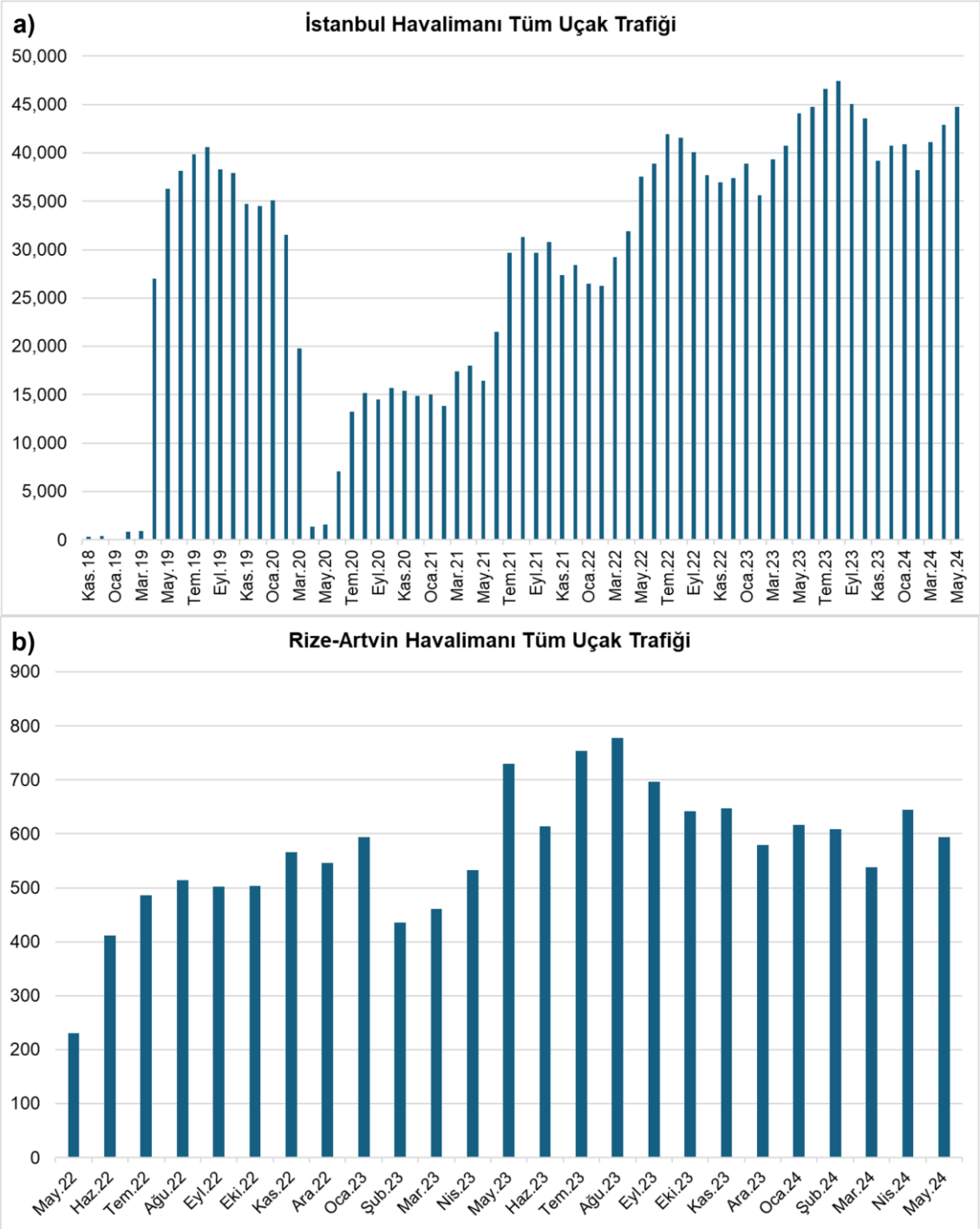
Havalimanı kullanıma açıldığı tarihten beri artan yolcu trafiğiyle İstanbul'un ulaşım ihtiyacının büyük bir kısmını karşılamaktadır. Şekil 2'de İstanbul Havalimanı'nda taşınan yolcu sayıları yıl bazında verilmiştir. Kullanım hayatına 2018 yılında yaklaşık olarak 95 bin yolcu ile başlayan havalimanı, 2019 yılında hızlı bir ilerleme ile yılda yaklaşık olarak 50 milyon yolcunun ulaşımına olanak sağlamıştır. 2020 yılında Türkiye'de yaşanan COVID-19 salgını sonrası bu sayı yarı yarıya düşse de, 2023 yıllarına doğru yine artış göstererek 76 milyona ulaşmıştır. 2018 yılında yolcu sayısının ve etkisinin az olması sebebiyle Şekil 2'deki grafik gösteriminde dikkate alınmamıştır.



Şekil 2. İstanbul Havalimanı'nda seyahat eden yıllık toplam yolcu sayısı.

Rize'nin Pazar ilçesinde inşa edilen Rize-Artvin Havalimanı ise, Ordu-Giresun Havalimanı'ndan sonra deniz dolgusu üzerine inşa edilen ikinci havalimanıdır. Mayıs 2022'de kullanıma açılmıştır. Kullanıma açıldıktan sonra 2022 yılında taşınan yolcu sayısı 526.880 iken 2023 yılında bu sayı 1 milyona ulaşmıştır (DHMI 2024).

Her iki havalimanı da zamanla artan yolcu sayısı ile hava trafiğinde etkin rol oynamaktadır. DHMI tarafından aylık tüm uçak trafiği verileri kayıt altına alınarak servis edilmektedir. Servis edilen veriler ile hazırlanan istatistikler (DHMI 2024) görselleştirilerek Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. a). İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı'nda meydana gelen tüm uçak trafiği.

2.2 Uydu Verileri ve Hava Kalite Parametreleri

Hava kalite parametrelerinin izlenebilmesi amacıyla, misyonu hava kalitesi, ozon ve UV radyasyonu ile iklim izleme ve tahmin için kullanılacak yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlükte atmosferik ölçümler gerçekleştirmek olan Sentinel-5P TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) uydu verileri çalışma kapsamında kullanılmıştır. Uydu, havayı ve dolayısıyla insan sağlığını ve iklimi etkileyen çok sayıda gazın haritasını çıkarmak için son teknoloji ürünü olan TROPOMI sensörünü taşımaktadır (ESA 2024). TROPOMI sensörü, atmosferik ozon (O_3), metan, formaldehit, ultraviyole aerosol indeks (UV), karbon monoksit (CO), azot dioksit (NO_2) ve kükürt dioksit (SO_2) konsantrasyonlarını kaydetmektedir. Göreve başladığında 3.5 × 7 km mekânsal çözünürlükte veri kaydeden sensör, 6 Ağustos 2019'dan itibaren 3.5 x 5.5 km olarak veri kaydetmektedir.

Hava kalite parametrelerinin oluşumunda birçok faktör rol oynamaktadır. CO, herhangi bir karbonlu malzemenin eksik yakılmasından kaynaklanan, kokusuz ve renksiz bir gazdır (Muniraj vd. 2023). CO kirliliği öncelikle fosil yakıtla çalışan motorların ürettiği emisyonlardan kaynaklanmaktadır. Daha yüksek CO seviyeleri genellikle yoğun trafik sıkışıklığının olduğu bölgelerde ortaya çıkmaktadır (Asadifard ve Masoudi 2018).

İnsan sağlığını en çok etkileyen azot oksit türü olduğu belirtilen NO_2 parametresi, bu özelliği sebebiyle en önemli hava kalite parametrelerinden biridir. Temel sebepleri arasında, trafik yoğunluğu, ısınma faaliyetleri ve sanayi bölgeleri gösterilmektedir (ÇŞİDB-SİM 2024). Ortam atmosferindeki NO_2'nin ana kaynakları kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların yakılmasıdır. NO_2 oldukça reaktif bir kirleticidir ve özellikle fosil yakıtların yanması sonucu yayılır. Ulaşım, NO_2 emisyonlarının ana kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Muhammad vd. 2020). NO_2 gazları su buharı ile reaksiyona girerek farklı türde asit yağmurları oluşumuna sebebiyet verir (Muniraj vd. 2023).

SO_2 parametresi ise, genellikle volkanlardan kaynaklanan jeotermal faaliyetler tarafından doğal olarak veya kömür ve petrolün yanması gibi insan faaliyetleri tarafından üretilen yaygın bir atmosferik kirleticidir (Cullis ve Hirschler 1980). Motorlu taşıtlar yüksek düzeyde CO ve önemli derecede hidrokarbon (HC) ve nitrojen oksit (NO_x) kaynağı üretirken, konut, ticari ve endüstriyel ısıtma ve soğutma gibi sistemlerde yakıt kullanımı SO_2'nin baskın kaynağıdır (Dursun vd. 2015).

Sentinel-5 TROPOMI verisinde bulunan UV aerosol indeks parametresi, emici aerosol indeksleri ifade etmektedir. Biyokütlenin yakılmasından kaynaklanan duman, çöl tozu, volkanik kül ve antropojenik olarak üretilen kurum gibi emici aerosoller, radyasyonu emer ve iklim üzerinde sıcaklık artışına neden olan bir etkiye sahiptir (Kooreman vd. 2020). UV emici aerosol indeksi, atmosferde aerosollere atfedilen emilimin varlığını gösterir. Pozitif değerler toz ve duman gibi UV emici aerosollerin varlığını gösterir ve emici aerosol yüklü bir atmosfer ile berrak bir atmosfer arasındaki yansıma kalıntısının pozitif değerleri olarak tanımlanır. Negatif değerler çoğunlukla saçılan aerosoller ve bulutlarla ilişkilidir ve açık bir atmosfere kıyasla daha fazla saçılan parçacık içeren bir atmosferin göstergesidir (Penning de Vries vd. 2009).

Bir diğer önemli parametre olan O_3 parametresi de, şehir havasında yaygın olarak bulunan bir oksidan gazıdır ve ozona maruz kalmak oksidatif strese neden olarak hava yolu inflamasyonuna ve solunum yolu hastalıklarının artmasına neden olabilmektedir (Adhikari ve Yin 2020). Ozon, güneşin ultraviyole radyasyonu altında uçucu organik bileşiklerin nitrojen oksitlerle (NO_x) fotokimyasal reaksiyonları sonucu oluşur (Fares vd. 2010). Çoğu bölgede NO_x emisyonlarının azalmasıyla birlikte O_3 de azalırken; bununla birlikte, yüksek NO_x emisyonlarının hakim olduğu trafiğin yoğun olduğu bazı kentsel bölgelerde, O_3 başlangıçta azalan NO_x emisyonlarına tepki olarak artabilmekte, ancak kentsel dumanın kırsal alanlara taşınmasından sonra O_3 parametresi de azalmaktadır (Dentener vd. 2020).

Havalimanlarında hava kalite parametrelerinin değişiminin izlenmesi için kullanılan beş parametre ve verinin zamansal aralığı Çizelge 1'de verilmiştir. Sentinel-5P uydusu 13 Ekim 2017'de fırlatılmasına rağmen veri temininin başlangıcı parametrelere göre değişkenlik göstermektedir. UV, CO ve NO_2 uydu verileri Temmuz 2018 itibariyle sağlanırken, O_3 Eylül 2018'de ve SO_2 ise Aralık 2018'de temin edilmeye başlanmıştır.

Çizelge 1. Kullanılan hava kalitesi parametreleri ve zamansal veri aralığı.

Parametre	Veri Aralığı
UV	Temmuz 2018 – Mayıs 2024
CO	Temmuz 2018 – Mayıs 2024
NO_2	Temmuz 2018 – Mayıs 2024
O_3	Eylül 2018 – Mayıs 2024
SO_2	Aralık 2018 - Mayıs 2024

Çizelge 1'de belirlenen beş parametrenin günlük zaman serileri Google Earth Engine (GEE) bulut platformu kullanılarak elde edilmiştir. GEE, uydu görüntülerinin depolanmasının yanı sıra çeşitli mekânsal analizlerin

gerçekleştirilmesine olanak sağlayan açık kaynak kodlu bir bulut platformudur. Kullanıcı dostu ara yüzü ile Javascript programlama dili kullanılarak analizlere olanak sağlamaktadır (GEE 2024). Sentinel-5P uydusundan Seviye 2, GEE aracılığıyla yaklaşık olarak 1 km mekânsal çözünürlüğe sahip grid sistemiyle daha yüksek mekânsal çözünürlükte Seviye 3 olarak depolanmaktadır. Seviye 2 veriler, geometrik ve radyometrik düzeltmesi yapılmış Seviye 1B verilerinin işlenmesinden elde edilen jeofiziksel büyüklüklerden oluşmaktadır.

2.3 Metodoloji

Çalışma kapsamında, bulut tabanlı GEE platformundan faydalanılarak günlük olarak elde edilen hava kalite parametrelerinin zaman serileri üretilmiştir ve aylık periyotlarda ortalama, maksimum ve minimum değerler ile incelenmiştir. Elde edilen zaman serileri, DHMI tarafından paylaşılan aylık tüm uçuş trafiği istatistikleri (DHMI 2024) ile beraber değerlendirilmiştir. Zaman serilerinin eğilimlerinin değerlendirilmesinin yanı sıra, hem tüm uçak trafiğinin parametreler üzerindeki etkisi hem de parametrelerin birbiri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için Granger Nedensellik testi zaman serilerine uygulanmıştır. Daha çok ekonomi ve sosyal bilimler (Takım 2010, Shojaie ve Fox 2022) alanlarında kullanılan test, Granger (1969) tarafından önerilen istatistiksel bir hipotez testidir. Bir değişkenin diğer değişkenin tahmininde etkili olup olmadığını anlamaya yardımcı olan güçlü bir istatistiksel araç olarak anılmaktadır. Ancak değişkenler arasında kurulan bu Granger modeli, gelecek tahmini değil nedensellik ilişkilerinin belirlenmesini hedeflemektedir (Gökçe 2002). Değişkenler arasındaki ilişkilerin yönünü ve büyüklüğünü anlamak için kullanılır. Diğer bir deyişle, iki değişkenin birbiri üzerinde gecikmeli etkisinin olup olmadığı, X değişkeni mi Y değişkeninin nedeni (X->Y), Y değişkeni mi X değişkeninin nedeni (Y->X) ya da iki değişken arasında geri beslemeli bir ilişki mi olduğu (hem X->Y, hem de Y->X) bu test ile araştırılabilmektedir. Denklem 1'de verildiği şekilde uygulanmaktadır. α, β, γ ve δ katsayıları ifade ederken i ve j gecikme sürelerini göstermektedir. u_{1t} ve u_{2t} ise regresyon artıkları olarak adlandırılmaktadır.

$$Y_t = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^{n} \beta_j X_{t-j} + u_{1t}$$
$$X_t = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^{n} \delta_j Y_{t-j} + u_{2t} \qquad (1)$$

Denklem 1'e göre boş hipotez sınanır. Eğer β katsayıları sıfırdan farklı bulunursa boş hipotez reddedilir ve X'in Y üzerinde anlamlı bir nedensel etkisi olduğu sonucuna varılır. Benzer şekilde δ katsayıları sıfırdan farklı bulunursa boş hipotez reddedilir ve Y'nin X üzerinde anlamlı bir nedensel etkisi olduğu sonucuna varılır. Boş hipotezin sınanması için yaygın olarak F testi uygulanmaktadır. F-testi bir değişkenin diğeri üzerindeki etkisinin kapsamını ifade etmektedir. Bu nedenle, daha yüksek F değerleri ve dolayısıyla elde edilen daha düşük p-değerleri, bir değişkenin diğeri üzerinde daha anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ancak anlamlılık düzeylerinin belirlenmesi için p değerlerinin yorumlanmasında uygulanan kriterler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. p değerlerinin yorumlanması (Rosner 2010, Kul 2014).

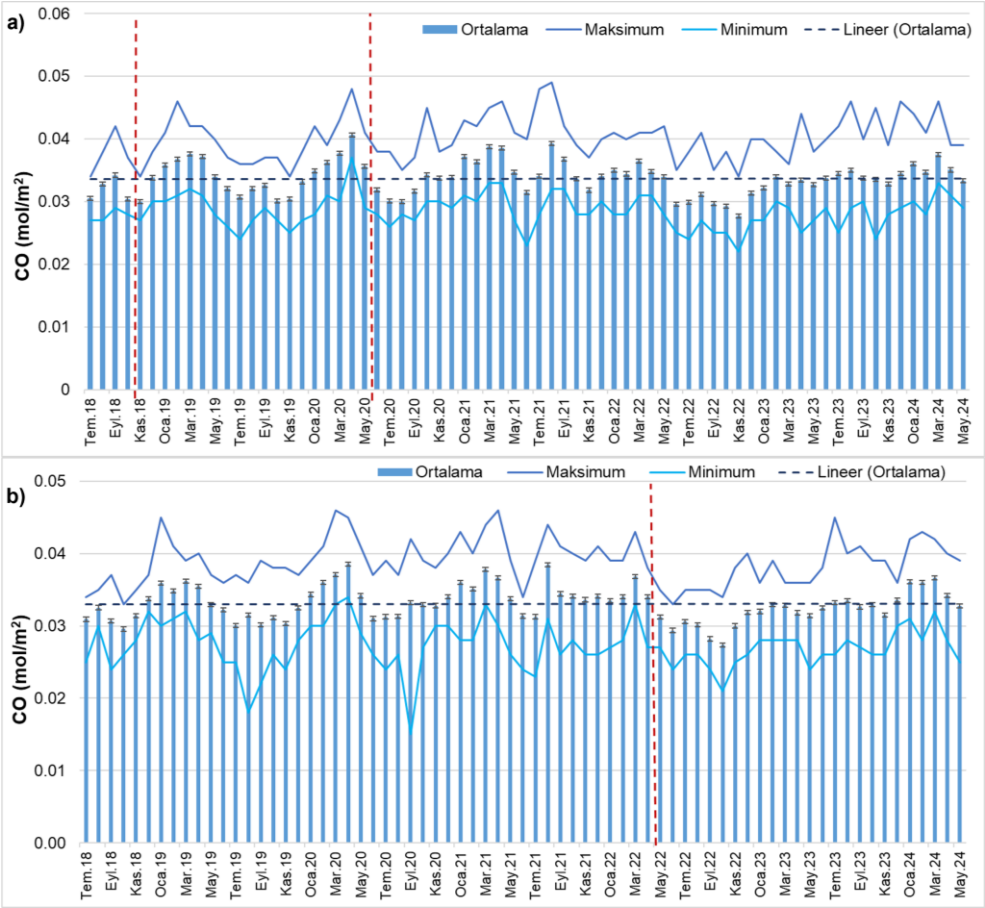
p değeri	Yorumu
p > 0.10	İstatistiksel olarak anlamlı farklılık saptanmamıştır.
0.05 ≤ p < 0.10	Anlamlılık eğilimi (sınırda anlamlılık)
0.01 ≤ p < 0.05	İstatistiksel anlamlılık
0.001 ≤ p < 0.01	Yüksek düzeyde istatistiksel anlamlılık
p < 0.001	Çok yüksek düzeyde istatistiksel anlamlılık

3. Bulgular ve Tartışma

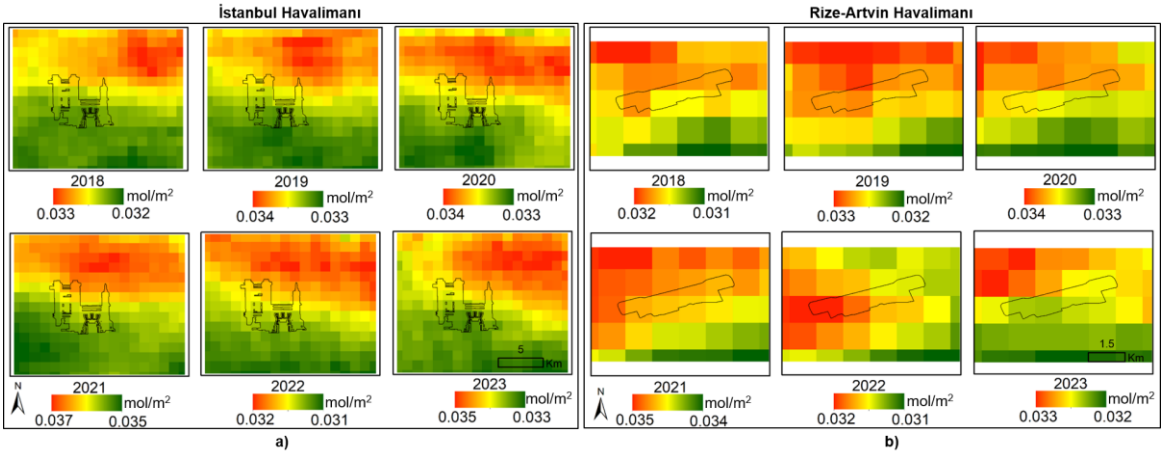
İstanbul ve Rize-Artvin Havalimanlarının hava kalite parametrelerinin Çizelge 1'de verilen zaman aralıkları dikkate alınarak her parametre için GEE platformu ile sırasıyla zaman serisi grafikleri üretilmiş ve değerlendirilmiştir. Grafikler üzerinde İstanbul Havalimanı'nın ilk iki ve üçüncü pistlerinin ve Rize Havalimanı'nın kullanıma açıldığı tarihler kesikli kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. Her parametre için ayrıca yıllık ortalama dağılım haritaları üretilerek bölgesel olarak değerlendirilmiştir.

3.1. Karbon Monoksit (CO)

İlk olarak CO parametresinin İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı için zaman serisi analizleri gerçekleştirilmiştir. İstanbul Havalimanı üzerinde oluşturulan aylık zaman serisi grafikleri incelendiğinde (Şekil 4a), zaman serisinin mevsimsel salınımlar şeklinde olduğu ve yaz-sonbahar mevsimlerinde azalırken kış-ilkbahar mevsimlerinde arttığı görülmektedir. Ancak 2023 yılında, mevsimsel salınımın aksine yıl boyu benzer bir salınım göstermiştir. İstanbul Havalimanı'nın kullanıma açıldığı tarihten itibaren aylık toplam uçak trafiği sayıları incelendiğinde (Şekil 3), 2018 yılında 350 uçak trafiği ile başlayan hava taşımacılığı serüvenine 2023 yılı sonunda 40 bin uçak trafiği ile devam etmiştir. Uçak trafiği ile CO parametresi beraber değerlendirildiğinde, 2023 yılına kadar salınımların ters yönde olduğu görülmüştür. Ancak 2023 yılı özelinde bakıldığında zaman serilerinde bir tutarlılık olduğu görülmüştür.



Şekil 4. CO parametresinin GEE ile elde edilen aylık zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.



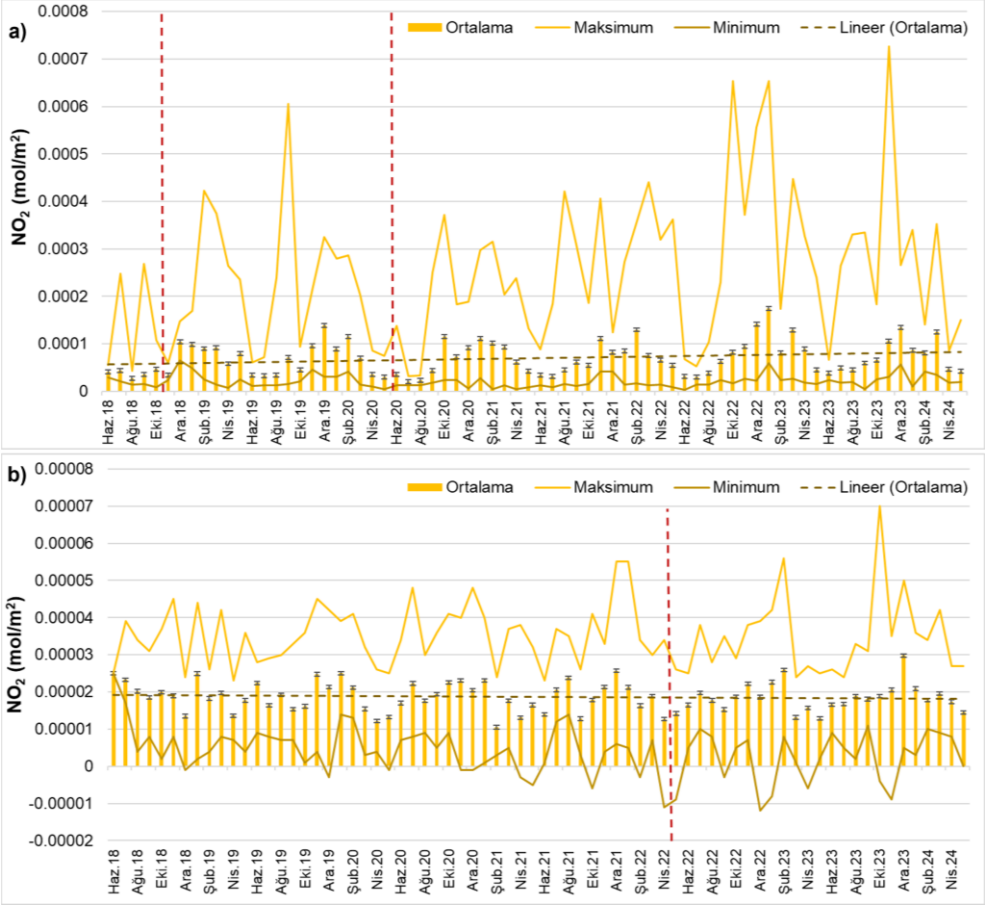
Şekil 5. CO parametresinin a) İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı üzerinde 2018-2023 zaman aralığında yıllık ortalama sonuçları.

Rize-Artvin Havalimanı üzerinde alınan CO parametresinin aylık zaman serisinde (Şekil 4b) ise kullanıma açıldığı tarihten itibaren 2022 yılında bir azalma görülse de 2023 yılında artış görülmüştür. Her iki havalimanında da 2022 yılında azalma olması dikkat çeken bir diğer unsurdur. Ancak genel trende bakıldığında her iki havalimanında da CO konsantrasyonunun stabil olduğu görülmektedir. CO parametresinin ilgili havalimanlarındaki yıllık ortalama görselleri ise Şekil 5'te verilmiştir. İstanbul Havalimanı'nın kuzey kesimlerinde CO miktarının fazla olduğu görülürken, güney kesimlerinde azaldığı görülmektedir. 2018-2021 yıllarında artış görülürken 2022 yılında düşüş olduğu görülmektedir. 2023 yılında ise tekrar artışa geçmiştir. Rize-Artvin Havalimanı'nda ise kuzeybatı yönünde CO miktarının yüksek olduğu güneydoğu kesimlerinde ise daha düşük olduğu görülmektedir. İstanbul Havalimanı'nda olduğu gibi Rize-Artvin Havalimanı'nda da 2018-2021 yıllarında artış görülürken, 2022 yılında azalarak 2023 yılında tekrar arttığı görülmektedir.

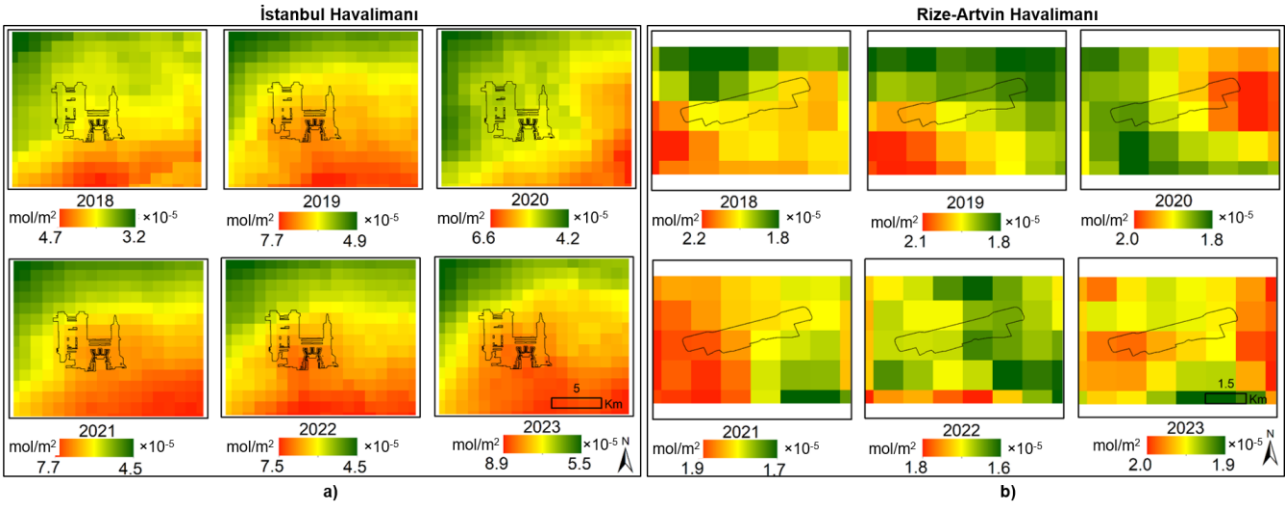
3.2. Nitrojen Dioksit (NO_2)

Aylık NO_2 zaman serileri her iki havalimanı için de üretilerek Şekil 6'da verilmiştir. Zaman serisi grafikleri

incelendiğinde, İstanbul Havalimanı'nda yaz aylarında (Haziran-Ağustos) daha stabil ve nispeten az miktarda seyrederken, kış aylarında yoğun olduğu görülmektedir. Ayrıca son yıllarda miktarının arttığı da tespit edilen bir diğer durumdur. Dolayısıyla genel trendinin de arttığı görülmektedir. 2020 yılı Nisan-Haziran zaman aralığında NO_2 değerlerinin diğer yıllara göre düşük olması, Türkiye'de 2020 yılında görülen COVID-19 salgınına ve dolayısıyla getirilen uçuş kısıtlamalarına bağlanabilmektedir. Rize-Artvin Havalimanı'nda ise havalimanı kullanıma açılmadan önceki sene olan 2021 yılından itibaren NO_2 değerlerinin arttığı ancak 2023 yılında yaz aylarında azalarak stabil bir hareket gösterdiği görülmektedir. Genel trend ise nispeten azalarak seyretmektedir. Ayrıca ortalama zaman serileri daha stabil ilerlerken, maksimum ve minimum değerlerde ani sıçramalar olduğu görülmektedir. Parametrelerin günlük değişimlerinde meydana gelen değişkenlikler bu gazların atmosfere sürekli emisyonundan sorumlu olan araçların aktivite yoğunluğuna bağlıdır (Hashim vd. 2021).



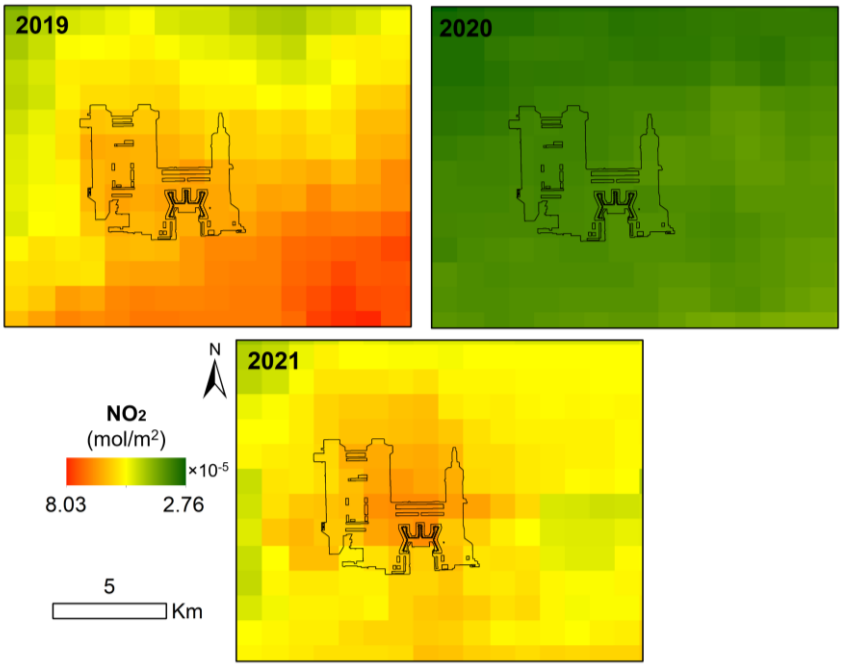
Şekil 6. NO_2 parametresinin GEE ile elde edilen aylık zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.



Şekil 7. NO_2 parametresinin a) İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı üzerinde 2018-2023 zaman aralığında yıllık ortalama sonuçları.

Yıllık ortalama NO_2 haritaları oluşturularak Şekil 7'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, İstanbul Havalimanı üzerinde NO_2 miktarının arttığı, 2020 yılında ise zaman serileriyle ilişkili olarak azaldığı görülmektedir. Sadece havalimanı trafiği değil, havalimanına ulaşım için İstanbul Havalimanı'nın güneyinde yer alan Kuzey Marmara Otoyolu da NO_2 parametresinin değerlendirmesinde dikkate alınması gereken bir diğer unsurdur. Şekil 7a'da verilen yıllık ortalama NO_2 sonuçlarında havalimanının güneyinde yüksek NO_2 değerlerinde görülen yoğunluk da bu durumu kanıtlar niteliktedir. Şekil 7b'de verilen Rize-Artvin Havalimanı'na ait yıllık ortalama NO_2 dağılımında ise 2018, 2019 ve 2021 yıllarında havalimanının batısında NO_2 değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Havalimanının kullanıma açıldığı 2022 yılında en düşük değerlere rastlanırken, 2023 yılında havalimanı genelinde NO_2 değerlerinde artış olduğu görülmektedir.

COVİD-19 salgınının etkileri Şekil 6'da verilen zaman serilerinde görülse de salgın sırasında getirilen uçuş kısıtlamaları sonrası NO_2 parametresinin bölgedeki dağılımının nasıl etkilendiğinin görülebilmesi amacıyla, 2019, 2020 ve 2021 yılları Nisan ayına ait NO_2 haritaları hazırlanarak Şekil 8'de verilmiştir. Nisan ayı, Türkiye'de COVİD-19 salgını nedeniyle sokağa çıkma yasağının uygulandığı ve dolayısıyla uçak seferlerinin kısıtlanmaya başlandığı aydır. Şekil 8'de verilen sonuçlar incelendiğinde 2019'da yüksek olan NO_2 değeri, 2020'de insan faaliyetlerinin azalmasıyla bölge genelinde düşmüştür. 2021 Nisan ayında da eski faaliyetlerini sürdürmeye devam etmiştir.

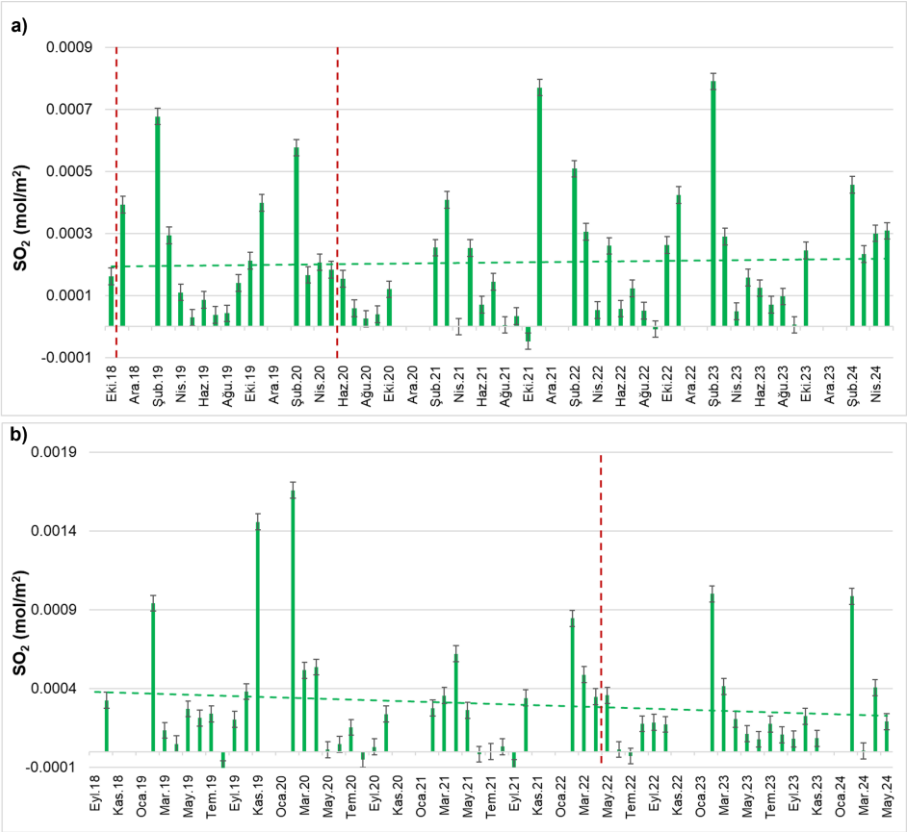


Şekil 8. 2019, 2020 ve 2021 yılları Nisan ayının İstanbul Havalimanı özelinde NO_2 haritası.

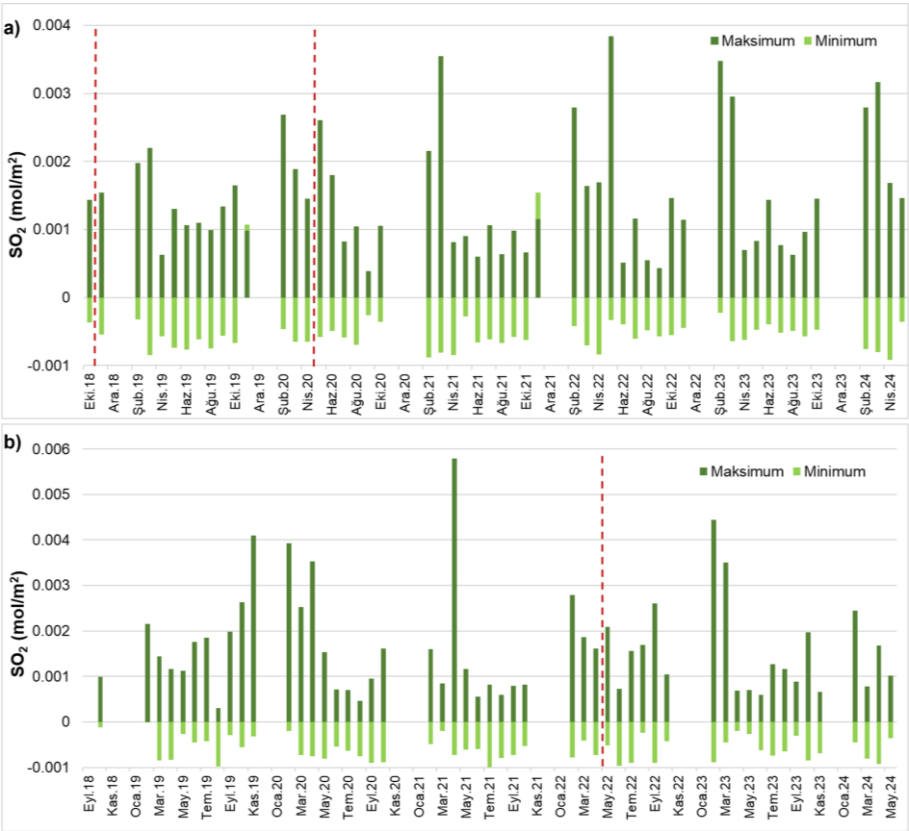
3.3. Sülfür Dioksit (SO_2)

GEE üzerinden elde edilen aylık ortalama SO_2 zaman serileri incelendiğinde (Şekil 9), Kasım-Ocak zaman aralığında veri olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni derin bulut tabakası veya örneklenen kirleticilerin düşük konsantrasyonları olabilmektedir (Mendez-Espinosa vd. 2020). İstanbul Havalimanı üzerinde SO_2 zaman serisi trendinin artan bir trend sergilediği görülürken, 2023 yılı Şubat ayında ortalama değerin en yüksek değere ulaştığı görülmüştür. Genel olarak mevsimsel bir hareketin hakim olduğu söylenebilmektedir. Kış aylarında SO_2 değeri yüksek olurken yaz aylarında nispeten daha az olduğu görülmektedir. Rize-Artvin Havalimanı'nda ise kullanıma açıldığı tarihten sonra düşük değerlerde seyretse de benzer mevsimsel hareket burada da görülmektedir. Genel eğilime bakıldığında ise azalan bir trend gösterdiği görülmektedir. Maksimum ve minimum değerler ise Şekil 10'da verilmiştir. İstanbul Havalimanı'nda maksimum değer 2022 yılında görülürken, 2024 yılına doğru azalmaya başlamıştır. Şubat-Haziran zaman aralığında değerler yüksek seyrederken, yaz ve sonbahar aylarında daha düşük seyretmektedir. Rize-Artvin Havalimanı'nda ise 2021 yılı Nisan ayında en yüksek değere ulaşılmıştır. Havalimanı açıldıktan sonra ise 2023 yılında yüksek değerler görülmüştür. İstanbul havalimanı ile benzer bir mevsimsel eğilim olduğu görülmüştür. Her iki havalimanı verilerinde de minimum değerlerin negatif değerler olduğu görülmektedir. Verilerdeki gürültü nedeniyle,

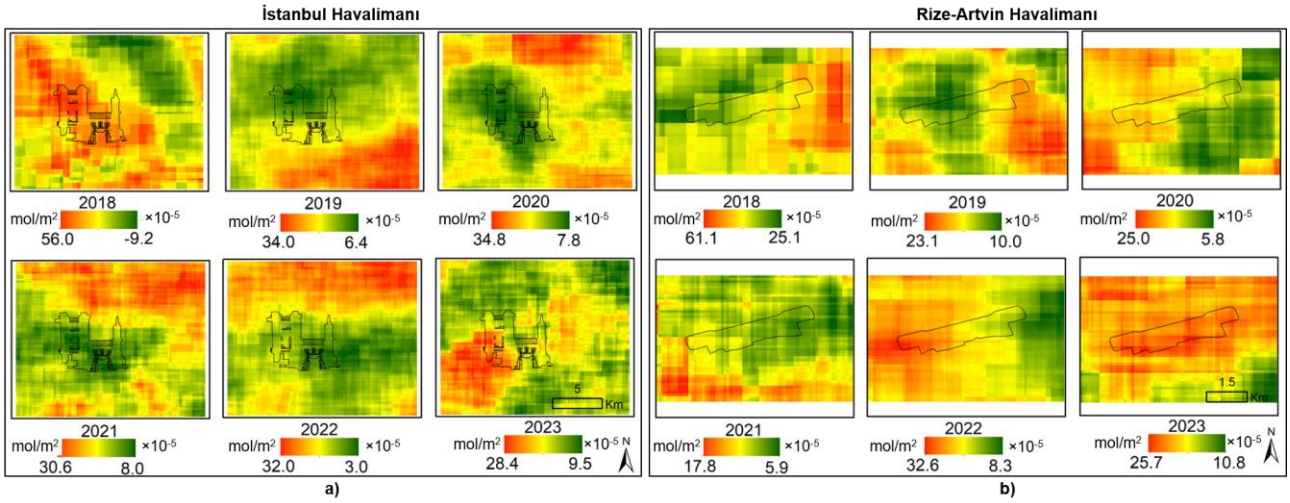
özellikle temiz veya düşük SO_2 emisyonlarına sahip bölgeler için negatif değerler sıklıkla gözlemlenmektedir. Uç değerler haricinde (örn. < -0,001 mol/m^2), bu değerlerin filtrelenmemesi önerilmektedir (Theys vd. 2023).



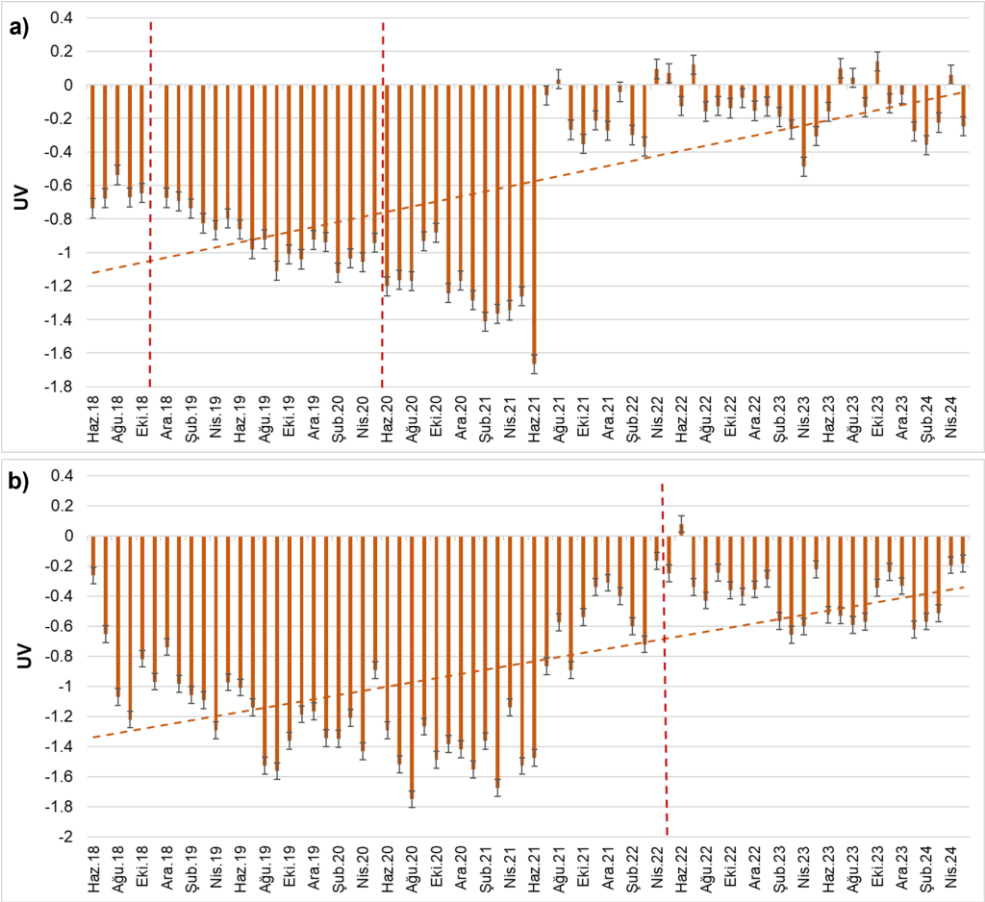
Şekil 9. SO_2 parametresinin GEE ile elde edilen aylık ortalama zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.



Şekil 10. SO_2 parametresinin GEE ile elde edilen aylık maksimum ve minimum zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.



Şekil 11. SO_2 parametresinin a) İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı üzerinde 2018-2023 zaman aralığında yıllık ortalama sonuçları.



Şekil 12. UV Aerosol parametresinin GEE ile elde edilen aylık zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.

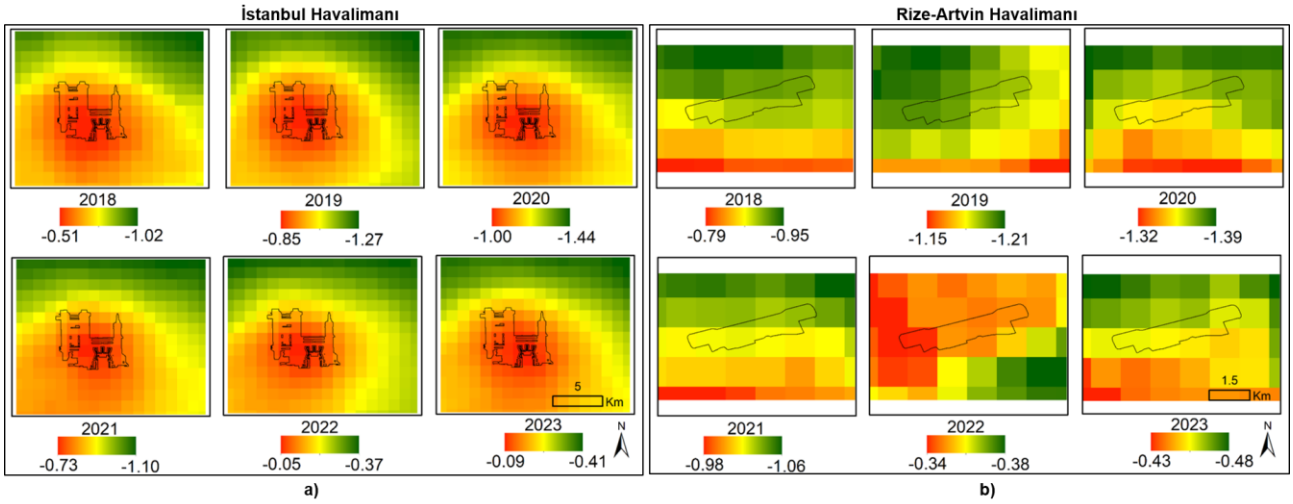
Şekil 11'de yıllık ortalama SO_2 dağılımı haritaları verilmiştir. İstanbul Havalimanı'nda 2018 yılında en yüksek değerler görülürken, 2023 yılına doğru bir azalma görülmektedir. Rize-Artvin Havalimanı'nda ise 2018 yılında maksimum değerlere rastlanırken, 2021 yılında en düşük değerleri gösterdiği görülmektedir. Kullanıma açıldığı 2022 yılından sonra havalimanı üzerinde yoğunluk oluştuğu görülmektedir ancak 2023 yılında yine değerlerde düşüş görülmektedir.

3.4. UV Aerosol Indeks

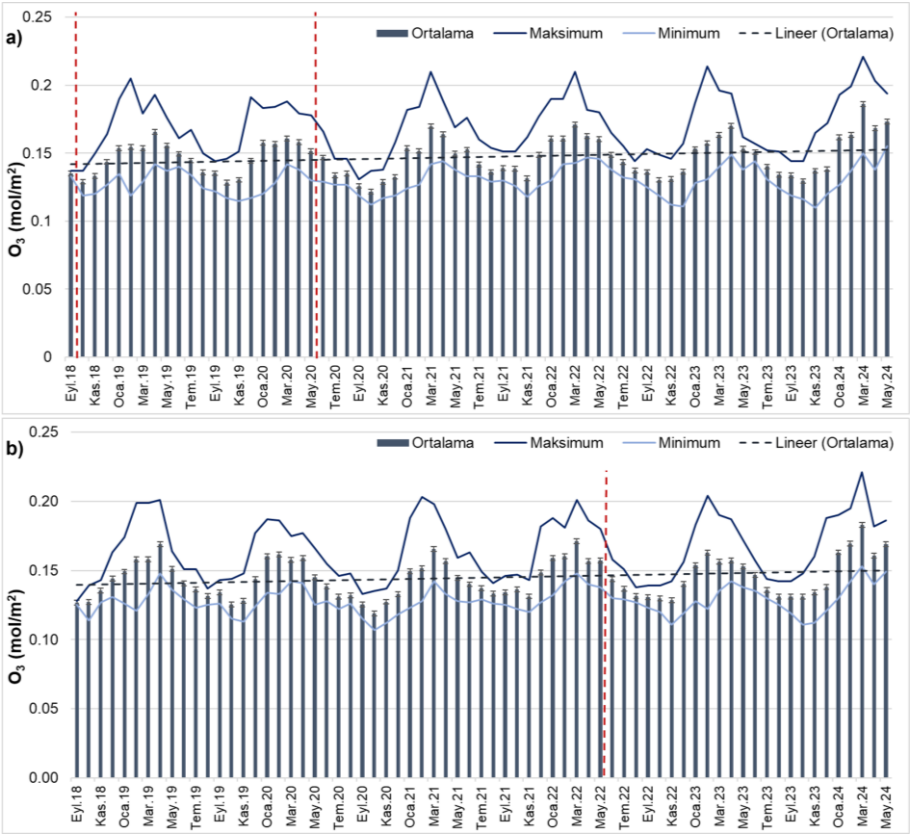
Şekil 12a'da UV aerosol indeks parametresinin İstanbul Havalimanı için oluşturulan zaman serisi grafiği incelendiğinde, sürekli negatif değerlerde seyreden UV parametresi, Temmuz 2021 itibariyle pozitif değerlerde de seyretmeye başlamıştır. Aynı zamanda değerlerde keskin bir artış olduğu görülmektedir. Bu sebeple artan bir trendin olduğu söylenebilmektedir. Rize Havalimanı'nda ise Haziran 2020'ye doğru azalma eğilimi olurken, sonrasında UV değerinde artış görülmüştür (Şekil 12b).

Dolayısıyla zaman serisi trendi de artış eğilimi göstermektedir. Her iki havalimanında da Temmuz 2021'de artış olması dikkat çekmektedir.

Havalimanlarında UV parametresinin yıllık ortalama görselleri 2018-2023 zaman aralığı için GEE üzerinden her iki havalimanı için de hazırlanarak Şekil 13'te verilmiştir. İstanbul Havalimanı'nda yıllık değişimler incelendiğinde, altı yılda da havalimanı üzerinde değerlerin yüksek olduğu görülmektedir. Ancak yıllık ortalama değerlerin negatif olması da saçılan aerosollerin varlığını ifade etmektedir. 2018-2020 yılları arasında UV değerleri düşerken, 2021-2023 zaman aralığında artış göstermiştir. Benzer durumun Rize-Artvin Havalimanı üzerinde de gerçekleştiği görülmektedir. Kullanıma açıldığı 2022 yılında Rize-Artvin Havalimanı üzerinde UV değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Ancak 2023 yılında bu durum devamlılığını sürdürmemiştir. Rize-Artvin Havalimanı'nın İstanbul Havalimanı kadar büyük alan kaplamıyor olması ve yolcu trafiğinin de az olması, UV değerlerinin daha düşük olmasına neden olarak gösterilebilmektedir.



Şekil 13. UV Aerosol parametresinin a) İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı üzerinde 2018-2023 zaman aralığında yıllık ortalama sonuçları.



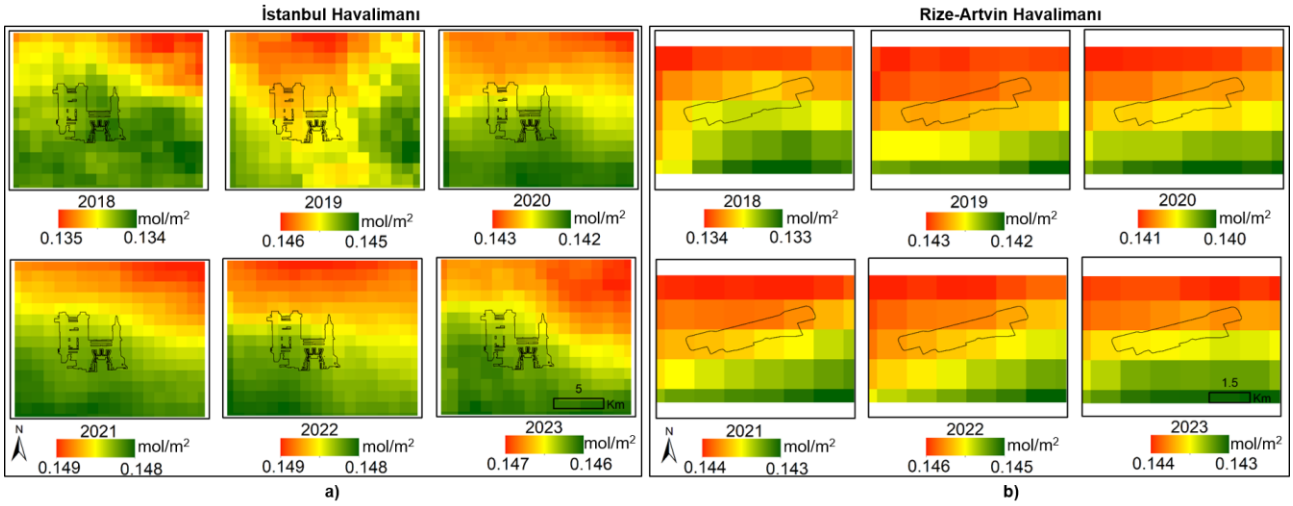
Şekil 14. O_3 parametresinin GEE ile elde edilen aylık zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.

3.5. Ozon (O_3)

Şekil 14a'da İstanbul Havalimanı üzerinde O_3 parametresinin aylık zamansal değişimi gösterilmiştir. Mevsimsel bir trend gösteren parametre kış ve ilkbahar mevsimlerinde artış gösterirken, yaz ve sonbahar mevsimlerinde azalmaktadır. NO_2 parametresi ile uyumlu bir trend gösteriyor gibi görünse de, NO_2 parametresi azalmaya başladığında O_3 parametresinin artış göstermeye başladığı görülmektedir. Bu durum, Dentener vd. (2020) tarafından belirtilen durumu destekler niteliktedir. Benzer durum, Şekil 14b'de verilen Rize-Artvin Havalimanı'nın O_3 ve NO_2 zaman serilerinde de görülmüştür. Her iki havalimanında da aylık O_3 zaman serileri incelendiğinde, artan bir eğilimin varlığı dikkat çekerken, maksimum ve ortalama değerlerin 2024 yılı Mart ayında en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.

Her iki havalimanına ait yıllık ortalama O_3 haritaları Şekil 15'te verilmiştir. 2018 yılında en düşük değerlerin görüldüğü İstanbul Havalimanı'nda 2019 yılında havalimanı üzerinde O_3 değerlerinde artış olduğu görülmektedir. 2020 yılında düşüş görülse de 2021 itibariyle tekrar artmaya başlamıştır. Genellikle havalimanının kuzey kesimlerinde O_3 yüksek bulunurken, güneyde nispeten daha düşük değerlerle seyretmektedir.

İstanbul Havalimanı'na benzer şekilde, Rize-Artvin Havalimanı'nda da 2018 yılı O_3 dağılımının en düşük olduğu yıl olmuştur. Ancak, Rize-Artvin Havalimanının kullanıma açıldığı 2022 yılında en yüksek O_3 dağılımının olması dikkat çeken önemli bir detaydır. Havalimanının kuzey kesimlerinde O_3 değerleri yüksek olurken, güney kesimlerinde nispeten daha düşük olduğu görülmektedir. Her iki havalimanında benzer durumun görülmesi, havalimanlarının denizde veya deniz kıyısında inşa edilmelerinin etkisinin olması ihtimalini kuvvetlendirmiştir. Çünkü deniz-kara meltemi sirkülasyonu, kıyı kentlerinde atmosferik kirleticilerin taşınmasında önemli bir rol oynamaktadır (Mao ve Talbot 2004, Wagner vd. 2012). Wang vd. (2018) tarafından düşük deniz rüzgarı hızının, kirleticilerin kara üzerinde birikmesine elverişli olduğu tespit edilmiştir. Her iki havalimanının da hırçın yapısıyla bilinen Karadeniz'e kıyısının olması sebebiyle, denize yakın kısımlarda O_3 parametrelerinin yüksek çıkmasının deniz-kara meltemi ve rüzgar hızı ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Özellikle, İstanbul Havalimanı'nda deniz alanlarında O_3 değerleri en yüksek değerleri gösterirken, kıyı kesimlerde ve dolayısıyla havaalanı bölgelerinde de değerlerin yüksek olduğu ve denizden uzaklaştıkça azalması da bu durumu destekler niteliktedir.



Şekil 15. O_3 parametresinin a) İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı üzerinde 2018-2023 zaman aralığında yıllık ortalama sonuçları.

3.6. Genel Değerlendirme

Uçak emisyonlarından kaynaklanan beş hava kalite parametresinin aylık zaman serisi analizi Sentinel-5P uydu verileri ile İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı özelinde gerçekleştirilmiştir. Birçok çalışma Sentinel-5P uydu verilerinin yersel hava kalite verileri ile yüksek korelasyon gösterdiğini ve atmosferik parametrelerin konsantrasyonlarını iyi yansıttığını ifade etmiştir (Zheng vd. 2019, Sharifi ve Felegari 2022). Ancak çalışma alanının kapsamının dar olduğu bölgelerde Sentinel-5P gibi atmosferik uydularla çalışmak zorlaşmaktadır. İstanbul Havalimanı kapsama alanı ile geniş bir alana yayılsa da Rize-Artvin Havalimanı oldukça küçük bir bölgede kalmaktadır ve uydu verileri ile elde edilen zaman serilerinin yorumlanması tek başına yeterli olmamaktadır.

Her iki havalimanında da yersel hava kalite istasyonları bulunmadığından ve en yakın istasyonların havalimanlarından oldukça uzakta olması, elde edilen zaman serilerinin yersel veriler ile doğrulanmasını mümkün kılmamaktadır. Bu sebeple, hava kalitesinin uçuş

trafiği ile olan ilişkisinin gözlemlenmesinde, aylık zaman serileri üretilmiş ve bunlara bağlı olarak her iki değişken arasındaki korelasyon değerleri hesaplanmış ve Çizelge 3'te verilmiştir. Yıl bazında da gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda, CO, NO_2, O_3 ve SO_2 parametreleri 2020 yılı hariç negatif korelasyon gösterirken, UV parametresi 2019 yılı dışında pozitif korelasyon göstermiştir. Özellikle NO_2 ve SO_2 parametrelerinin 2020 yılında pozitif ve yüksek korelasyon göstermesi (sırasıyla 0.66 ve 0.60), COVID-19 salgını ile ilişkilendirilebilmektedir. Birçok çalışma COVID-19 salgını sonrasında insan faaliyetlerinin azalması ile hava kalite parametrelerinde iyileşme olduğunu ortaya koymuştur (Ghasempour vd. 2021, Muniraj vd. 2023). 2020 yılında da COVID-19 salgını sebebiyle insan faaliyetlerinin azalması ile baskın kirletici etkenlerin azalması, havayolu faaliyetlerinin hava kalite parametrelerine etkilerini NO_2 ve SO_2 parametrelerinde görülen pozitif korelasyon ile ortaya koymaktadır. UV parametresi ise 2021 yılında aylık uçak trafiği ile oldukça yüksek bir korelasyon (0.91) göstermiştir ve dört yıllık periyotta da yüksek korelasyon (0.61) göstermektedir.

Rize-Artvin Havalimanı'nda ise hava kalite parametreleri, aylık uçak trafiği verisi ile genel olarak negatif korelasyon gösterse de NO_2 parametresi 2022 yılında 0.73, CO parametresi ise yaklaşık olarak iki yıllık periyotta 0.41 korelasyon göstermiştir. UV parametresinin korelasyonu ise 2022 yılında negatif iken 2023 yılında pozitif olmaktadır.

Çizelge 3. İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı özelinde aylık uçak trafiği ve hava kalite parametreleri arasındaki korelasyon değerleri.

Yıl \ Parametre	CO	NO_2	O_3	UV	SO_2
İstanbul Havalimanı					
2019	-0.80	-0.45	-0.52	-0.73	-0.69
2020	-0.05	**0.66**	0.16	0.09	0.60
2021	-0.26	-0.39	-0.75	**0.91**	-0.21
2022	-0.77	-0.53	-0.72	0.37	-0.19
2023	**0.48**	-0.69	-0.51	0.43	-0.61
2019-2023	-0.44	0.03	-0.17	**0.61**	-0.17
Rize-Artvin Havalimanı					
2022	-0.22	**0.73**	-0.89	-0.45	-0.56
2023	0.01	-0.27	-0.72	0.26	-0.77
2022-2023	**0.41**	0.07	-0.42	-0.29	-0.32

Uçak trafiği verilerinin hava kalite parametreleri üzerindeki etkilerinin araştırılması için Granger Nedensellik testi uygulanmıştır. Granger Nedensellik testi uygulanmadan önce zaman serilerine Artırılmış Dickey Fuller (ADF) testi uygulanmıştır ve zaman serilerinin durağanlığı belirlenmiştir. Durağan olmayan zaman serilerine fark alma işlemi uygulanarak Granger Nedensellik testine tabi tutulmuşlardır. Çizelge 4'te İstanbul Havalimanı özelinde gerçekleştirilen test sonuçları (F testi sonucu ve p değeri) verilmiştir. p değerleri Çizelge 2'de verilen kategorizasyona göre verilmiştir. Çizelge 4'te verilen lag ifadesi ise gecikme süresini ifade etmektedir. Gecikme süreleri 1 ve 2 olarak uygulanmıştır.

Çizelge 4. İstanbul Havalimanı özelinde parametreler arasında gerçekleştirilen Granger Nedensellik testi sonucu.

Veri	Parametre	F-testi (lag:1)	p	F-testi (lag:2)	p
Tüm Uçak Trafiği	CO	0.1059	0.7460	2.4184*	0.0977*
	NO_2	0.1921	0.6626	0.9140	0.4064
	O_3	0.9668	0.3292	2.7007*	0.0753*
	UV	0.8223	0.3680	0.6023	0.5509
	SO_2	0.0924	0.7625	0.2530	0.7776
CO	NO_2	2.6555	0.1083	0.4036	0.6697
	O_3	2.8960*	0.0938*	3.5022**	0.0365**
	UV	5.4120**	0.0233**	4.7313**	0.0125**
	SO_2	0.9250	0.3411	1.2391	0.2996
NO_2	CO	11.0939***	0.0015***	6.8069***	0.0022***
	O_3	2.4286	0.1242	1.7471	0.1832
	UV	0.5165	0.4751	0.2503	0.7794
	SO_2	2.5552	0.1166	1.4846	0.2377
O_3	CO	0.4146*	0.5220*	2.7951*	0.0692*
	NO_2	5.9024**	0.0180**	6.8438***	0.0021***
	UV	0.0106	0.9183	0.1270	0.8810
	SO_2	3.2658*	0.0771*	3.9709**	0.0260**
UV	CO	0.9662	0.3295	0.2094	0.8117
	NO_2	0.5076	0.4789	0.4154	0.6620
	O_3	0.4852	0.4887	1.9154	0.1565
	SO_2	3.4049*	0.0713*	2.3165	0.1105
SO_2	CO	0.1616	0.6896	0.6101	0.5478
	NO_2	0.4258	0.5172	0.7373	0.4842
	O_3	1.7052	0.1980	0.3779	0.6875
	UV	0.0006	0.9813	0.1921	0.8259

Çizelge 2'de verilen aralıklar dikkate alınarak: *; $0.05 \leq p < 0.10$, **; $0.01 \leq p < 0.05$, ***; $0.001 \leq p < 0.01$.

Çizelge 4'te elde edilen sonuçlar doğrultusunda, tüm uçak trafiğinin CO ve O_3 parametreleri üzerindeki etkisinin 1 aylık gecikme süresinde istatistiksel olarak anlamlı olmadığı ancak 2 aylık gecikme süresinde istatistiksel olarak anlamlılık eğiliminde olduğu belirlenmiştir. NO_2, UV ve SO_2 parametreleri üzerinde ise istatistiksel olarak anlamlı bulunamamıştır. Uçuş trafiğinin SO_2 parametresi üzerinde anlamlı bir etkisinin tespit edilememesi, SO_2 parametresinin daha çok ısıtma ve soğutma faaliyetlerinden kaynaklanması ile ilişkilendirilebilmektedir (Ghasempour vd. 2021). Bu faaliyetlerin yoğun olduğu dönemler olan kış aylarında yoğunluğunun yüksek, yaz aylarında ise düşük olması da bu durumla açıklanabilmektedir.

İstanbul Havalimanı'nda parametrelerin birbiri üzerindeki etkisi incelendiğinde, NO_2 parametresinin sadece CO parametresi üzerinde etkisi olduğu ve etkisinin yüksek düzeyde istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. CO ve O_3 parametreleri arasında geri beslemeli bir ilişki

olduğu ve birbiri üzerindeki etkisinin çok yüksek düzeyde istatistiksel anlamlı olduğu tespit edilmiştir. UV parametresinin sadece SO_2 parametresi üzerinde etkisi olduğu, SO_2 parametresinin ise hiçbir parametreyi etkilemediği belirlenmiştir. CO parametresinin UV üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu ancak, geri beslemeli bir ilişki olmadığı belirlenmiştir. O_3 parametresinin ise NO_2 ve SO_2 parametreleri üzerinde de istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Benzer süreç Rize-Artvin Havalimanı için de uygulanmıştır ve Çizelge 5'te test sonuçları (F testi sonucu ve p değeri) verilmiştir.

Çizelge 5. Rize-Artvin Havalimanı özelinde parametreler arasında gerçekleştirilen Granger Nedensellik testi sonucu.

Veri	Parametre	F-testi (lag:1)	p	F-testi (lag:2)	p
Tüm Uçak Trafiği	CO	0.5417	0.5915	1.0493	0.3179
	NO_2	0.6419	0.4320	2.7195*	0.0929*
	O_3	0.0304	0.8632	1.0172	0.3815
	UV	0.4553	0.5072	0.1002	0.9051
	SO_2	1.5764	0.2285	1.2968	0.3091
CO	NO_2	2.2093	0.1528	0.9549	0.4046
	O_3	0.0019	0.9656	0.4528	0.6433
	UV	3.7538*	0.0669*	0.7293	0.4967
	SO_2	0.0586	0.8122	1.2608	0.3214
NO_2	CO	0.6204	0.4401	0.6034	0.5582
	O_3	0.6831	0.4183	0.6664	0.5265
	UV	3.7470*	0.0665*	1.7841	0.1964
	SO_2	0.8910	0.3612	0.1965	0.8244
O_3	CO	0.8336	0.3721	0.8471	0.4460
	NO_2	4.5347**	0.0458**	3.3919*	0.0576*
	UV	0.5943	0.4498	0.8873	0.4300
	SO_2	5.9556**	0.0286**	2.9396*	0.0949*
UV	CO	2.3779	0.1387	0.4108	0.6695
	NO_2	3.2382*	0.0863*	0.4465	0.6468
	O_3	0.1500	0.7027	0.9221	0.4167
	SO_2	1.2033	0.2912	0.5401	0.5974
SO_2	CO	0.2658	0.6142	2.1699	0.1606
	NO_2	2.4796	0.1376	1.1182	0.3614
	O_3	1.6224	0.2235	2.6221	0.1172
	UV	0.0061	0.9389	0.3187	0.7336

Çizelge 2'de verilen aralıklar dikkate alınarak: *; $0.05 \leq p < 0.10$, **; $0.01 \leq p < 0.05$.

Çizelge 5 incelendiğinde, Rize-Artvin Havalimanı'nda tüm uçak trafiği ile parametreler arasındaki ilişki incelendiğinde, uçak trafiğinin sadece NO_2 parametresi üzerinde istatistiksel olarak anlamlılık eğiliminde bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 3'te verilen korelasyon sonuçlarında da yine NO_2 parametresi ile korelasyonunun olması bu durumu destekler niteliktedir.

Parametrelerin birbiri üzerindeki etkisi incelendiğinde, CO parametresinin UV parametresi üzerindeki etkisi, istatistiksel olarak anlamlılık eğilimi göstermiştir. NO_2 ve UV parametrelerinin ise birbiri üzerinde geri beslemeli bir ilişkisi olduğu görülmektedir. SO_2 parametresinin diğer parametreler üzerinde bir etkisi olmadığı görülürken, İstanbul Havalimanı'nda olduğu gibi O_3 parametresinin NO_2 ve SO_2 parametreleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu görülmektedir. Genel olarak sonuçların İstanbul Havalimanı'nda elde edilen sonuçlardan farklı olmasının sebebi, havalimanının hizmete Mayıs 2022'de başlamış olması ve uçak trafiğinin daha az olması gösterilebilmektedir.

Sentinel-5P verisi hava kalite parametrelerinin takibinde önemli bir çağın başlangıcı olmuştur. Sadece nokta bazlı yersel analizlerle değil, hava kalite parametrelerinin mekansal dağılımının belirlenmesi için de önemli bir veri kaynağı sunmaktadır. Özellikle kentsel alanlardaki kirletici aktivitelerin belirlenmesi (Ayoobi vd. 2022, Morillas vd. 2024b) ve insan faaliyetlerinin azaldığında etkilerinin izlenebilmesi (örn. COVID-19 pandemi süreci) (Mathew vd. 2024, Morillas vd. 2024a) açısından değerli bir gelişmedir. Elde edilen tüm bulgular ışığında Sentinel-5P uydu verileri değerlendirildiğinde, özellikle NO_2 ve CO parametreleri üzerinde uçuş faaliyetlerinin etkisi olduğu belirlenmiştir. Sentinel-5P uydu verileri ile kentsel alanlarda gerçekleştirilen çalışmalarda da NO_2 parametresinin değişiminde havayolu aktivitelerinin etkileri ortaya konulmuştur (Shikwambana ve Kganyago 2021, Morillas vd. 2024b). Ayrıca yersel ölçümlerle gerçekleştirilen çalışmalar da NO_2 ve CO parametrelerinin havayolu faaliyetlerindeki önemini ortaya koymuştur (Popescu vd. 2011). Sentinel-5P verileri genel değerlendirme yapılabilmesi açısından oldukça önemli bir veri olsa da detaylı değerlendirmelerin gerçekleştirilebilmesi için mekansal çözünürlüğü yetersiz kalmaktadır ve yersel ölçmelere gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca uydu verileri, uydu geçiş saatleri ile sınırlı kalırken, yersel ölçmeler gün içerisinde belirli aralıklarla gerçekleştirilebilmektedir. Dolayısıyla hem yersel hem de uzaktan algılama verilerinin entegre kullanımı daha kararlı ve anlamlı bir havayolları hava kalitesi takip sistemi kurulmasına olanak sağlayacaktır.

4. Sonuçlar

Hava kalite parametreleri, insan sağlığını etkileyen ve takip edilmesi gereken önemli parametrelerdir. Kentleşmenin artışı ve buna dayalı olarak ulaşım sistemlerinin gelişmesinin, hava kalite parametreleri üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, var olan bir ekosistemin tahrip edilerek yerine havalimanı inşa edilmesinin ve uçak trafiğinden kaynaklanan emisyonların hava kalitesine olası etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, analizler sulak alanların ıslah edilmesiyle elde edilen alan üzerine inşa edilen İstanbul Havalimanı ve Türkiye'de deniz dolgusu üzerine inşa

edilen ikinci havalimanı olan Rize-Artvin Havalimanı üzerinde incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Türkiye kapsamında, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından web ortamında Sürekli İzleme Merkezi oluşturularak hava kalite istasyonları ile nokta bazlı olarak hava kalite parametreleri takip edilmektedir. Ülkesel ölçekte bu sistemin önemli bir yeri olsa da lokal ölçekte istasyon sayılarının sınırlı olması mekânsal analizleri kısıtlamaktadır. Bu noktada, 2018 yılından beri servis edilen Sentinel-5P uydu verileri ile hava kalite parametrelerinin mekânsal dağılımları analiz edilebilmektedir. Bu veri kaynağı, özellikle kirletici kaynaklarının belirlenmesinde etkili bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, seçilen iki havalimanı üzerinde hava kalite parametrelerinin değişimi zaman serisi analizleri ile incelenmiştir. COVID-19 salgını sırasında uygulanan uçuş kısıtlamalarının hava kalite parametrelerinin azalmasında etkisinin görülmesinin yanı sıra her iki havalimanının Karadeniz'e kıyısı olması sebebiyle deniz-kara meltemi sirkülasyonunun etkilerinin ozon parametresi üzerindeki etkileri gözlenmiştir. CO parametresinin zaman serisi trendinin havalimanları inşa edildikten sonra da stabil ilerlediği, UV, SO_2, NO_2 ve O_3 parametrelerinin ise özellikle son yıllarda artış gösterdiği tespit edilmiştir.

DHMI tarafından servis edilen aylık tüm uçak trafiği verileri kullanılarak hava kalite parametrelerinin aylık hava kalite parametreleri üzerindeki etkisi korelasyon analizi ve Granger Nedensellik testi ile incelenmiş ve anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Mevcut hava kalite istasyonlarının havalimanlarına uzak olması sebebiyle, elde edilen sonuçların yer gerçeklik verisiyle ilişkisine yönelik bir değerlendirme mümkün olamamıştır ancak istatistiksel ve görsel analizler ile uçak trafiğinin hava kalitesi üzerindeki etkileri çok yönlü olarak ortaya konmuştur. İstasyon verileri ile uydu verilerinin entegre edilerek bir hava kalitesi izleme sisteminin kurulması, sadece nokta bazlı değil mekânsal değerlendirmelere ve beraberinde kirletici kaynaklarının kolaylıkla belirlenmesine olanak sağlayacaktır. Böylece, doğal habitatlar üzerine inşa edilen havalimanı gibi yeni ulaşım altyapılarının da hava kalitesine etkileri yüksek doğruluklarda takip edilebilecektir.

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı
Yazar 1: Araştırma, Fikir Sahibi, Kaynaklar, Araştırma, Metodoloji, Analiz ve yorumlama, Yazma – orijinal taslak, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı
Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği/ Data Availability Statement
Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, ücretsiz servis edilen kaynaklardan elde edilmiştir.

5. Kaynaklar

Abida, R., El Amraoui, L., Ricaud, P., Lahoz, W., Eskes, H., Segers, A., ... and Veihelmann, B., 2016. Impact of spaceborne carbon monoxide observations from the S-5P platform on tropospheric composition analyses and forecasts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2016(2)**, 1-1.

Adhikari, A., and Yin, J., 2020. Short-term effects of ambient ozone, PM2. 5, and meteorological factors on COVID-19 confirmed cases and deaths in Queens, New York. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17(11)**, 4047. https://doi.org/10.3390/ijerph17114047

Asadifard, E., and Masoudi, M., 2018. Status and prediction of carbon monoxide as an air pollutant in Ahvaz City, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, **16(3)**, 203-213. https://doi.org/10.22124/cjes.2018.3061

Ayoobi, A. W., Ahmadi, H., Inceoglu, M., and Pekkan, E., 2022. Seasonal impacts of buildings' energy consumption on the variation and spatial distribution of air pollutant over Kabul City: application of Sentinel—5P TROPOMI products. *Air Quality, Atmosphere & Health*, **15(1)**, 73-83. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34774-9

Beirle, S., Borger, C., Dörner, S., Li, A., Hu, Z., Liu, F., ... and Wagner, T., 2019. Pinpointing nitrogen oxide emissions from space. *Science Advances*, **5(11)**, eaax9800. https://doi.org/10.1126/sciadv.aax9800

Birinci, E., Denizoğlu, M., Özdemir, H., Özdemir, E. T., and Deniz, A., 2023. Ambient air quality assessment at the airports based on a meteorological perspective. *Environmental Monitoring and Assessment*, **195(12)**, 1542. https://doi.org/10.1007/s10661-023-12135-3

Bodah, B. W., Neckel, A., Maculan, L. S., Milanes, C. B., Korcelski, C., Ramírez, O., ... and Oliveira, M. L., 2022. Sentinel-5P TROPOMI satellite application for NO2 and CO studies aiming at environmental valuation. *Journal of Cleaner Production*, **357**, 131960. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131960

Catane, S. G., Flora, J. R. R., Carag, J. W. M., Capino, J. B., Go, C. M., and Panganiban, A. L. L., 2024. Development in an environmentally critical coastal area: The risk perception on natural hazards and the New Manila International Airport by fishing communities in Taliptip, Philippines. *Ocean & Coastal Management*, **253**, 107127. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107127

Cavalié, O., Cappa, F., and Pinel-Puysségur, B., 2023. Three decades of coastal subsidence in the slow-moving Nice Côte d'Azur Airport area (France) revealed by InSAR (interferometric synthetic-aperture radar): insights into the deformation mechanism. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **23(10)**, 3235-3246. https://doi.org/10.5194/nhess-23-3235-2023

Cullis, C. F., and Hirschler, M. M., 1980. Atmospheric sulphur: natural and man-made sources. *Atmospheric Environment (1967)*, **14(11)**, 1263-1278. https://doi.org/10.1016/0004-6981(80)90228-0

Çilek, M. Ü., 2022. Troposferik Nitrojen Dioksitin (NO_2) COVID-19 Pandemisinde Mekânsal ve Zamansal Analizi: Adana-Mersin Bölgesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **27(3)**, 581-594. https://doi.org/10.53433/yyufbed.1119418

De Nevers, N., 2010. Air pollution control engineering. Waveland press.

Dentener, F., Emberson, L., Galmarini, S., Cappelli, G., Irimescu, A., Mihailescu, D., ... and van den Berg, M., 2020. Lower air pollution during COVID-19 lock-down: improving models and methods estimating ozone impacts on crops. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **378(2183)**, 20200188. https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0188

Durmaz, V., Küçükönal, H., Özen, M., ve Banar, M., 2007. Havaalanı faaliyetlerinin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik mevzuat. *Sosyal Bilimler*, **5(1)**, 66-87.

Dursun, S., Kunt, F., and Taylan, O., 2015. Modelling sulphur dioxide levels of Konya city using artificial intelligent related to ozone, nitrogen dioxide and meteorological factors. International Journal of *Environmental Science and Technology*, **12**, 3915-3928. https://doi.org/10.1007/s13762-015-0821-2

Ekici, S., and Şöhret, Y., 2021. A study on the environmental and economic aspects of aircraft emissions at the Antalya International Airport. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 10847-10859. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11306-w

Elbir, T., 2008. Estimation of engine emissions from commercial aircraft at a midsized Turkish airport. *Journal of Environmental Engineering*, **134(3)**, 210-215.

El-Khoury, C., Alameddine, I., Zalzal, J., El-Fadel, M., and Hatzopoulou, M., 2021. Assessing the intra-urban variability of nitrogen oxides and ozone across a highly heterogeneous urban area. *Environmental Monitoring and Assessment*, **193**, 1-22. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09414-2

Fares, S., Park, J. H., Ormeno, E., Gentner, D. R., McKay, M., Loreto, F., ... and Goldstein, A. H., 2010. Ozone uptake by citrus trees exposed to a range of ozone concentrations. *Atmospheric Environment*, **44(28)**, 3404-3412. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.010

Ghasempour, F., Sekertekin, A., and Kutoglu, S. H., 2021. Google Earth Engine based spatio-temporal analysis of air pollutants before and during the first wave COVID-19 outbreak over Turkey via remote sensing. *Journal of Cleaner Production*, **319**, 128599. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128599

Gökçe, A., 2002. İMKB'de fiyat-hacim ilişkisi: granger nedensellik testi. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, **4(3)**, 43-48.

Granger, C. W., 1969. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, **37(3)**, 424-438. https://doi.org/10.2307/1912791

Gürçam, S., Konuralp, E., and Ekici, S., 2021. Determining the effect of air transportation on air pollution in the most polluted city in Turkey. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **93(2)**, 354-362. https://doi.org/10.1108/AEAT-08-2020-0176

Halder, B., Ahmadianfar, I., Heddam, S., Mussa, Z. H., Goliatt, L., Tan, M. L., ... and Yaseen, Z. M., 2023. Machine learning-based country-level annual air pollutants exploration using Sentinel-5P and Google Earth Engine. *Scientific Reports*, **13(1)**, 7968. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34774-9

Hashim, B. M., Al-Naseri, S. K., Al-Maliki, A., and Al-Ansari, N., 2021. Impact of COVID-19 lockdown on NO2, O3, PM2. 5 and PM10 concentrations and assessing air quality changes in Baghdad, Iraq. *Science of the Total Environment*, **754**, 141978. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141978

Hou, Y., Wang, L., Zhou, Y., Wang, S., Liu, W., and Zhu, J., 2019. Analysis of the tropospheric column nitrogen dioxide over China based on satellite observations during 2008–2017. *Atmospheric Pollution Research*, **10(2)**, 651-655. https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.11.003

Jeoloji Mühendisleri Odası (JMO), 2014. Çevre Jeolojisi Açısından 3. Havaalanı. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/7c4e571 39a05e51_ek.pdf

Jiang, L., and Lin, H., 2010. Integrated analysis of SAR interferometric and geological data for investigating long-term reclamation settlement of Chek Lap Kok Airport, Hong Kong. *Engineering Geology*, **110(3-4)**, 77-92. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.11.005

Kanniah, K. D., Kamarul Zaman, N. A. F., and Perumal, K., 2021. Analysis of NO2 tropospheric column amount at airports in Malaysia before and during COVID-19

pandemic using SENTINEL-5P tropomi data. The *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **43**, 399-403. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-399-2021

Kesgin, U., 2006. Aircraft emissions at Turkish airports. *Energy*, **31(2-3)**, 372-384. https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.01.012

Kooreman, M. L., Stammes, P., Trees, V., Sneep, M., Tilstra, L. G., de Graaf, M., ... and Veefkind, J. P., 2020. Effects of clouds on the UV Absorbing Aerosol Index from TROPOMI. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **13(12)**, 6407–6426. https://doi.org/10.5194/amt-13-6407-2020

Kul, S., 2014. İstatistik Sonuçlarının Yorumu: P Değeri ve Güven Aralığı Nedir?/Interpretation of Statistical Results: What Is P Value and Confidence Interval?. *Plevra Bülteni*, **8(1)**, 11.

Kurniawan, J. S., and Khardi, S., 2011. Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants, environmental impact assessment around airports. *Environmental Impact Assessment Review*, **31(3)**, 240-252. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2010.09.001

Lee, D. S., Pitari, G., Grewe, V., Gierens, K., Penner, J. E., Petzold, A., ... and Sausen, R., 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*, **44(37)**, 4678-4734. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.005

Liu, X., Zhao, C., Zhang, Q., Yang, C., and Zhang, J., 2019. Characterizing and monitoring ground settlement of marine reclamation land of Xiamen New Airport, China with Sentinel-1 SAR datasets. *Remote Sensing*, **11(5)**, 585. https://doi.org/10.3390/rs11050585

Magro, C., Nunes, L., Gonçalves, O. C., Neng, N. R., Nogueira, J. M., Rego, F. C., and Vieira, P., 2021. Atmospheric trends of CO and CH4 from extreme wildfires in Portugal using Sentinel-5P TROPOMI level-2 data. *Fire*, **4(2)**, 25. https://doi.org/10.3390/fire4020025

Makineci, B. H., Arıkan, D., Alkan, D., and Karasaka, L., 2023. Spatio-temporal Analysis of Sentinel-5P Data of Konya City Between 2019-2021. *Harita Dergisi*, **170**, 23-40.

Mao, H., and Talbot, R., 2004. Role of meteorological processes in two New England ozone episodes during summer 2001. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **109(D20)**. https://doi.org/10.1029/2004JD004850

Mathew, A., Shekar, P. R., Nair, A. T., Mallick, J., Rathod, C., Bindajam, A. A., ... Abdo, H. G., 2024. Unveiling urban air quality dynamics during COVID-19: a Sentinel-5P TROPOMI hotspot analysis. *Scientific Reports*, **14(1)**, 21624. https://doi.org/10.1038/s41598-024-72276-4

Mendez-Espinosa, J. F., Rojas, N. Y., Vargas, J., Pachón, J. E., Belalcazar, L. C., and Ramírez, O., 2020. Air quality variations in Northern South America during the COVID-19 lockdown. *Science of the Total Environment*, **749**, 141621. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141621

Morillas, C., Alvarez, S., Pires, J. C., Garcia, A. J., and Martinez, S., 2024a. Impact of the implementation of Madrid's low emission zone on NO2 concentration using Sentinel-5P/TROPOMI data. *Atmospheric Environment*, **320**, 120326. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120326

Morillas, C., Alvarez, S., Serio, C., Masiello, G., and Martinez, S., 2024b. TROPOMI NO2 Sentinel-5P data in the Community of Madrid: A detailed consistency analysis with in situ surface observations. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **33**, 101083. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101083

Muhammad, S., Long, X., and Salman, M., 2020. COVID-19 pandemic and environmental pollution: A blessing in disguise?. *Science of The Total Environment*, **728**, 138820. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138820

Muniraj, K., Panneerselvam, B., Devaraj, S., Jesudhas, C. J., and Sudalaimuthu, K., 2023. Evaluating the effectiveness of emissions reduction measures and ambient air quality variability through ground-based and Sentinel-5P observations under the auspices of COVID pandemic lockdown in Tamil Nadu, India. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, **103(13)**, 3109-3120. https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1902997

Penning de Vries, M. J. M., Beirle, S., and Wagner, T., 2009. UV aerosol indices from SCIAMACHY: introducing the SCattering Index (SCI). *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9(24)**, 9555-9567. https://doi.org/10.5194/acp-9-9555-2009

Pinder, R. W., Klopp, J. M., Kleiman, G., Hagler, G. S., Awe, Y., and Terry, S., 2019. Opportunities and challenges for filling the air quality data gap in low-and middle-income countries. *Atmospheric Environment*, **215**, 116794. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.032

Popescu, F., Ionel, I., and Talianu, C., 2011. Evaluation of Aır Quality in Airport Areas by Numerical Simulation. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, **10(1)**, 115-120.

Rosner, B., 2010. Fundamentals of Biostatistics, 7th edition. Brooks/Cole, Boston/USA.

Seker, D. Z., Kaya, S., Alkan, R. M., Tanik, A., and Saroglu, E., 2008. 3D coastal erosion analysis of Kilyos-Karaburun region using multi-temporal satellite image data. *Fresenius Environmental Bulletin*, **17(11b)**, 1977-1982.

Schäfer, K., Jahn, C., Sturm, P., Lechner, B., and Bacher, M., 2003. Aircraft emission measurements by remote sensing methodologies at airports. *Atmospheric Environment*, **37(37)**, 5261-5271. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.002

Sharifi, A., and Felegari, S., 2022. Nitrogen dioxide (NO2) pollution monitoring with sentinel-5P satellite imagery over during the coronavirus pandemic (case study: Tehran). *Remote Sensing Letters*, **13(10)**, 1029-1039. https://doi.org/10.1080/2150704X.2022.2120780

Shikwambana, L., and Kganyago, M., (2021). Assessing the responses of aviation-related SO2 and NO2 emissions to COVID-19 lockdown regulations in South Africa. *Remote Sensing*, **13(20)**, 4156. https://doi.org/10.3390/rs13204156

Shojaie, A., and Fox, E. B., 2022. Granger causality: A review and recent advances. *Annual Review of Statistics and Its Application*, **9(1)**, 289-319. https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-040120-010930

Song, N. Q., Wang, N., and Lin, W. N., 2022. Assessment of the impact of artificial island airport reclamation on marine ecosystem health: A case study of the Dalian offshore airport, China. *Ocean & Coastal Management*, **226**, 106281. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106281

Takım, A., 2010. Türkiye'de GSYİH ile ihracat arasındaki ilişki: granger nedensellik testi. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, **14(2)**, 315-330.

Theys, N., Romahn, F., Wagner, T., 2023. S5P Mission Performance Centre Sulphur Dioxide [L2__SO2____] Readme, pp. 1–18, S5P-MPC-BIRA-PRF-SO2, https://sentinel.esa.int/documents/247904/3541451/Sentinel-5P-Sulphur-Dioxide-Readme.pdf.

Transportation Research Board (TRC), 2021. Critical Issues in Aviation and the Environment 2021. Washington, D.C. https://sites.google.com/site/trbav030/publications

Turnacıgil, A., 2008. Yeniköy Ağaçlı Civarındaki Maden Ocaklarının Rehabilitasyonu, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 134.

Unal, A., Hu, Y., Chang, M. E., Odman, M. T., and Russell, A. G., 2005. Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport. *Atmospheric Environment*, **39(32)**, 5787-5798. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.051

Vîrghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B. A., Nistor, C., and Dobre, R., 2020. Nitrogen Dioxide (NO2) Pollution monitoring with Sentinel-5P satellite imagery over Europe during the coronavirus pandemic outbreak. *Remote Sensing*, **12(21)**, 3575. https://doi.org/10.3390/rs12213575

Wagner, N. L., Riedel, T. P., Roberts, J. M., Thornton, J. A., Angevine, W. M., Williams, E. J., ... and Brown, S. S., 2012. The sea breeze/land breeze circulation in Los Angeles and its influence on nitryl chloride production in this region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **117(D21)**. https://doi.org/10.1029/2012JD017810

Wang, H., Lyu, X., Guo, H., Wang, Y., Zou, S., Ling, Z., ... and Shen, J., 2018. Ozone pollution around a coastal region of South China Sea: interaction between marine and continental air. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18(6)**, 4277-4295. https://doi.org/10.5194/acp-18-4277-2018

Yağmur, N., ve Musaoğlu, N., 2022. Havalimanlarında yapısal değişimlerin PSInSAR tekniği ile belirlenmesi: İstanbul Havalimanı örneği. *Harita Dergisi*, **168**, 28-37.

Zeydan, Ö., and Şekertekin, Y. Y., 2022. GIS-based determination of Turkish domestic flights emissions. *Atmospheric Pollution Research*, **13(2)**, 101299. https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101299

Zheng, Z., Yang, Z., Wu, Z., and Marinello, F., 2019. Spatial variation of NO2 and its impact factors in China: An application of sentinel-5P products. *Remote Sensing*, **11(16)**, 1939. https://doi.org/10.3390/rs11161939

Zhuo, G., Dai, K., Huang, H., Li, S., Shi, X., Feng, Y., ... and Deng, J., 2020. Evaluating potential ground subsidence geo-hazard of Xiamen Xiang'an new airport on reclaimed land by SAR interferometry. *Sustainability*, **12(17)**, 6991. https://doi.org/10.3390/su12176991

İnternet kaynakları

1- European Space Agency (ESA). 2024. https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s5p-mission

2- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB). 2023. Ulaştırma Türlerine Göre Taşınan Yolcu ve Yük Miktarı. https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turlerine-gore-tasinan-yolcu-ve-yuk-miktari-i-85789

3- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Sürekli İzleme Merkezi (ÇŞİDB-SİM). 2024. https://sim.csb.gov.tr/Intro/ParametersMeta

4- Google Earth Engine (GEE). 2024. https://earthengine.google.com/

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1541763
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035601 (604-612)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035601 (604-612)

Total Dissipated Energy Prediction for Flexure-Dominated Reinforced Concrete Columns via Extreme Gradient Boosting

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 01.09.2024
Kabul/Accepted: 09.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Eğilme Etkisi Altındaki Betonarme Kolonlar için Toplam Tüketilen Enerji Seviyesinin Aşırı Gradyan Artırma Yaklaşımı ile Tahmini

Ziya MÜDERRİSOĞLU*

İstanbul Beykent University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Civil Engineering, İstanbul, Türkiye

Abstract

This study aims to provide an efficient framework for predicting the total dissipated energy level of flexure-dominated reinforced concrete columns via a commonly used machine learning method, extreme gradient boosting. A database including 177 reinforced concrete columns is compiled using open-access databases. The proposed framework predicts the target total dissipated energy depending on seven fundamental features: concrete compressive strength, longitudinal rebar yield strength, shear span-to-depth ratio, longitudinal rebar ratio, transverse rebar volumetric ratio, peak drift ratio, and equivalent damping ratio. Results of a correlation-based quantitative analysis reveal that peak drift ratio, yield strength of longitudinal rebars, and concrete compressive strength are the most effective parameters on a target parameter among the other features. K-Fold cross-validation is implemented for the classification process. Validation results show that three fundamental performance indicators such as the means of correlation of determination, normalized root mean square error, and mean absolute percentage error are evaluated as 0.75, 0.38, and 0.33, respectively. Moreover, the accuracy level of the algorithm is tested by comparing with the results obtained based on support vector machine, multilayer perceptron, and random forest techniques. Among these, the implemented extreme gradient boosting is the most successful model for predicting the energy levels that represent the highest correlation of determination. The sensitivity of predicted targets to algorithm-based hyperparameters is also investigated for the implemented algorithm. The results of this study are expected to contribute to energy-based design applications in the scope of predicting the dissipated energy capacity of flexure-dominated reinforced concrete column members.

Keywords: *Energy-based design; Total dissipated energy; XGBoost; Reinforced concrete columns.*

Öz

Bu çalışma, betonarme kolonlarda tüketilen toplam enerji seviyesinin uygulamalarda yaygın olarak kullanılan aşırı gradian artırma yaklaşımı ile tahminine yönelik etkin bir algoritma önerilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda, açık erişimli veri tabanları kullanılarak 177 adet betonarme kolona ait özellikleri içeren bir veri tabanı derlenmiştir. Öne sürülen çerçeve, hedef toplam tüketilen enerji seviyesini 7 temel özelliğe bağlı olarak tahmine olanak sağlamaktadır: beton basınç dayanımı, boyuna donatı akma dayanımı, kesme açıklığı-derinlik oranı, boyuna donatı oranı, enine donatı hacimsel oranı, maksimum ötelenme oranı ve eşdeğer sönüm oranı. Gerçekleştirilen korelasyon esaslı sayısal analizler sonucunda, seçilen özellikler arasında toplam tüketilen enerji üzerinde en etkin olan parametrelerin maksimum ötelenme oranı, boyuna donatı akma dayanımı ve beton dayanımı olduğu belirlenmiştir. Verilerin sınıflandırılması sürecinde K-katlı çapraz geçerlilik yaklaşımı uygulanmıştır. Geçerlilik sonuçları, üç temel performans göstergesine (belirleme katsayısı, normalize edilmiş kök ortalama kare hatası ve ortalama mutlak yüzde hatası) ait ortalama değerlerin sırasıyla 0.75, 0.38 ve 0.33 olarak belirlendiğini göstermiştir. İlave olarak, çalışmada kullanılan model ile tahmin edilen sonuçların hassasiyeti, destek vektör makinesi, çoklu katman algılayıcı ve rastgele orman modelleri esaslı sonuçlar ile test edilmiştir. Sonuç olarak enerji seviyesinin tahmininde en başarılı modelin aşırı gradian artırma yaklaşımı olduğu, belirleme katsayısına dikkate alınarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, tahmin edilen enerji seviyelerinin kullanılan algoritma bazlı parametrelere bağlı hassasiyet seviyeleri de araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarının, özellikle son yıllarda artan enerji esaslı tasarım uygulamalarına, eğilme etkisi altındaki betonarme kolon elemanlarda tüketilen toplam enerji seviyesinin tahmini kapsamında katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Enerji-esaslı tasarım; Toplam tüketilen enerji seviyesi; Aşırı gradyan artırma yaklaşımı; Betonarme kolonlar.*

1. Introduction

The energy dissipation capacity of a reinforced concrete member is usually considered to indicate the cyclic behavior with two more critical parameters: strength and deformability (Park and Eom 2006). The accurate prediction of dissipated energy capacity and the identification of factors that affect the capacity play critical roles in both conventional and recently popular

**Corresponding Author/Sorumlu Yazar: Ziya MÜDERRİSOĞLU* *e-mail/e-posta: ziyamuderrisoglu@beykent.edu.tr*

energy-based seismic design approaches (Yalçın et al. 2021). Consequently, several studies based on the investigation of the energy dissipation capacity of reinforced concrete members have been performed in the past. Park and Eom (2006) developed a simplified method to predict the dissipated energy level for flexure-dominated RC members via nonlinear finite element analysis.

The accuracy of the proposed method was verified by comparing the results with existing experiments. Results indicated that the method showed good performance in predicting the dissipated energy level based on various design variables. Poljanšek et al. (2009) proposed a non-parametric empirical approach to predict the energy dissipation and the deterioration of deformation capacity using the axial load index, index related to confinement, shear span index, concrete compressive strength, and longitudinal reinforcement index. Moreover, the effects of these parameters on the predicted capacity levels were also discussed in detail. Acun and Sucuoğlu (2012) developed an analytical model to predict the cyclic dissipated energy capacity of reinforced concrete (RC) columns under constant and variable inelastic displacement cycles.

Additionally, the effect of failure modes, material characteristics, and ductility level on the dissipated energy was also investigated in the scope of a related study. Liu et al. (2018) proposed a two-parameter analytical model for rectangular members under flexure to represent the variation of the dissipated energy with the cumulative hysteretic energy in each displacement cycle. The impact of corrosion levels of rebar to the energy dissipation of reinforced concrete columns was reported by Yang et al. (2016) via experimental way. Comparisons based on different levels of maximum amounts of corrosion showed that the dissipated energy level decreases with increasing amount of corrosion in rebars. The effects of axial load level to the energy dissipation capacities of reinforced concrete type short columns were investigated by Vu et al. (2022).

The study stated that the dissipated energy level is highly affected by the intensity and the fluctuation of applied axial load level. Muderrisoglu et al. (2023) proposed a quantitative framework that reveals a relationship between the structural member and loading features and the total energy dissipated by reinforced concrete columns. It was observed that maximum drift ratio, the amount of transverse rebar, and yield strength of rebars are the most effective ones among selected features in terms of correlation-based analysis. Yıldızel et al. (2023) investigated the effects of additional materials (i.e., recycled waste steel wires from tyres) on the stiffness, ductility, and energy dissipation characteristics of RC beams, experimentally.

Based on the experimental results, an equation was proposed to predict the capacity of investigated hybrid beams. Depending on the advances in using machine learning (ML) techniques in structural engineering (Thai 2022, Tapeh and Naser 2023), practices based on predicting the cyclic behavior characteristics of reinforced concrete members via ML-based frameworks have also been performed. Abdalla and Hawileh (2021) considered the Artificial Neural Networks technique to predict the dissipated energy level in steel rebars in a reinforced concrete member. It was concluded that the accuracy of the model in predicting the dissipated energy is considerably higher under low-cycle fatigue loads.

An ML-based model was developed by Topaloglu et al. (2022) to predict the energy dissipation capacity of shear walls. Specifically, the Gaussian Process Regression technique was implemented to develop a function depending on fundamental wall design parameters. Deger et al. (2023) proposed empirical equations to predict the energy dissipation capacity of RC shear walls using meta-modeling methodologies. The proposed framework resulted in a high coefficient of determination value (i.e., R^2=0.93) representing the level of accuracy in prediction. Yaghoubi et al. (2023) developed a Gaussian process regression-based algorithm that predicts the equivalent damping ratio of RC shear walls at displacements captured at 1.0% lateral drift ratio. For this purpose, a test database including 161 rectangular shear wall features was compiled using the existing test results available in the literature. It was concluded that the selected ML technique is accurate in the prediction of a selected target. Hamidia et al. (2024) proposed machine learning-based frameworks to predict seismic energy dissipation levels of RC beam-column connections. Specifically, 934 images of RC joint were utilized to predict the target parameter.

Results indicated that the prediction accuracy obtained using Cat Boost technique shows higher levels compared to those predictions evaluated via other techniques. A review of existing literature shows that a research gap based on a prediction of energy dissipation capacity of RC column type members practically that would be a good base for future studies and practices in energy design-based structural design and/or performance assessment applications is available. Therefore, a machine learning implemented analytical framework is proposed for

predicting the total energy dissipation capacity of RC columns. Following a compilation of a comprehensive dataset, the effects of essential structural member characteristics on the total dissipated energy level were investigated quantitatively. A commonly-used extreme gradient boosting -XGBoost- (Chen and Guestrin 2016) algorithm was selected as a machine learning technique among the investigated techniques. Finally, the sensitivity of predicted results to the ML technique-based hyperparameters was discussed in detail.

2. Proposed Machine Learning-Assisted Framework for Predicting the Total Dissipated Energy Level

Details of the proposed machine learning-assisted framework that contributes to the energy-based design concept in terms of predicting the total dissipated energy capacity of flexure-dominated RC columns are presented in this section. For structural members subjected to cyclic loading, the total dissipated energy capacity is evaluated using an area under the force-displacement hysteresis captured during the loading (Figure 1). In practice, this is achieved by constructing analytical models to simulate the response of a member, performing experiments, or considering both processes. In this study, the capability of a machine learning technique is taken into account for a prediction-based analytical framework to evaluate the total dissipated energy level. Specifically, the XGBoost technique is selected to teach the computer how to predict the target of interest using the available dataset.

2.1. Extreme gradient boosting technique

Extreme gradient boosting, XGBoost (Chen and Guestrin 2016) is a scalable tree-boosting technique proposed to increase the speed and the efficiency of the existing gradient boosting (Friedman 2001) method. Three fundamental tools are implemented in the improved technique such as (1) compressed column format (i.e., to store data for reducing the time consumed during the process depending on the cost of sorting), (2) randomization technique to increase the speed of training process and decreasing the level of overfitting, and (3) parallel and distributed computing for split finding procedure (Thai 2022). In an extreme gradient boosting model, the objective function needs to be minimized at iteration *t* is expressed as follows:

$$\tilde{\mathcal{L}}^{(t)} = \sum_{i=1}^{k}[g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2}h_i f_t^2(x_i)] + \Omega(f_t) \quad (1)$$

where f_t represents the added function to iteration to improve the speed of a model for optimization and $\Omega(f_t)$ is considered to penalize the model-based complexity. Moreover, g_i and h_i indicate the first and the second order gradient statistics on the loss function (i.e., $l(\hat{r}_i, r_i)$) depending on the difference between the predicted, $\hat{r}_i$ and the target, r_i parameters:

$$g_i = \partial_{\hat{r}^{(t-1)}} l(r_i, \hat{r}^{(t-1)}) \quad (2)$$

$$h_i = \partial^2{}_{\hat{r}^{(t-1)}} l(r_i, \hat{r}^{(t-1)}) \quad (3)$$

Here, Equation 1 is rewritten to consider the contribution of each leaf *j* (i.e., in a tree structure) during the iteration process as follows:

$$\tilde{\mathcal{L}}'^{(t)} = \sum_{j=1}^{T}[(\sum_{i\in I_j} g_i)w_j + \frac{1}{2}(\sum_{i\in I_j} h_i + \lambda)w_j^2] + \gamma \mathrm{T} \quad (4)$$

where *T* is the total number of leaves in a tree, and I_j is the instance set of leaf during the iteration process. Accordingly, the optimal weight of leaf *j*, $w_{j,opt}$ and the corresponding optimal value for a fixed tree structure, *q* are evaluated via solving the quadratic function given in Equation 4 on w_j as follows (i.e., Equations 5 and 6, respectively):

$$w_{j,opt} = -\frac{\sum_{i\in I_j} g_i}{\sum_{i\in I_j} h_i + \lambda} \quad (5)$$

$$\tilde{\mathcal{L}}'^{(t)}(q) = -\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{T}\frac{(\sum_{i\in I_j} g_i)^2}{\sum_{i\in I_j} h_i + \lambda} + \gamma \mathrm{T} \quad (6)$$

Then, the split candidates in a tree learning process are evaluated using the loss reduction after the split as follows:

$$\mathcal{L}_{split} = \frac{1}{2}\left[\frac{(\sum_{i\in I_L} g_i)^2}{\sum_{i\in I_L} h_i + \lambda} + \frac{(\sum_{i\in I_R} g_i)^2}{\sum_{i\in I_R} h_i + \lambda} - \frac{(\sum_{i\in I} g_i)^2}{\sum_{i\in I} h_i + \lambda}\right] - \gamma \quad (7)$$

Here, I_L and I_R indicate the left and right node's instance sets considered after the split, respectively. Finally, the best split is found by maximizing the difference between the objective functions considered before and after the split node (i.e., using the Exact Greedy algorithm to minimize Equation 4). In this study, a Python-based (van Rossum and Drake 1995) framework supported by the advanced machine learning tools (Pedregosa et al. 2011) is considered to predict the target parameter. Additionally, assessing the performance of implemented technique in machine learning-based studies is also crucial to provide more accurate results. For this purpose, the K-Fold cross-validation procedure is considered during the analysis.

2.2. K-Fold cross-validation

The K-Fold cross-validation is a widely used technique in statistical analysis to assess the level of accuracy of a selected model and to predict the classifiers' errors (Anguita et al. 2012).

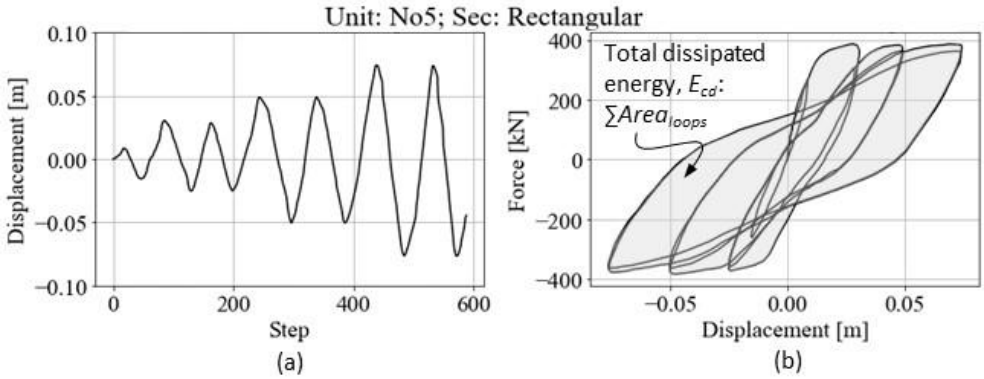


Figure 1. Experiment-based evaluation of total dissipated energy for a specimen tested by Tanaka (1990): (a) loading protocol, (b) force-displacement hysteresis

Here, the parameter, *K* basically refers to the number of folds that a selected dataset would be split into. Following the random split process, a cross-validation-based training is applied by considering the training (e.g., *K*-1 folds) and a test set. Accordingly, a machine learning technique of interest (e.g., as XGBoost in this study) is implemented to predict the target parameter using the folds including training and test data. Finally, means of performance indicators are evaluated to assess the accuracy of the trained model. Specifically, commonly used statistical performance indicators such as (1) the normalized root mean square error -*NRMSE*-, (2) mean absolute percentage error -*MAPE*-, and (3) coefficient of determination -R^2- are selected to assess the trained data in this study. These indicators are evaluated as follows:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - y_i')^2}}{\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}} \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{n}^{i=1}\left|\frac{y_i - y_i'}{y_i}\right| \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - y_i')^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

where *n* refers to the number of samples, *y* is the actual and *y'* is the predicted value. In this study, the coefficient of determination, R^2 (Equation 10) is selected as a performance indicator. A general overview of a proposed framework is represented in Figure 2.

3. Dataset Properties

The database considered in this study was compiled by taking into account two fundamental open-access studies (Ghannoum et al. 2015a, 2015b). Specifically, the selected dataset includes RC column information focused on rectangular and circular sections subjected to flexural actions. The study was based on 177 column specimens (i.e., 113 rectangular and 64 circular RC columns). In the scope of machine learning-based research, quantifiable features available in a database are considered as input data to predict the target parameter.

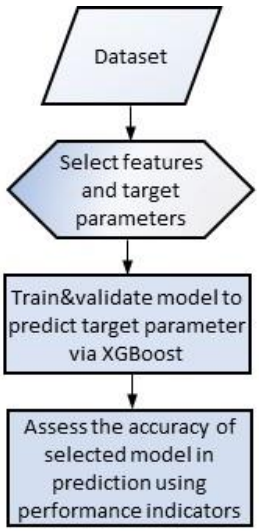


Figure 2. A general overview of a proposed framework

Accordingly, a wide range of feature sets including the compressive strength of concrete, f_c, longitudinal rebar yield strength, f_{yl}, shear span-to-depth ratio, a/d, longitudinal rebar ratio, ρ_l, transverse rebar volumetric ratio, ρ_t, peak drift ratio, Δ_{max}, and equivalent damping ratio, ξ_{eqv} (Kwan and Billington 2003) is considered during the analysis. Relative frequencies of selected features and target parameter (i.e., total dissipated energy, E_{cd}) are given in Figure 3. The total dissipated energy capacities of specimens in a selected dataset vary between 51.5kNm and 635.7kNm. Fundamental factors including sectional, material, loading, and mechanical properties have a significant effect on the total dissipated energy level of column members (Poljanšek et al. 2009, Muderrisoglu et al. 2023). Following the identification of features and the target parameter, correlations between these quantities are investigated via Pearson's correlation coefficient (Pearson 1920) as follows:

$$\rho_{FT} = \frac{\sigma_{FT}}{\sigma_F \sigma_T} \quad (11)$$

where σ_{FT} indicates the covariance between the feature and the target, σ_F is the standard deviation of feature and σ_T is the standard deviation of target data. The correlation coefficient, ρ_{FT} takes values between -1 and +1 where these boundary levels correspond to complete negative and positive cases, respectively. Correlation levels between selected features and the total dissipated energy level are given as a matrix in Figure 4.

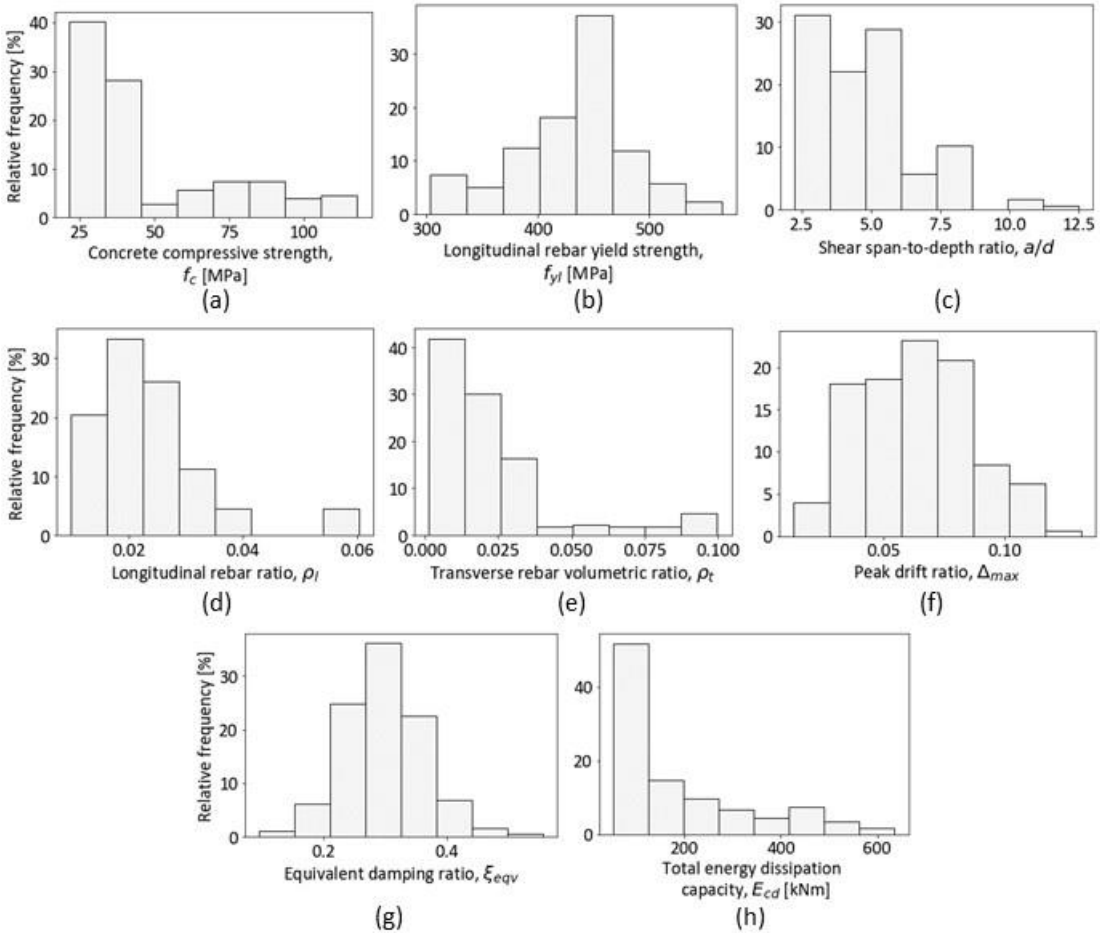


Figure 3. Relative frequency distributions of selected features and the target parameter: (a) f_c, (b) f_{yl}, (c) a/d, (d) ρ_l, (e) ρ_t, (f) Δ_{max}, (g) ξ_{eqv}, (h) E_{cd}

Preliminary results indicate that the total dissipated energy level captured in flexure-dominated RC column specimens under cyclic loading is mostly influenced by peak drift ratio (i.e., $\rho_{\Delta max,Ecd}$=0.43). This result shows a good agreement with observations available in the study by Muderrisoglu et al. (2023). Moreover, an opposite trend (i.e., negative correlation) is observed for a relationship between the concrete compressive strength and the total dissipated energy level. Actually, the correlation level for this case is considerably low (i.e. $\rho_{fc,Ecd}$=-0.2). Comprehensive research (Poljanšek et al. 2009) based on considering the normal (e.g., between 20 MPa and 40 MPa) and high-strength concrete features in detail reported that the energy capacity of a specimen with normal concrete is higher than that capacity of a high strength concrete specimen due to the inverse relationship between the ductility and the strength of material.

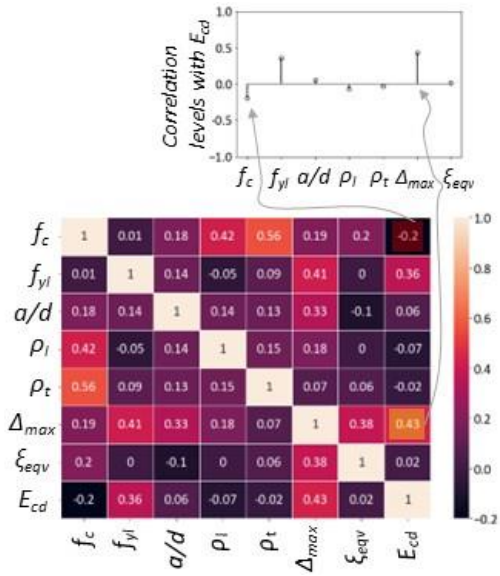


Figure 4. A heatmap representing the correlation levels between selected features and target parameter

4. Proposed Predictive Model Results

In this section, results obtained via the proposed framework are given. For this purpose, means of performance indicators calculated using the K-Fold cross-validation analysis are presented. Additionally, sensitivity analyses are performed to investigate the effect of fundamental hyperparameters considered in the XGBoost technique on the predicted results.

4.1. Accuracy of predictions

Following the compilation of a dataset and selecting the features and a target parameter, training of a proposed model including the XGBoost technique is implemented by evaluating the optimum ML technique-based hyperparameters using the random search technique. Specifically, the hyperparameters are searched as: an objective for a loss function, [*reg:logistic,binary:logistic]* supported for XGBoost, number of estimators, n_{est} in a range of [50,1000], max tree depth, max_d of [1,20], boosting learning rate, r_l of [0.001,1.0]. Finally, the optimum parameters are determined to evaluate for the best mean performance indicator. Moreover, other model-based parameters such as degree of polynomial for fitting used to generate the train and test sets is selected as 2, and the booster type is considered as *gbtree* during the process. In this study, a K-Fold cross-validation technique is utilized instead of a standard train-test split methodology to evaluate the performance of implemented ML-based model in a more robust way. Specifically, the number of folds, n_{fold} is considered as 6 to partition the existing dataset into multiple parts such as n_{fold}-1 (i.e., 5 folds) for training and the remaining for testing data. Specifically in each part, 83% of total data (i.e., 148 members) are considered for training while 29 samples (i.e., 17%) are taken into account to train the relevant model. Here, it should be noted that an L2 regularization method is utilized to prevent overfitting when training the model. Performance indicators evaluated in each fold are provided in Table 1. As expected, different values of performance indicators are obtained for folds including randomly generated training and test data depending on the level of variabilities in predicted and actual energy levels in each fold. Results show that the maximum and the minimum values of selected performance indicator (i.e., coefficient of determination, R^2) are evaluated as 0.82 and 0.58 for a selected set of hyperparameters, respectively (Figure 5). Accordingly, the accuracy level of the proposed model is tested by taking into account the mean of performance indicator, R^2 calculated for generated folds (Figure 6). As the mean of performance indicators is calculated as 0.75 and considering the high variabilities in features of a selected dataset, the proposed model is assumed to be considerably accurate in predicting the total dissipated energy level of flexure-dominated RC columns subjected to cyclic loadings (Chicco et al. 2021, Moore et al. 2013).

Table 1. Performance indicators evaluated in each fold in K-Fold cross validation process

Fold #/ Performance indicator	R^2	NRMSE	MAPE
1	0.58	0.46	0.28
2	0.74	0.35	0.35
3	0.82	0.33	0.29
4	0.82	0.34	0.36
5	0.75	0.47	0.46
6	0.77	0.33	0.26

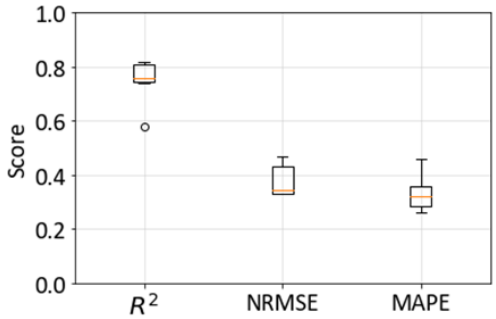


Figure 5. Variabilities in performance indicators evaluated via K-Fold cross-validation process

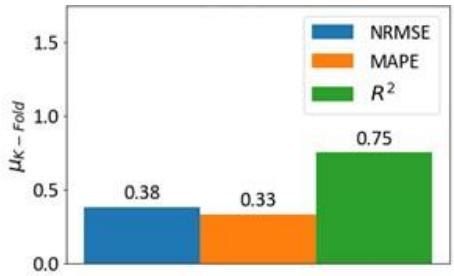


Figure 6. Means of performance indicators evaluated via K-Fold cross-validation process

In addition to the implemented ML technique-wise performance evaluation (Figure 6), the accuracy level of the implemented algorithm in predicting the energy levels is also tested by comparing with the results obtained based on commonly used machine learning models in structural engineering such as support vector machine (SVM), multilayer perceptron (MLP), and random forest (RF) (Table 2). Here, the means of selected performance indicators evaluated using the optimum hyperparameters (i.e., using a random search algorithm) are presented. Preliminary results show that the implemented extreme gradient boosting is concluded as the most successful model among the selected techniques to predict the energy levels as representing the highest correlation of determination (i.e., R^2=0.75).

Table 2. Comparison of the performance of different algorithms

ID	Hyperparameter	R^2	NRMSE	MAPE
XGB	n_{est}=150; objective=reg:logistic max_d=1; r_l=0.6	0.75	0.38	0.33
SVM	kernel=rbf; C=10; epsilon=0.05; gamma=0.3	0.43	0.57	0.52
MLP	solver=adam; alpha=0.0001; hidden layer sizes=400,400 max. iterations=500;	0.63	0.46	0.46
RF	n_{est}=10	0.66	0.49	0.44

The capability of the validated model is investigated by evaluating the correlation level between the predicted, $\mu_{Ecd,p}$ and actual, $\mu_{Ecd,a}$ total dissipated energy capacities corresponding to the mean coefficient of determination case of 0.75. In Figure 7, a strong correlation between the predicted and actual total dissipated energy capacities (i.e., $\rho_{a,p}$=0.94) that indicates a high-level prediction case, is observed.

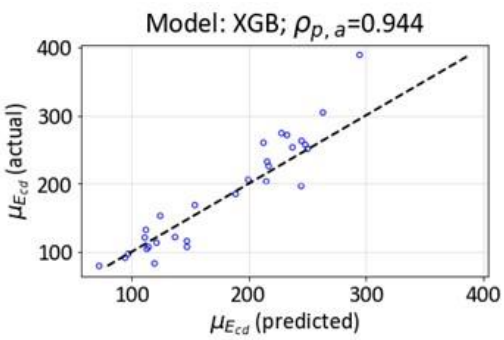


Figure 7. Correlation between actual and predicted total dissipated energy levels

The preliminary results indicate that the proposed model shows high accuracy in predicting the total dissipated energy level for selected hyperparameters.

4.2. Sensitivity of the performance indicator to the fundamental hyperparameters

Effects of fundamental parameters on the selected performance indicator, R^2 (i.e., hence on the prediction results) are investigated in this section.

Number of estimators&Maximum depth

The means of performance indicator obtained for a set of a number of estimators and maximum depth values are presented in Figure 8. Here, a constant boosting learning rate of 0.6 is considered. Results show that, following the increment of coefficient of determination values up to a peak level of a number of estimators (i.e., 150 for a set of interest), a decrement tendency is observed for low values of maximum depth hyperparameter. Moreover, it is also concluded that the indicator becomes constant for high levels of maximum depth (i.e., max_d≥10).

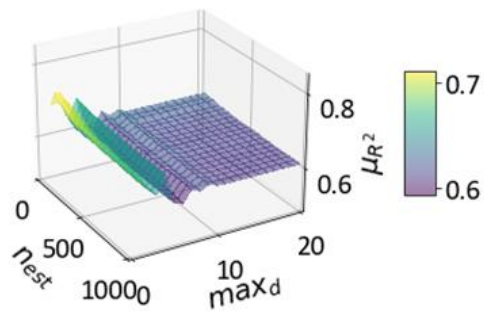


Figure 8. Effects of number of estimators and maximum depth on the performance indicator (r_l=0.6)

Maximum depth&boosting learning rate

The sensitivity of performance indicators to the variabilities in maximum depth and boosting learning rate is investigated in this sub-section (i.e., for a constant number of estimators as 150). In Figure 9, a sudden increment in R^2 values is observed up to a learning rate of 0.2 for a selected interval of maximum depth parameter.

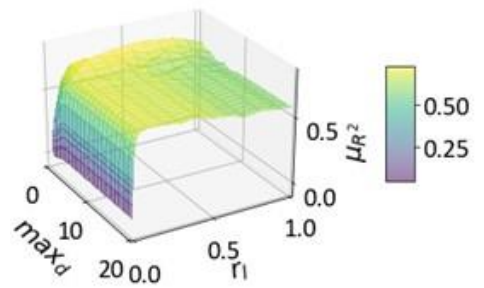


Figure 9. Effects of maximum depth and boosting learning rate on the performance indicator (n_{est}=150)

Number of estimators&Boosting learning rate

The effect of a number of estimators and boosting learning rate on the evaluated R^2 values is illustrated in Figure 10. Here, a constant maximum depth parameter of 1 is considered during the analysis. It is observed that higher R^2 values are evaluated for low values of the number of estimators. Moreover, the indicator is significantly affected for decreasing levels of boosting learning rate parameter.

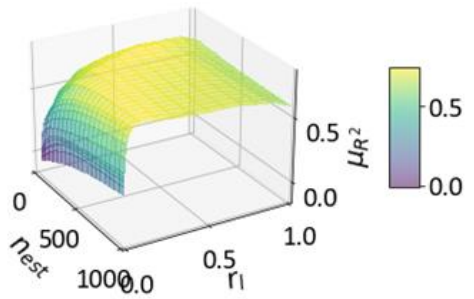


Figure 10. Effects of number of estimators and boosting learning rate on the performance indicator max_d=1)

5. Conclusions

A machine learning technique implemented analytical framework based on predicting the total energy dissipated by flexure-dominated reinforced concrete columns is presented. The proposed framework takes into account the XGBoost technique to train the selected data. Data characteristics are detailed using statistical approaches. The accuracy level of a proposed model in predicting the energy capacity level is illustrated using the coefficient of determination as a performance indicator. The effects of critical ML technique-based hyperparameters on the selected performance indicator are investigated by performing sensitivity analyses. Following results can be derived based on the outcomes of detailed analysis:

- The dependency of the total dissipated energy capacity on the selected parameters is quantified via correlation coefficients. The highest positive (i.e., $\rho_{\Delta max,Ecd}$=0.43) and negative correlations ($\rho_{fc,Ecd}$=-0.2) are evaluated for peak drift ratio and concrete compressive strength features, respectively.
- The proposed model yielded considerably accurate results in predicting the total dissipated energy capacity by taking into account the coefficient of determination, R^2 as a performance indicator with a mean of 0.75.
- The accuracy level of the implemented algorithm in predicting the energy levels is also tested by comparing with the results obtained based on support vector machine (SVM), multilayer perceptron (MLP), and random forest (RF) algorithms. Preliminary results show that the implemented extreme gradient boosting is concluded as the most successful model among the selected techniques to predict the energy levels as representing the highest correlation of determination.
- A strong correlation level of $\rho_{a,p}$=0.94 is obtained via the proposed model based on a comparison between the actual and predicted total dissipated energy capacities.
- Sensitivity analysis performed to investigate the effects of ML technique-based hyperparameters showed the importance of tuning the parameters in an optimal way. Preliminary results indicated that among the considered hyperparameters, the number of estimators has a significant effect on the level of performance indicator selected in the scope of this study, coefficient of determination.

Evaluating the total energy dissipated by RC columns during cyclic loadings is a crucial issue in the energy-based design approach that is widely applied in practice. Hence, the outcomes of this study are believed to make an important contribution to future studies based on this topic. Moreover, the proposed ML assisted framework can be also implemented to other structural and earthquake engineering applications.

Declaration of Ethical Standards
The author declares that he complies with all ethical standards.

Declaration of Competing Interest
The author has no conflict of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability
All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

5. References

Abdalla, J.A. and Hawileh, R.A., 2021. Assessment of effect of strain amplitude and strain ratio on energy dissipation using machine learning. *In Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering: ICCCBE 2020*, Springer International Publishing, 98-108. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_9

Acun, B. and Sucuoğlu, H., 2012. Energy dissipation capacity of reinforced concrete columns under cyclic displacements. *ACI Structural Journal*, **109(4)**. https://doi.org/10.14359/51683872

Anguita, D., Ghelardoni, L., Ghio, A., Oneto, L. and Ridella, S., 2012. The 'K' in K-fold Cross Validation. *ESANN*, **102**, 441-446.

Chen, T. and Guestrin, C., 2016. *Xgboost: A scalable tree boosting system*. In Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining.

Chicco, D., Warrens, M. J. and Jurman, G. 2021. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj computer science*, **7**. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623

Deger, Z., Taşkın Kaya, G. and Sütcü, F., 2023. Investigation of the energy dissipation capacity of RC shear walls using meta-modeling methods. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **38(4)**, 2311-2324. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1117820

Friedman, J. H., 2001. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 1189-1232. https://doi.org/10.1214/aos/1013203451

Ghannoum, W., Sivaramakrishnan, B., Pujol, S., Catlin, A.C., Wang, Y., Yoosuf, N. and Fernando, S. 2015a. NEES: ACI 369 Circular column database. https://doi.org/10.4231/D39Z90B9T

Ghannoum, W., Sivaramakrishnan, B., Pujol, S., Catlin, A.C., Wang, Y., Yoosuf, N. and Fernando, S. 2015b. NEES: ACI 369 Rectangular column database.

https://doi.org/ 10.4231/D36688J50

Hamidia, M., Kaboodkhani, M. and Bayesteh, H., 2024. Vision-oriented machine learning-assisted seismic energy dissipation estimation for damaged RC beam-column connections. *Engineering Structures*, **305**. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117345

Kwan, W.P. and Billington, S.L. 2003. Influence of hysteretic behavior on equivalent period and damping of structural systems. *Journal of Structural Engineering,* **129(5)**, 576-585. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:5(576)

Liu, Z., Wang, Y., Cao, Z., Chen, Y. and Hu, Y., 2018. Seismic energy dissipation under variable amplitude loading for rectangular RC members in flexure. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **47(4)**, 831-853. https://doi.org/10.1002/eqe.2993

Moore, D.S., Notz, W.I. and Flinger, M.A., 2013. *The basic practice of statistics (6th edition)*. New York, NY: W. H. Freeman and Company.

Muderrisoglu, Z., Dindar, A.A., Bozer, A., Özkaynak, H., Güllü, A., Güngör, B., Çalım, F. and Hasanoğlu, S., 2023. A quantitative investigation on the effects of flexure-dominated reinforced concrete column characteristics on the dissipated energy. *Turkish Journal of Civil Engineering*, **35(2)**, 87-102. https://doi.org/10.18400/tjce.1272125

Park, H. and Eom, T., 2006. A simplified method for estimating the amount of energy dissipated by flexure-dominated reinforced concrete members for moderate cyclic deformations. *Earthquake Spectra*, **22(2)**, 459-490. https://doi.org/10.1193/1.2197547

Pearson, K., 1920. Notes on the history of correlation. *Biometrika*, **13(1)**, 25-45. https://doi.org/10.2307/2331722

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... and Duchesnay, É., 2011. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of machine Learning research,* **12***,* 2825-2830*.* https://doi.org/10.48550/arXiv.1201.0490

Poljanšek, K., Peruš, I. and Fajfar, P., 2009. Hysteretic energy dissipation capacity and the cyclic to monotonic drift ratio for rectangular RC columns in flexure. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **38(7)***,* 907-928*.* https://doi.org/10.1002/eqe.875

Tanaka, H., 1990. Effect of lateral confining reinforcement on the ductile behaviour of reinforced concrete columns. Thesis, Doctor of Philosophy, University of Canterbury, Civil Engineering. https://doi.org/10.26021/3137

Tapeh, A.T.G. and Naser, M.Z., 2023. Artificial intelligence, machine learning, and deep learning in structural engineering: a scientometrics review of trends and best practices. *Archives of Computational Methods in Engineering,* **30(1)***,* 115-159*.* https://doi.org/10.1007/s11831-022-09793-w

Thai, H.T., 2022. Machine learning for structural engineering: A state-of-the-art review. *Structures,* **38***,* 448-491*.* https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.003

Topaloglu, B., Kaya, G.T., Sutcu, F. and Deger, Z.T., 2022. Machine learning-based estimation of energy dissipation capacity of RC shear walls. *Structures*, **45**, 343-352. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.114

Van Rossum, G. and Drake, F.L., 1995. Python reference manual. *Amsterdam: Centrum voor Wiskunde en Informatica*, **111**, 1-52.

Vu, N.S., Li, B. and Tran, C.T.N., 2022. Seismic behavior of reinforced concrete short columns subjected to varying axial load. *ACI Structural Journal*, **119(6)**, 99-112. https://doi.org/10.14359/51736108

Yaghoubi, S.T., Deger, Z.T., Taskin, G. and Sutcu, F., 2023. Machine learning-based predictive models for equivalent damping ratio of RC shear walls. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **21(1)**. https://doi.org/10.1007/s10518-022-01533-6

Yalçın, C., Dindar, A.A., Yüksel, E., Özkaynak, H. and Büyüköztürk, O., 2021. Seismic design of RC frame structures based on energy-balance method. *Engineering Structures*, **237**, 112220. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112220

Yang, S. Y., Song, X. B., Jia, H. X., Chen, X. and Liu, X. L., 2016. Experimental research on hysteretic behaviors of corroded reinforced concrete columns with different maximum amounts of corrosion of rebar. *Construction and Building Materials*, **121**, 319-327. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.002

Yıldızel, S.A., Özkılıç, Y.O., Bahrami, A., Aksoylu, C., Başaran, B., Hakamy, A. and Arslan, M.H., 2023. Experimental investigation and analytical prediction of flexural behaviour of reinforced concrete beams with steel fibres extracted from waste tyres. *Case Studies in Construction Materials*, **19**, e02227. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02227

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1563164
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035602 (613-620)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035602 (613-620)

Muz Kabuğu Atıklarının Polimer Kompozitlerin Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 10.10.2024
Kabul/Accepted: 13.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Evaluation of the Effect of Banana Peel Waste on the Performance of Polymer Composites

Hasan POLAT*

Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Bingöl, Türkiye

Öz

Bu çalışmada tarımsal atık dolgu malzemesinin ve farklı oranlarının polimer kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelendi. Üretilen polimer kompozit numunelerde dolgu malzemesi olarak atık muz kabuğu tozu (MK), matris olarak alev almayan döküm tipi doymamış polyester reçine kullanıldı. Polimer kompozit numunelerin üretiminde %0, %25, %50, %75 ve %100 olmak üzere kontrol grubu (%0) dahil toplamda 5 farklı polimer kompozit numune grubu oluşturuldu. Polimer kompozit numunelerin görünür yoğunluk, su emme, porozite, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve UL94 dikey yanma testi özellikleri test edildi. Deneysel sonuçlar incelendiğinde görünür yoğunluk, ultrases geçiş hızı değerlerinde azalma elde edilirken, su emme ve porozite değerlerinde artış görüldü. Ayrıca basınç dayanımı değerlerinde azalma meydana gelirken, tüm numune gruplarının UL94 dikey yanma testinde V_0 özellikleri taşıdığı belirlendi. Bu çalışma atık muz kabuklarının polimer kompozitler için potansiyel olarak düşük maliyetli bir dolgu malzemesi olduğunu ve orta mukavemetli ancak hafif malzemeler gerektiren alanlarda kullanılabileceğini göstermiştir.

***Anahtar Kelimeler**: Atık muz kabuğu; Fiziksel özellikler, Mekanik özellikler; Polimer kompozitler*

Abstract

In this study, the effects of agricultural waste filler material and its different ratios on the physical and mechanical properties of polymer composite materials were examine. In the produced polymer composite samples, waste banana peel powder (BP) was used as the filler material, and a flame-retardant casting-type unsaturated polyester resin was used as the matrix. A total of five different polymer composite sample groups, including the control group (0%), were produced for the fabrication of polymer composite samples at 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% replacement ratios. The apparent density, water absorption, porosity, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and UL94 vertical burning test properties of the polymer composite samples were tested. When the experimental results were examined, a decrease in apparent density and ultrasonic pulse velocity values was observed, while an increase in water absorption and porosity values was noted. Additionally, while a decrease in compressive strength values was observed, it was determined that all sample groups exhibited V0 characteristics in the UL94 vertical burning test. This study has demonstrated that waste banana peels are a potentially low-cost filler material for polymer composites and can be used in applications requiring medium-strength yet lightweight materials.

***Keywords:** Waste banana peel; Physical properties, Mechanical Properties, polymer composite*

1. Giriş

Dünya nüfusunun her geçen yıl artması ve buna bağlı olarak ortaya çıkan ihtiyaçlar, doğal kaynakların kullanımını hızlandırmış ve bu durum, kaynakların hızla tükenmesine neden olmuştur. Doğal kaynakların azalması ve çevresel kaygılar gibi faktörler, son yıllarda birçok endüstrinin sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir ürünlerin üretimini öncelikli bir hedef olarak belirlemesine yol açmıştır. Son 15 yıl içerisinde, artan çevresel farkındalığın yanı sıra bu malzemelerin özgün özellikleri ve geri dönüştürülebilirlik potansiyeli nedeniyle, kompozit malzeme üretiminde alternatif dolgu malzemesi olarak tarımsal atıkların kullanımına yönelik araştırmalara olan ilgi önemli ölçüde artmıştır (Taurino et al, 2023). Bu malzemeler, kompozit sektörü literatüründe "yeşil kompozitler" olarak adlandırılmaktadır. Yeşil kompozitler, bileşenlerinden en az birinin doğal kaynaklardan elde edildiği özel bir kompozit malzeme sınıfını ifade etmektedir (Kartal vd., 2019).

Yapılan literatür taramasında, çeşitli tarımsal atıkların polimer kompozitlerde kullanımına yönelik çok sayıda araştırmanın, kompozit malzemelerin özelliklerini iyileştirme ve çevresel koruma hedefi doğrultusunda gerçekleştirildiği belirlenmiştir. Örneğin, bir çalışmada, araştırmacılar bağlayıcı olarak doymamış polyester reçine ve farklı oranlarda (%25, %30, %35, %40 ve %45) ketencik atığı kullanarak polimer kompozitler üretmişlerdir. Çalışmada, ketencik oranının artmasıyla mekanik

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Hasan POLAT e-posta/e-mail: hpolat@bingol.edu.tr

özelliklerin azaldığı, ancak en iyi ısıl iletkenlik değerinin %45 ketencik oranında elde edildiği rapor edilmiştir (Kolak et al, 2023). Evsel çay atığı ve fındık kabuğu kullanılarak %0-20 dolgu oranlarında polimer kompozit numunelerin üretildiği bir başka çalışmada, araştırmacılar, çay atığı ve fındık kabuğu oranının artmasıyla mekanik özelliklerin iyileştiğini, buna karşılık yoğunluğun azaldığını bildirmişlerdir (Öztürk vd., 2015). Farklı bir çalışmada, araştırmacılar şeftali kabuğu tozu kullanılarak üretilen polimer kompozitlerde gerilme ve eğilme dayanımı değerlerinin azaldığını, ancak sertlik özelliklerinin olumsuz etkilenmediğini rapor etmişlerdir (Topuz ve Orhan, 2022). Polimer kompozit üretiminde dolgu malzemesi olarak çam kozalağı tozunun kullanıldığı bir çalışmada, araştırmacılar, artan dolgu miktarına (çam kozalağı) bağlı olarak elastik modülde bir artış gözlemlerken, eğilme dayanımında ise azalma meydana geldiğini rapor etmişlerdir (Borazan et al, 2017). Farklı bir çalışmada, araştırmacılar %50 muz kabuğu ve %50 pirinç kabuğundan oluşan karışımı kullanarak ürettikleri polimer kompozitlerde, yoğunluk, sertlik ve elastik modülde artış gözlemediklerini bildirmişlerdir (Ulutaş ve Taşdemir, 2024). Farklı bir çalışmada, araştırmacılar polimer lifleri (geri dönüştürülmüş PET şişeler ve polikarbonat lifleri), muz ve cam liflerine dayalı kompozitlerin makro yapısını incelemişlerdir. Araştırmacılar, tarımsal atıkların polimer ile birleştirilerek çevre kirliliğinin önlenmesine katkı sağlayabileceğini öne sürmüşlerdir (Yıldız ve Çetinkaya, 2012). Yukarıda gerçekleştirilen literatür incelemesinden anlaşılacağı üzere, çevresel sorunlar ve kaynak kıtlığı konusundaki artan farkındalık, polimer kompozit malzemelerin çeşitli uygulamalarda kullanımına yönelik çalışmaları artırmıştır. Bu malzemelerden biri de önemli bir potansiyele sahip olan muz kabuğudur. Muz, dünyadaki en önemli tarım ürünlerinden biridir ve 2019 yılında küresel muz üretimi 116 milyon tondan fazla olmuştur (Mohamed et al, 2023).

Türkiye'de 2022 yılı üretim verilerine göre, toplamda 997.244 ton muz üretilmiştir (Avşar ve Çelik, 2023). Yaklaşık olarak 10 ton muz için bir ton atık üretilmektedir (Ferrante et al, 2020). Muz kabuğu, bol miktarda bulunan, biyolojik olarak parçalanabilir, düşük maliyetli, aşındırıcı olmayan, yenilenebilir ve çevre dostu bir malzeme olup, düşük yoğunluğa sahiptir. Bu özellikler, muz kabuğunun özellikle inşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar (Boopalan et al, 2013). Ayrıca, fiziksel ve kimyasal olarak katma değerli ürünlere dönüştürülebilir (Rubiaceae et al, 2015).

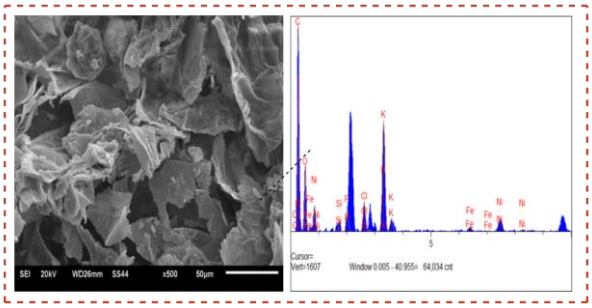
Bu çalışma, atık muz kabuğunun polimer kompozitlerde dolgu malzemesi olarak kullanımının faydalarını ve sınırlamalarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Belirlenen hedefler doğrultusunda, beş farklı oranda (%0, %25, %50, %75 ve %100) atık muz kabuğu tozu dolgulu polimer kompozit numuneleri üretilmiştir. Üretilen polimer kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Muz kabuğu atıklarının biyokompozit üretiminde kullanılması, muz kabuklarına alternatif bir kullanım alanı sağlamanın yanı sıra, ekonomik bir hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Yapılan çalışmada, piyasadan temin edilen atık muz kabuklarından elde edilen muz kabuğu tozu kullanılmıştır. Atık muz kabuğu tozunun elde edilme aşamaları Şekil 1'de sunulmuştur. Ayrıca, çalışmada kontrol numunesi üretiminde dolgu malzemesi olarak, TS EN 196-1 (2016) standardına uygun Standart CEN kumu kullanılmıştır.

Şekil 1. MK'un elde edilme aşamaları



Şekil 2. MK'na ait SEM (x500) ve EDX görüntüleri

Temel dolgu malzemesi olarak kullanılan atık muz kabuğu tozuna ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 2'de sunulmuştur. SEM görüntüleri üzerinde gerçekleştirilen EDX analizinde, C, O, Si, P, Cl, K, Fe ve Ni elementlerinin dağılımı sırasıyla %58,28, %24,25, %3,08, %2,24, %1,40, %3,14, %1,02 ve %6,11 olarak tespit edilmiştir. Diğer elementlerin oranları ise yaklaşık olarak %1'in altında kalmıştır.

Çalışmada, matris malzeme olarak yoğunluğu 1,43 g/cm³ olan alev geciktirici doymamış polyester (AGP) reçinesi tercih edilmiştir. Ayrıca, reçine ve monomerin sertleşme sürecini başlatmak amacıyla, AGP'nin %1 oranında metil

etil keton peroksit (MEKP) sertleştirici olarak kullanılmış, reaksiyonun hızlandırılması için ise %0,2 oranında kobalt oktoat ilave edilmiştir.

2.2. *Muz kabuk katkılı kompozit üretimi*

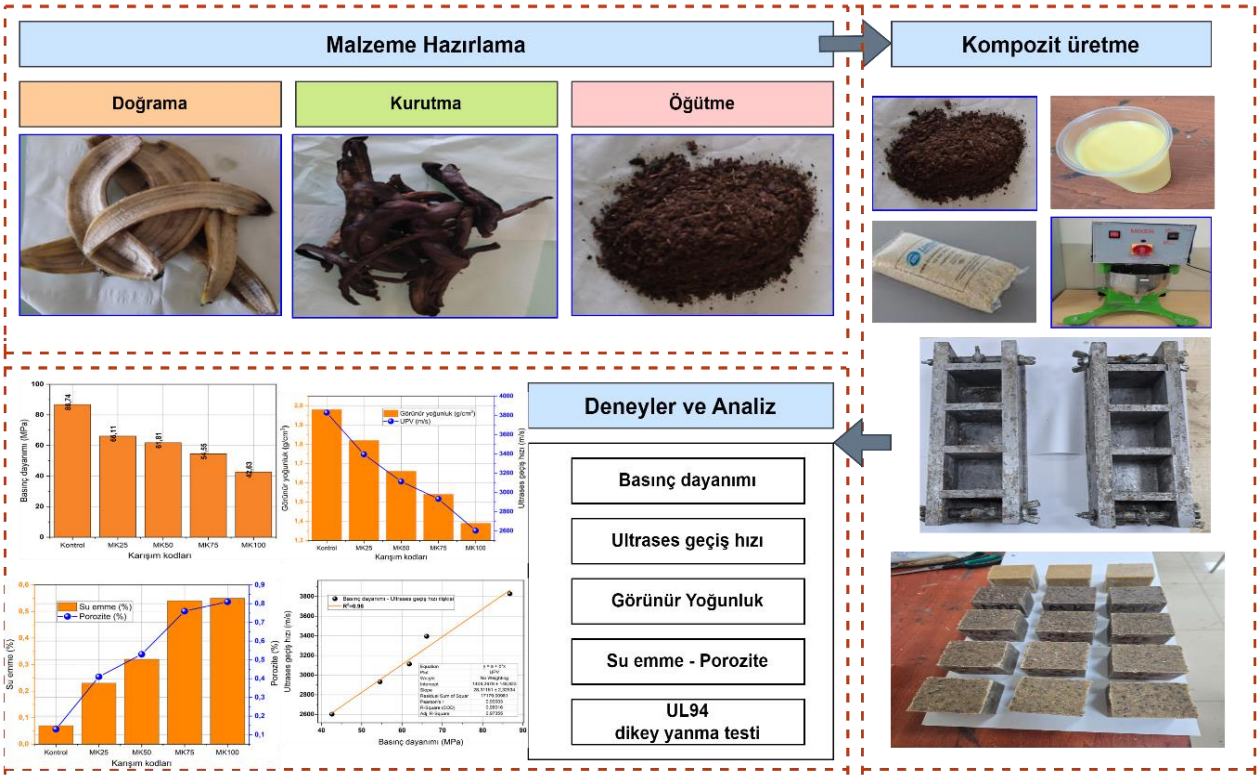
Çalışmada, birinci aşama olan polimer matrisinin elde edilmesinde, uygun miktarda AGP karıştırıcıya alınarak 90 saniye süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma işleminden sonra, polimerizasyon reaksiyonunun tamamlanabilmesi için %1 oranında MEKP ve reaksiyon hızlandırıcı olarak %0,2 oranında kobalt eklenmiş ve toplamda 180 saniye süreyle karıştırılarak polimer matrisi elde edilmiştir.

İkinci aşamada, kontrol numunesi üretilmiştir. Kontrol numunesi üretiminde, hacimce %50 AGP ve %50 oranında standart CEN kumu kullanılarak, numune gruplarının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin faz malzemenin etkisinden en az düzeyde etkilenmesi sağlanmıştır. Diğer numune gruplarının üretiminde, CEN kumu ile MK (muz kabuğu tozu) %25, %50, %75 ve %100 oranlarında yer değiştirilerek üretilmiştir. Kontrol numunesi dahil olmak üzere toplamda beş grup polimer kompozit numune grubu üretilmiştir. Numune gruplarının üretim aşamaları ve yapılan testler Şekil 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 1'de, üretilen numune gruplarının karışım oranları sunulmuştur. Numune gruplarının daha kolay anlaşılabilmesi amacıyla kodlama yapılmıştır. Örneğin, MK50 kodlu numunede, atık muz kabuğu tozunun CEN kumu ile %50 oranında yer değiştirdiğini ifade etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Üretilen kompozit numune gruplarına ait görünür yoğunluk, su emme, porozite, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve UL94 dikey yanma performansları test edildi. Polimer kompozitlerin test sonuçları Çizelge 2'de sunulmuştur ve ayrıca bu sonuçlar ilgili alt başlıklar altında ayrıntılı şekilde tartışılmıştır.



Şekil 3. Numune gruplarının üretim aşamaları ve yapılan testler

Çizelge 1. Numune gruplarının karışım oranları (%)

Kod	AGP (%)	CEN kumu (%)	MK (%)
MK0	50	50	-
MK 25	50	37,5	12,5
MK 50	50	25	25
MT 75	50	12,5	37,5
MK100	50	-	50

Çizelge 2. Polimer kompozit numunelerin test sonuçları

Karışım Kodu	Görünür Yoğunluk (g/cm³)	Su Emme (%)	Porozite (%)	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Basınç Dayanımı (MPa)
MK0	1,98	0,07	0,13	3828	86,74
MK 25	1,67	0,10	0,17	3475	86,09
MK 50	1,61	0,11	0,18	3358	84,85
MK 75	1,53	0,13	0,20	3213	79,64
MK100	1,52	0,55	0,83	3179	77,6

3.1. Görünür yoğunluk ve ultrases geçiş hızı değerleri

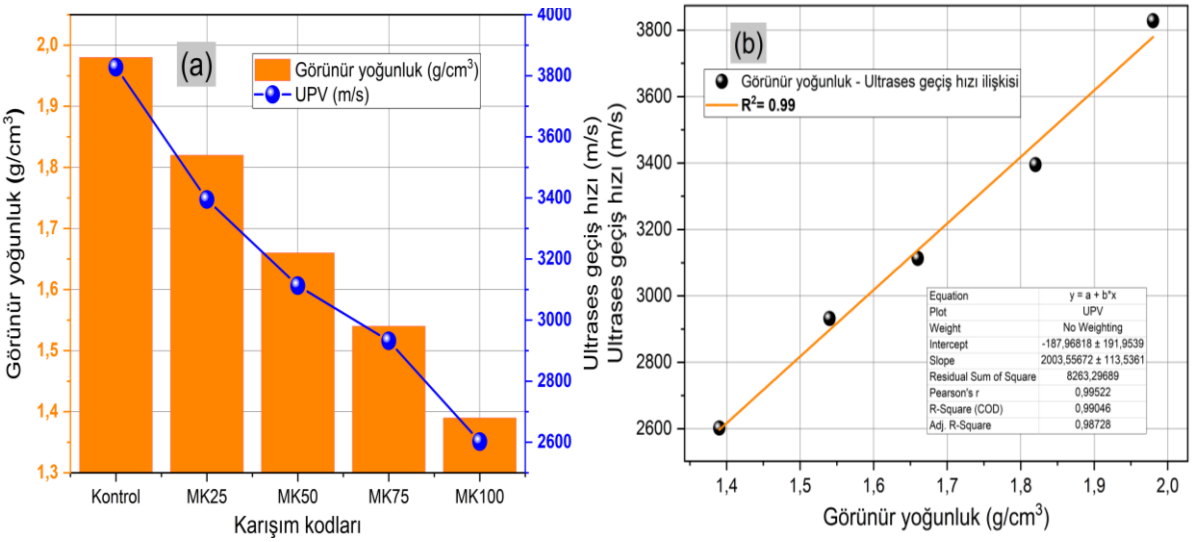
Görünür yoğunluk, su emme ve porozite deneyleri TS EN 1170-6'ya göre Arşimet terazisi kullanılarak elde edilen veriler yardımıyla aşağıda yer alan Denklem (1), (2) ve (3) kullanılarak hesaplanmışlardır.

Görünür yoğunluk: $M0/(M0 - M1)$ (1)

Su emme: $(M2 - M0)/M0 * 100$ (2)

Porozite: $(M2 - M0)/\ (M2 - M1) * 100$ (3)

Burada, M_0: numunenin etüv kurusu kütlesi, M_1: numunenin sudaki kütlesi M_2: numunenin doygun kuru yüzey kütlesidir. Ultrases geçiş hızı testi, ASTM C597-16 (2016) standardına göre yapılmıştır. Elde edilen görünür yoğunluk ve ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 4a'da sunulmuştur.



Şekil 4. a) Görünür yoğunluk ve ultrases geçiş hızı değerleri b) ultrases geçiş hızı ve görünür yoğunluk ilişkisi

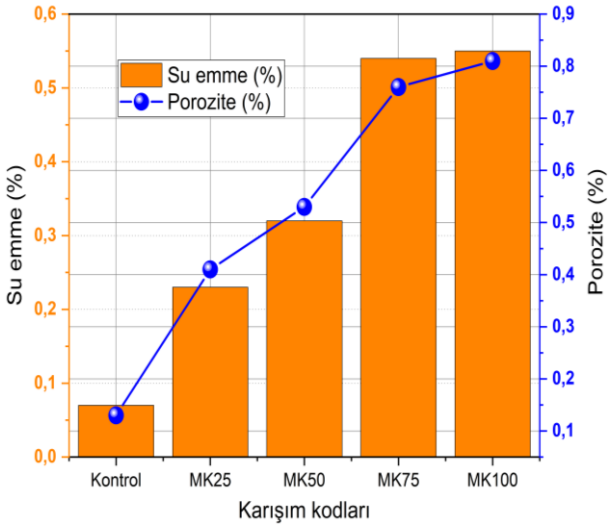
Görünür yoğunluk değerleri incelendiğinde, MK oranının artmasıyla görünür yoğunluk değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Polimer kompozitlerin görünür yoğunluğu, kontrol numunesinde 1,98 g/cm³ iken, MK100 kodlu numunede 1,39 g/cm³'e düşmüştür.

Ayrıca, tüm numunelerde görünür yoğunluk değerleri, kontrol numunesine göre sırasıyla %8,08, %16,16, %22,22 ve %29,80 oranında azalma göstermiştir. Bu sonuçlar, polyester bağlayıcı ile üretilen kompozitlerde dolgu maddesi miktarı arttıkça görünür yoğunluğun azaldığını gösteren önceki çalışmalarla uyumludur (Kolak et al. 2023; Beskopylny et al. 2023). Şekil 4a incelendiğinde, artan MK oranına bağlı olarak ultrases geçiş hızı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum, polimer miktarının sabit tutulması nedeniyle artan MK oranıyla boşluk miktarının arttığını göstermektedir. Ultrases geçiş hızı değerleri, bu durumu desteklemektedir. Kontrol numunesinde ultrases geçiş hızı değeri 3828 m/s iken, MK katkılı numunelerde sırasıyla 3395 m/s, 3113 m/s, 2912 m/s ve 2602 m/s olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, düşük görünür yoğunluğa sahip kompozitlerde ultrases geçiş hızı değerlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde, bu duruma benzer sonuçlar bildirilmiştir (Polat vd., 2020; Polat vd., 2023; Kolak vd.,, 2021). Ayrıca, ultrases geçiş hızı ve görünür yoğunluk arasında güçlü bir korelasyon ilişkisi (R^2 = 0,99) belirlenmiştir (Şekil 4b).

3.2. Su emme ve Porozite

Üretilen numune gruplarının su emme ve porozite değerleri, sırasıyla Denklem (1) ve (2) kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler, Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Su emme ve porozite değerleri

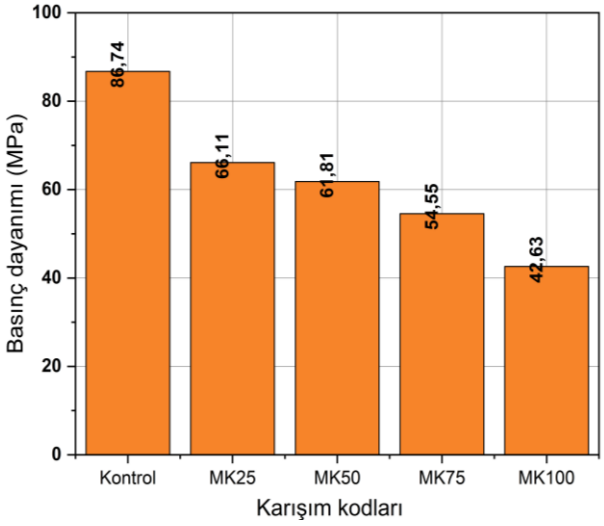
Şekil 5'te sunulan su emme değerleri incelendiğinde, MK oranı arttıkça su emme oranının da arttığı gözlemlenmiştir. MK katkılı kompozit numunelerde, su emme oranı MK25 kodlu numunede %0,23 iken, MK100 kodlu numunede %0,55'e yükselmiştir.

Bu durum, MK'nin yüksek su emme değerinden kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Tarımsal atıkların su emme etkisine ilişkin önceki çalışmalarla tutarlıdır. (Akbaş vd, 2013; Mo et al, 2020; Naguib et al, 2015; Barczewski et al, 2018; Boopalan et al, 2013).

Polimer kompozit numunelerinin porozite değerleri (Şekil 5) incelendiğinde, artan MK oranına bağlı olarak porozite değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. MK0 kodlu kontrol numunesinin porozite değeri %0,13 iken, MK100 kodlu numunenin porozite değeri %0,81'e yükselmiştir. Sonuç olarak, su emme değeri yüksek olan numunelerde porozite değerinin de daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

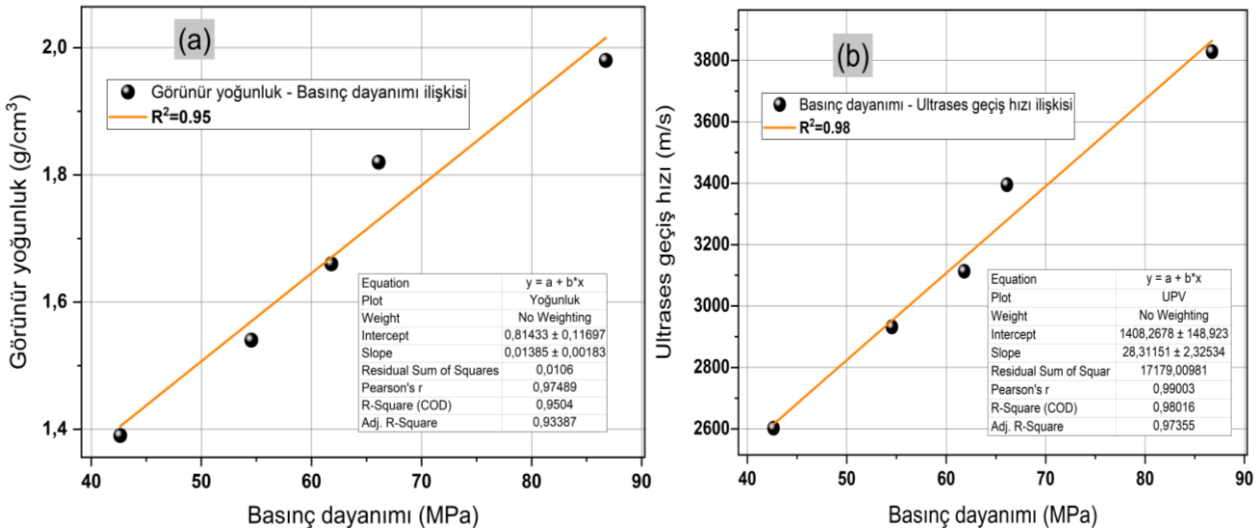
3.3. Basınç dayanımı

Basınç dayanımı testi, TS EN 12390-3 (2019) standardına göre yapılmıştır. Basınç dayanımı testi sonucunda elde edilen basınç dayanımı değerleri, Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6'da sunulan basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, MK oranının artmasıyla basınç dayanımı değerlerinde bir azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, MK oranının artmasıyla polimer kompozit numuneleri içindeki boşluk miktarının da arttığının bir sonucudur. Basınç dayanımı, kontrol numunesinde 86,76 MPa'dan, MK50 kodlu numunede 61,81 MPa'ya, MK100 kodlu numunede ise 42,63 MPa'ya düşmüştür.



Şekil 6. Basınç dayanımı değerleri

Şekil 7a'da görüleceği gibi, görünür yoğunluğun azalmasıyla benzer şekilde basınç dayanımı değerlerinde de bir azalma gözlemlenmiştir. Önceki çalışmalarda, tarımsal atık malzemelerin kullanım oranı arttıkça basınç dayanımlarının da azaldığı bildirilmiştir (Sutivisedsak vd. 2012; Satapathy vd. 2018; Balaji vd. 2016; Barczewski vd. 2019).



Şekil 7. a) Basınç dayanımı görünür yoğunluk ilişkisi b) Basınç dayanımı ultrases geçiş hızı ilişkisi

Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki, Şekil 7b'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Korelasyon katsayısı R^2'nin 1'e yakın olması, ilişkinin güçlü olduğunu göstermektedir. Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında (Şekil 7a) R^2 = 0,98, basınç dayanımı ile görünür yoğunluk arasında ise (Şekil 7b) R^2 = 0,95 gibi yüksek korelasyon ilişkileri belirlenmiştir.

3.4. UL94 Dikey Yanma Testi

UL94 dikey yanma testi, TS EN 60695-11-10 (2014) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm numunelere dikey yanma testi sırasında 10+10 saniye süreyle alev uygulanmıştır. Test sonucunda, kısmi tutuşma gözlemlenmesine rağmen, tüm numunelerde alev kaynağı uzaklaştırıldıktan sonra kendiliğinden sönme süresi 8 saniyenin altında kalmıştır.

Bu durum, polimer kompozit numunelerin üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan alev geciktirici polyesterde bulunan Alüminyum Hidroksit ($Al(OH)_3$) bileşiğinin, numune yüzeyinde kömürleşme tabakası oluşturarak tutuşmayı önlemesinden kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır.

Benzer değerlendirmeler, önceki literatür çalışmalarında da ifade edilmiştir (Kaya, 1998; Isitman ve Kaynak, 2012).

Polimer kompozit numunelerin UL94 dikey yanma testi sonuçları Çizelge 3'te sunulmuştur. Çizelge 3'teki veriler incelendiğinde, üretilen numunelerin V0 sınıfı özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Aydoğan ve Usta (2015), alev geciktiricilerin erken bozunma sürecine girerek malzeme yüzeyinde bir kabuk oluşumuna neden olduğunu, bu kabuğun ise malzeme ile oksijen arasındaki etkileşimi engelleyerek yanma sürecini yavaşlattığını belirtmiştir.

Bu durum, kontrol numunesinde açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Üretilen polimer kompozitlerde MK oranının artmasıyla, alev alma sürelerinde azalma, kendiliğinden sönme sürelerinde ise artış tespit edilmiştir.

Çizelge 3. UL94 dikey yanma testi sonuçları

Numune Kodu	Alev uygulama süresi (s)	Alev almaya başlama zamanı (s)	Kendiliğinden sönme süresi (s)	Dikey yanma sınıfı
MK0	10+10	17	3	V_0
MK25	10+10	16	4	V_0
MK50	10+10	14	4	V_0
MK75	10+10	13	5	V_0
MK100	10+10	12	7	V_0

4. Sonuçlar

Atık muz kabuğu dolgulu polimer kompozitlerde, dolgu malzemesi olarak muz kabuğu kullanımının avantajları ve sınırlılıkları değerlendirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, muz kabuğu oranının artmasıyla kompozitlerin görünür yoğunluklarının azaldığı tespit edilmiştir. Artan muz kabuğu oranına bağlı olarak ultrases geçiş hızı değerlerinde de azalma gözlemlenmiştir. Kontrol numunesine göre, yoğunluk değerlerinde %29,80, ultrases geçiş hızı değerlerinde %32 oranında azalma tespit edilmiştir. Bu durum, kompozitlerin boşluk yapısındaki artışla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, muz kabuğu oranının artmasıyla su emme ve porozite değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Polimer kompozit numunelerin basınç dayanımı değerleri ise artan muz kabuğu oranına bağlı olarak azalmıştır. En yüksek basınç dayanımı, kontrol numunesinde 86,4 MPa olarak elde edilirken, en düşük basınç dayanımı değeri 45,8 MPa ile MK100 kodlu numunede belirlenmiştir.

UL94 deney sonuçlarının incelenmesi, muz kabuğu dolgulu polimer kompozitlerin yangın dayanımı açısından olumlu bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, muz kabuğunun polimer kompozitler için potansiyel olarak düşük maliyetli bir dolgu malzemesi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, muz kabuğu dolgulu polimer kompozitler, hafiflik, düşük maliyet ve yangına dayanım özellikleri sunarak orta düzey mukavemet gereksinimi olan uygulamalarda potansiyel bir malzeme olarak değerlendirilebilir, ancak artan dolgu oranının mekanik performansı olumsuz etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı
Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı
Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur

Verilerin Kullanılabilirliği
Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

Akbaş, S., Tufan, M., Güleç, T., Taşçıoğlu, C., Peker, H., 2013. Fındık kabuklarının polipropilen esaslı polimer kompozit üretiminde değerlendirilmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, **14** (1), 50-56.

ASTM C597-16. 2016. Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete. American Society for Testing Materials.

Avşar, Y., and Çevik, B., 2023. Biyokompozit üretiminde takviye elemanı olarak kullanılan tarımsal atıkların incelenmesi ve Türkiye'deki tarımsal atık potansiyeli. Düzce Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 1(1), 15-25.

Aydoğan, B., and Usta, N., 2015. Nano kil ve kabaran alev geciktirici ilavesinin rijit poliüretan köpük malzemelerin ısıl bozunma ve yanma davranışlarına etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, ***30***(1), 9-18.

Barczewski, M., Mysiukiewicz, O., and Kloziński, A., 2018. Complex modification effect of linseed cake as an agricultural waste filler used in high density polyethylene composites. *Iranian Polymer Journa*l, **27**, 677-688. https://doi.org/10.1007/s13726-018-0644-3

Beskopylny, A. N., Stel'makh, S. A., Shcherban', E. M., Mailyan, L. R., Meskhi, B., Shilov, A. A., Chernil'nik, A., and El'shaeva, D., 2023. Effect of walnut-Shell additive on the structure and characteristics of concrete. *In Materials*, **16**, 4. 1752 https://doi.org/10.3390/ma16041752

Boopalan, M., Niranjanaa, M., and Umapathy, M. J., 2013. Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fibre reinforced epoxy hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, **51**, 54-57. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.02.033

Borazan, A. A., Gokdai, D., Acikgoz, C., and Adiguzel, D. A., 2017. The influence of chemically pre-treated chestnut waste and pinecone filler content on the properties of polyester composites. *Environment and Ecology Research*, **5**(3), 235-243. https://doi.org/10.13189/eer.2017.050309

Balaji, N. S., Jayabal, S., and Kalayana Sundaram, S., 2016. Study on mechanical properties of corn-cellulose fibers reinforced polyester composites. *In Macromolecular Symposia*. **361**, No. 1, 42-46. https://doi.org/10.1002/masy.201400241

Barczewski, M., Sałasińska, K., and Szulc, J., 2019. Application of sunflower husk, hazelnut shell and walnut shell as waste agricultural fillers for epoxy-based composites: A study into mechanical behaviour related to structural and rheological properties. *Polymer Testing*, **75**, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.017

Ferrante, A., Santulli, C., and Summerscales, J., 2020. Evaluation of tensile strength of fibres extracted from banana peels. Journal of Natural Fibers.17, 10, 1519-1531. https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1582000

Isitman, N. A., Kaynak, C., 2012. Effect of partial substitution of aluminum hydroxide with colemanite in fire retarded low-density polyethylene. *Journal of Fire Sciences*, **31**(1), 73–84. https://doi.org/10.1177/0734904112454835

Kaya, M., 1998. Alev geciktirici ve duman bastırıcı katkı maddeleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **11**(2), 77–88.

Kartal, İ., Naycı, G., and Demirer, H., 2019. Kestane/Gürgen Talaşı Dolgulu Vinil ester Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **16**, 723-728. https://doi.org/10.31590/ejosat.566756

Kolak, M. N., and Oltulu, M., 2023. Investigation of mechanical and thermal properties of new type bio-composites containing camelina. *Construction and Building Materials*, **362,** 129779. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129779

Kolak, M. N., and Oltulu, M. (2023). Effect of expanded perlite addition on the thermal conductivity and mechanical properties of bio-composites with hemp-filled. *Journal of Building Engineering*, **71**, 106515. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106515

Mo, K. H., Thomas, B. S., Yap, S. P., Abutaha, F., and Tan, C. G., 2020. Viability of agricultural wastes as substitute of natural aggregate in concrete: A review on the durability-related properties. Journal of Cleaner Production, **275**, 123062. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123062

Mohamed, G. R., Mahmoud, R. K., Shaban, M., Fahim, I. S., Abd El-Salam, H. M., and Mahmoud, H. M., 2023. Towards a circular economy: valorisation of banana peels by developing bio-composites thermal insulators. *Scientific Reports*, **13**(1), 12756. https://doi.org/10.1038/s41598-023-37994-1

Naguib, H. M., Kandil, U. F., Hashem, A. I., and Boghdadi, Y. M., 201. Effect of fiber loading on the mechanical and physical properties of "green" bagasse–polyester composite. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, **8**(4), 544-548. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.06.004

Öztürk, N.K., Öztürk, S., Sütçü, M., Sever, K., 2015. Fındıkkabuğu ve evsel çay atığı katkılı yüksek yoğunluklu polietilen kompozitlerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin belirlenmesi XIX. ulusal mekanik kongresi, **24-28** Ağustos, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Polat, H., Demirel, B., Kolak, M. N., Oltulu, M. 2020. Polimer betonlarda barit minerali kullanımının araştırılması. *Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, **1**(1), 25–32.

Polat, H., Üstün, İ., Şafak, A., & Çakılcıoğlu, A. N., 2023. Atık tuğla tozunun polimer betonda katkı malzemesi olarak kullanımı: mekanik özelliklerin incelenmesi. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **4**(2), 76-86. https://doi.org/10.53501/rteufemud.1306484

Kolak, M. N. And Oltulu, M. 2021. Atık Malzeme İçeren Polimer Bazlı Kompozitlerin Isıl İletkenlik Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, **13**(2), 310-320. https://doi.org/10.29137/umagd.822265

Rubiaceae, M. C. L, and Shami, A. M. M., 2015. SM Gr up annals of chromatography and separation techniques isolation and identification of anthraquinones extracted From. **1**(3): 3–5. https://doi.org/10.36876/acst.1012

Satapathy, S., and Kothapalli, R. V., 2018. Mechanical, dynamic mechanical and thermal properties of banana fiber/recycled high density polyethylene biocomposites filled with flash ecospheres. *Journal of Polymers and the Environment*, **26**, 200-213. https://doi.org/10.1007/s10924-017-0938-0

Sutivisedsak, N., Cheng, H. N., Burks, C. S., Johnson, J. A., Siegel, J. P., Civerolo, E. L., and Biswas, A., 2012. Use of nutshells as fillers in polymer composites. *Journal of Polymers and the Environment*, **20**, 305-314. https://doi.org/10.1007/s10924-012-0420-y

Taurino, R., Bondioli, F., and Messori, M., 2023. Use of different kinds of waste in the construction of new polymer composites. *Materials Today Sustainability*, **21**, 100298. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100298

Topuz, S., and Orhan, R., 2022. Şeftali çekirdeği kabuğunun polyester esaslı kompozitin bazı mekanik özellikleri üzerine etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, ***34*(**2), 565-577. https://doi.org/10.35234/fumbd.1089106

TS EN 12390-3. 2019. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 196-1., 2016. Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1170-6 Cam elyaf takviyeli çimento için deney yöntemleri- Bölüm 6: Daldırma yoluyla su emiliminin tayini ve kuru yoğunluğun tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 60695-11-10. 2014. Yangın tehlikesi deneyi- Bölüm 11-10: Deney alevleri- 50 w'lık yatay ve düşey alev deney metotları.

Ulutaş, E., and Taşdemir, M., 2024. Polipropilenin mekanik özelliklerine muz ve pirinç kabuğu tozlarının etkilerinin incelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, **14**(3), 1310-1319. https://doi.org/10.21597/jist.1455636

Yıldız, A. B., Çetinkaya, K., 2012. Banana fiber and pet bottles waste reinforced polymer composites. U*sak University Journal of Material Sciences*, **1**(1), 29-34.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1556983
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035603 (621-634)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035603 (621-634)

Architectural Heritage After the February 6th Kahramanmaraş Earthquakes: Preliminary Observations on Historical Masonry Structures

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 27.09.2024
Kabul/Accepted: 19.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

6 Şubat Kahramanmaraş Depremleri Sonrası Mimari Miras: Tarihi Yığma Yapılar Üzerine Ön Gözlemler

Sedef KOCAKAPLAN SEZGIN[1*], Özden SAYGILI[2]

[1] *Bursa Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, Bursa, Türkiye*
[2] *AtkinsRéalis, Leeds, United Kingdom*

Abstract

On February 6th, 2023, Kahramanmaraş province in Türkiye experienced a powerful earthquake with a magnitude of 7.7 on the Richter scale, followed by another significant earthquake with a magnitude of 7.6. These seismic events resulted in considerable loss of life, injuries, and extensive damage to the region's historical masonry structures. The seismic vulnerability of these structures, stemming from factors such as low strength, inadequate seismic detailing, and limited ductility, contributed to various forms of damage, including cracking, displacement, and, in some cases, complete collapse under the seismic forces. The objective of this study is to provide comprehensive field research results of masonry historical structures situated in various cities within the region impacted by the Kahramanmaraş earthquakes occurred on February 6, 2023. The paper presents the findings of reconnaissance studies, delving into the failure mechanisms observed in masonry historical structures, with specific attention to walls, domes, and minarets. The insights gained from the earthquake damages will be valuable in reducing the likelihood of future earthquake damage to these structures.

Keywords: *Kahramanmaraş Earthquakes; Historical Structures; Masonry; Damage.*

Öz

2023 yılı 6 Şubat tarihinde, Türkiye'nin Kahramanmaraş ilinde Richter ölçeğine göre 7.7 büyüklüğünde şiddetli bir deprem meydana gelmiş, ardından 7.6 büyüklüğünde bir başka büyük deprem daha yaşanmıştır. Bu sismik olaylar, çok sayıda can kaybı ve yaralanmalara ve bölgedeki tarihi yığma yapılarda geniş çaplı hasarlara neden olmuştur. Bu yapıların düşük dayanım, yetersiz sismik detaylandırma ve sınırlı süneklik gibi etkenlerden kaynaklanan sismik zayıflıkları, çatlama, yer değiştirme ve bazı durumlarda tamamen yıkılma gibi çeşitli hasar türlerine yol açmıştır. Bu çalışmanın amacı, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden etkilenen bölgedeki çeşitli şehirlerde bulunan yığma tarihi yapıların kapsamlı saha araştırması sonuçlarını sunmaktır. Makale, yığma tarihi yapılarda gözlemlenen hasar mekanizmalarını, özellikle duvarlar, kubbeler ve minareler üzerindeki etkilerini inceleyen keşif çalışmalarının bulgularını paylaşmaktadır. Deprem hasarlarından elde edilen bu çıkarımlar, gelecekte bu tür yapıların deprem hasarlarını azaltmada önemli katkılar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: *Kahramanmaraş Depremleri; Tarihi Yapılar; Yığma Yapılar; Hasar.*

1. Introduction

On February 6th, 2023, a magnitude 7.8 earthquake reported by USGS and 7.7 reported by AFAD struck Pazarcık, Kahramanmaraş, followed by a magnitude 6.7 aftershock just 11 minutes later. Later that day, a particularly strong earthquake with a magnitude of 7.5 by USGS (and reported 7.6 by AFAD) occurred 95 km (~60 miles) to the north. These two large earthquakes were relatively shallow, resulting in severe shaking. The Turkish Accelerometric Database and Analysis System (TADAS, 2023) managed by AFAD (Disaster and Emergency Management Presidency) published all seismic records after the earthquakes. In Figure 1, the epicentres of the Pazarcık and Elbistan earthquakes are marked with black pins with the aftershocks recorded during February 2023. The variable "d" represents the depth of the earthquakes, while "M" indicates their magnitude. The seismic sequence, resulting from shallow strike-slip faulting, caused widespread destruction and resulted in tens of thousands of fatalities in Türkiye and Syria. Official reports confirm that 50,783 people lost their lives in the 2023 Kahramanmaraş earthquakes (Kazaz et al., 2024).

Various studies have been conducted to date focusing on the 2023 Kahramanmaraş earthquakes. Field reconnaissance investigations have been carried out by numerous researchers (Ağvın et al. 2024, Işık et al. 2024, Ivanov and Chow 2023, Karasın 2023, Kocakaplan Sezgin et al. 2024). The literature also includes analyses of

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Sedef KOCAKAPLAN SEZGIN* *e-posta/e-mail: sedef.kocakaplan@btu.edu.tr*

damages to different structural types beyond masonry structures (Yuzbaşı 2024, İzol et al. 2024, Arslan et al. 2024, Vuran et al. 2024). Furthermore, studies addressing earthquake characteristics and geotechnical damages have been conducted (Çetin et al. 2024, Akar et al. 2024, Öser et al. 2024, Kocakaplan Sezgin et al. 2024).

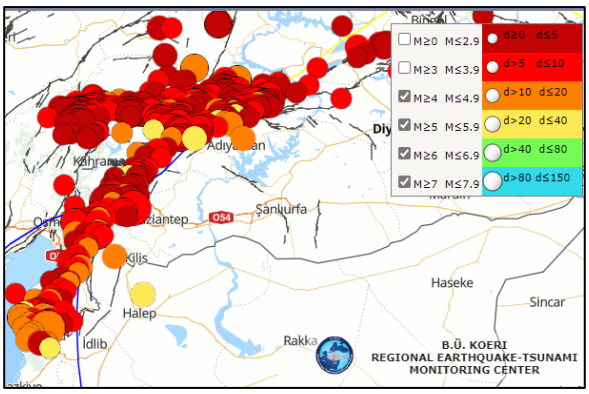


Figure 1. Map of 2023 Türkiye earthquake modified from KOERI (KOERI-RETMC, 2023)

Türkiye's historical masonry structures, such as churches, castles, and walls, are an essential part of the country's cultural heritage. The regions affected by the earthquakes including Adana, Adıyaman, Kahramanmaraş, Gaziantep, Şanlıurfa, Diyarbakır, Osmaniye, Hatay, Kilis, Malatya and Elazığ contains a significant amount of cultural heritage. For instance, the UNESCO World Heritage List in 1987 included 'Nemrut Dağ' in Adıyaman. The mausoleum of Antiochus I (69–34 B.C.) located in Nemrut Dag, is regarded as one of the most ambitious constructions of the Hellenistic period. While there is no damage to the archaeological findings on Nemrut Dag, one of the four columns of the Karakuş Tumulus (69–34 B.C.), located at the foothills of Nemrut Dag, was collapsed (ArkeolojiSanat, 2023) proving the destructiveness of the earthquake in the region (see Figure 2). Adana's architectural landscape features, historical landmarks dating back to the Ottoman, Roman, and Byzantine periods. On the other hand, in Kahramanmaraş, the region's earliest known civilization traces back to the Hittites (2000-1200 BC). Gaziantep's recognized 'Gaziantep Castle' dates to the Hittites, and its historic centre reflects Ottoman heritage. Şanlıurfa, recognized for 'Göbekli Tepe,' features cultural gems like the Grand Mosque. Hatay, an ancient Anatolian centre, showcases structures from various eras. Malatya, in the northeast, has a rich history since 5000 B.C., with the 'Yeni Mosque' standing as a notable Ottoman-era symbol.

The present study has two objectives: to present the structural damage and failure patterns induced by Kahramanmaraş earthquake sequences to the historical masonry structures in the region; to highlight the causes and weakness that led to damage, or factors to prevented it. The insights gained from the earthquake damages will be valuable in reducing the likelihood of future earthquake damage to these structures. In pursuit of this objective, the first author conducted a field reconnaissance in the area affected by the Kahramanmaraş earthquakes between February 16 and 24 specifically in Hatay and Gaziantep.

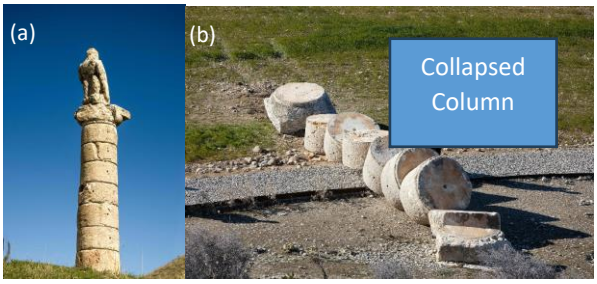


Figure 2. Karakuş Tumulus (a) Eagle column (ArkeolojiSanat, 2023) (b) collapsed column.

Due to safety concerns the inspection of most buildings was carried out from the outside. Observations and comments are accompanied by representative photos, while simplified sketches are provided to aid in the interpretation and systematization of the observations. Therefore, this study provides a clear comparison of conditions before and after seismic events, highlighting the critical importance of implementing effective seismic safety measures in the design, construction, and preservation of historical masonry structures. Additionally, drawing lessons from past earthquakes and applying this knowledge to mitigate future risks will enhance community resilience and reduce the potential for disasters.

The subsequent sections of this paper are organized as follows: Initially, recorded strong ground motions and their properties are presented. In the next section, the construction typology of the region is summarized. Following that, the paper presents the findings of reconnaissance studies, delving into the failure mechanisms observed in masonry historical structures, with specific attention to walls, domes, and minarets and concludes with final remarks.

2. Seismicity of Türkiye and Recorded Strong Ground Motions during the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes

Türkiye is prone to significant seismic activity due to its location on several active faults, including the North Anatolian Fault (NAF), East Anatolian Fault (EAF), Northeast Anatolian Fault (NEAF), and West Anatolian Fault (WAF). The NAF and EAF, known for their frequent

seismic activity, have caused numerous major earthquakes in recent decades, resulting in significant casualties and extensive damage. The Kahramanmaraş region, specifically, experiences seismic activity related to the EAF, a significant left-lateral strike-slip fault stretching over 600 km.

The mainshocks and aftershocks of the February Kahramanmaraş Earthquakes were recorded at multiple sites, with the furthest being 460 km from the epicentre. These seismic records were obtained from the Turkish Accelerometric Database and Analysis System (TADAS, 2023). In this study, for the Pazarcık Earthquake, the selected stations were located within a 200 km radius of the epicentre, while for the Elbistan Earthquake, the analysed stations were within 150 km of the epicentre. Figure 3 to Figure 6 illustrates the distribution of Spectral Acceleration (Sa) (1.0 and 0.2) and Peak Ground Acceleration (PGA) values for the Elbistan and Pazarcık Earthquakes and simple faults as well as surface rupture lines (Reitman et al., 2023). the maps were created using ArcGIS software (ESRI, 2011).

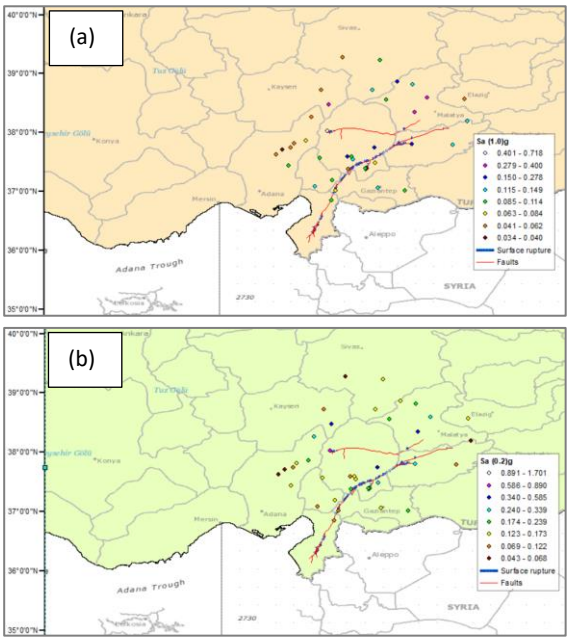


Figure 3. Spatial distribution of Spectral acceleration for (a) 1.0g and (b) 0.2g for Elbistan earthquake.

PGA is a direct measure of the maximum horizontal acceleration experienced by the ground during an earthquake and it serves as a critical factor in assessing potential damage to structures. By analysing the PGA values for both Pazarcık and Elbistan earthquakes, we can observe the intensity of shaking experienced in different regions and how this correlates with the earthquake magnitudes. For both earthquakes, PGA distribution shows high values near the epicentre, suggesting localized severe ground shaking. The PGA values tend to decrease as we move further away from the epicentre, though the reduction is not uniform due to geological variations such as soil type and fault characteristics. In some regions, the shaking remained intense due to amplification effects, particularly in areas with softer soil. Spectral Acceleration (Sa) is an important measure used in seismic design to estimate how a structure will respond to different frequencies of ground motion.

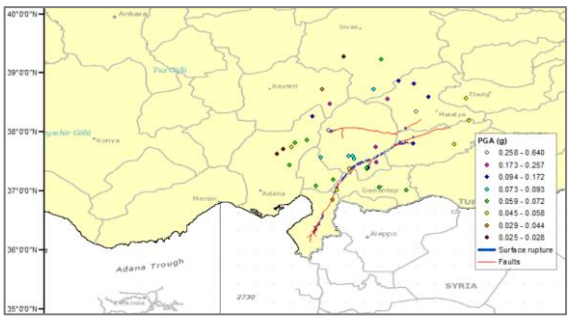


Figure 4. Spatial distribution of PGA values for Elbistan Earthquake.

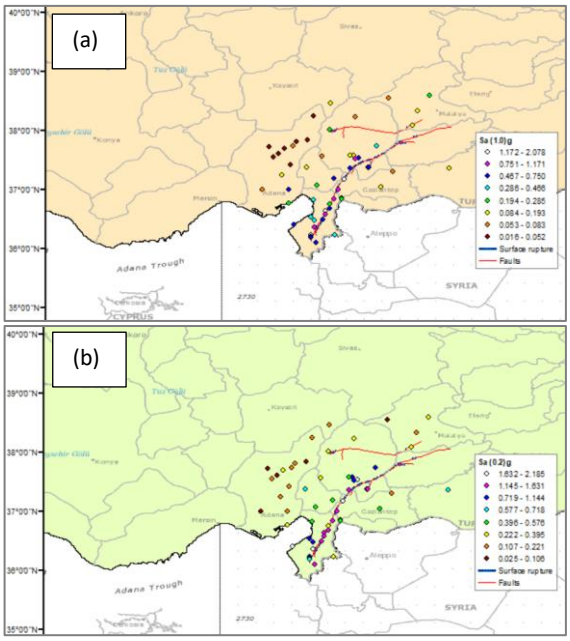


Figure 5. Spatial distribution of Spectral acceleration for (a) 1.0g and (b) 0.2g for Pazarcık earthquake.

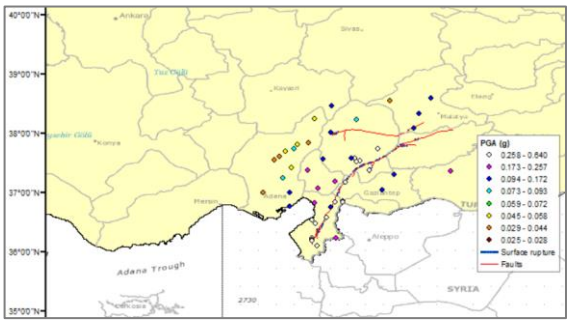


Figure 6. Spatial distribution of PGA values for Pazarcık Earthquake.

The Sa(0.1) values taper off less gradually than the PGA values, implying that the shaking affected a broader region, not just limited to the epicentral area. This is critical for low-rise buildings that were subjected to extended periods of high intensity shaking. For the Pazarcık Earthquake the Sa (0.2) distribution shows a similar pattern to Sa(0.1) but with slightly lower peak values near the epicenter, often in the range of 0.8-0.9g while it is in the range of 0.7-0.8g of Elbistan Earthquake. The distribution pattern of Sa (0.1) for the Elbistan event shows a more localized effect, with higher values concentrated closer to the fault rupture zone. The distribution of PGA and Sa (0.1) and Sa(0.2) for the Pazarcık and Elbistan earthquakes reveals significant ground shaking across the affected regions. The Pazarcık event exhibited higher peak values, probably leading to more severe localized damage, while Elbistan showed a wider spread of shaking intensity. Both earthquakes had substantial impact, but the differences in magnitude and location resulted in varying damage potentials.

3. Varieties of Building Constructions

The historical structures in the earthquake affected region, encompassing mosques, churches, buildings, mausoleums, and castles, are predominantly constructed using stone masonry and less frequently of brick masonry. Most of these structures were constructed during the Seljuk and Ottoman eras and have been impacted by previous earthquakes and the predominant materials for roofing and flooring systems in these structures are timber. The masonary structures in Türkiye has been affected by the different earthquakes during their lifetime. Many studies have been published up to this time considering the weak behaviour of masonary buildings under several occurred earthquakes in Türkiye (Cetin et al. 2020, Oyguc and Oyguc 2017, Cakir et al. 2015, Dogan et al. 2013).

The subsequent paragraphs provide a summary of the construction materials and techniques identified in these structures, emphasizing structural aspects that significantly influenced the seismic response of the structures.

3.1 Construction Materials

The construction materials that were used for the historical structures in the earthquake affected region mostly consist of rubble stone and cut stone. The substandard quality of both the stones and mortar, compounded by degradation over time, has led to poor seismic performance. An illustration of stone disintegration is evident in Figure 7a, representing the Latin Catholic Church of Iskenderun constructed around 1858. Similar failures for the historical masonry structures due to poor quality of material were observed in Samos Island (Aegean Sea) Earthquake with Mw= 7.0 on 30 October 2020 (Cetin et al. 2020) and Mw=6.3 earthquake occurred in Lesvos Island on the 12th of June 2017 (Vlachakis et al. 2020).

The use of cut stones is another widely utilized construction method and material. The stones forming the cut stone wall are generally quarry stones. In the production of cut stone walls, just like alongside traditional structures, stones that are most abundant in their regions and naturally more economical were used in construction. The depth of the stones to be used is arranged to provide the wall thickness. The construction of cut stone walls can be with the use of mortar in between or without any joints. In the construction of jointless cut stone walls, the stones should be connected to each other using connectors of metal (iron or copper). Figure 7b demonstrates the failure of the minaret of the Şirvani Mosque in the city centre of Gaziantep, which was constructed using cut stone (Tayla, 2007). In addition to the slenderness of the minaret, the opened metal connecters in between the stones observed during the field reconnaissance.

Figure 7. (a) Rubble stone masonry disintegration due to poor quality of materials, (b) cut stone disintegration due to opened metal connecter equipment in between**.**

3.2 Construction Techniques

Unreinforced masonry (URM) refers to structures lacking reinforcement (mainly timber elements) or possessing insufficient reinforcement. Analyses conducted on the damage sustained by buildings in the aftermath of various earthquakes have exposed the seismic vulnerability inherent in URMs (Cetin et al. 2020, Oyguc and Oyguc 2017, Vlachakis et al. 2020, Karatas and Bayhan 2023, Nasery et al. 2024). URM buildings can be built with two- or three-leaf rubble stone masonry (Vlachakis et al. 2020). Figure 8a depicts the Church of Mary in Samandağ, Hatay, which suffered damage due to the absence of transversal interlocking stones, resulting in masonry delamination. It

is noteworthy that the Church of Mary sustained minor damage after the earthquakes on February 6th but experienced severe damage following the Samandağ aftershock on February 20, 2023, with a magnitude of 5.8.(Anadolu Ajansı, 2023).

(a) (b)

Figure 8. Poor quality, multi-leaves stone masonry buildings (a) Church of Mary, Samandağ, Hatay (Anadolu Ajansı, 2023), (b) English Protestant School, Samandağ, Hatay (Haber Global, 2023).

(a) (b)

Figure 9. (a) Proper connection of quoin stones, Karagöz Mosque, Gaziantep. (b) Insufficient connection of quoin stones, St. Nicholas Orthodox Church of Iskenderun, Hatay.

(a) (b)

Figure 10. (a) Kahramanmaraş Saraçhane Mosque before the earthquakes (Go Turkiye, 2020). (b) Damage after the Kahramanmaraş earthquakes.

Figure 8b illustrates another example of the damage to a two-leaf stone masonry building corresponding to English Protestant School in Samandağ, Hatay. An important detail in the construction of URM structures is the corners. Typically, corners are constructed using quoin stones, facilitating the connection of transversal walls, and mitigating the risk of local or global failures (Vlachakis et al. 2020). Figure 9a provides a tangible example of the implementation of quoin stones at the Karagöz Mosque in the city centre of Gaziantep, while Figure 9b illustrates the lack of quoin stones in the corner of the St. Nicholas Orthodox Church of Iskenderun in Hatay. The corners of URM buildings during the restoration process should be provided with rigid corner connections to prevent separations or cracks. In timber-laced masonry, vertical and horizontal reinforcing timber bars enhance the strength and ductility of the walls (Oyguc and Oyguc 2017). Figure 10a and 10b exemplify a timber-laced masonry structure, the Kahramanmaraş Saraçhane Mosque, constructed in the 18th century.

The mosque features regularly spaced timber ring elements across the height of the walls. The structure's roof is comprised of timber framing, which collapsed during the Kahramanmaraş earthquakes. However, the timber-laced masonary part of the mosque remains intact. The restoration efforts should be performed carefully not only for the architectural aspects also for the civil engineering concepts based on the seismic design codes (Güleç, 2023).

4. Damage and Failure Patterns

Masonry structures, constructed with materials like bricks, stones, and mortar, are characterized by brittleness and limited ductility leading to low seismic resistance. These structures lack substantial deformation capacity before failure, making them susceptible to sudden and catastrophic collapse when exposed to seismic loading. Moreover, the age of the structures, combined with poor construction practices, lack of maintenance, and exposure to environmental degradation, increases their vulnerability. In many cases, the structural elements are not reinforced with steel or other materials, which limits their capacity to resist seismic forces. The use of non-ductile materials, such as unreinforced masonry, and the lack of proper connections between the structural elements, also contribute to the low seismic resistance. These structures are susceptible to seismic events, which can result in significant damage or even collapse. To better understand the seismic behaviour of historical masonry structures, researchers have conducted numerous studies and assessments (Sarhosis et al. 2021, 2022, Vlachakis et al. 2020).

The seismic performance of historical masonry structures is dependent on several factors, including the structure's geometry, size, masonry material quality, and the

seismicity level of the region. Stiffness, damping, and strength of structural elements play crucial roles in influencing the seismic response of masonry structures. The structure's stiffness and damping impact the distribution of seismic forces, while strength determines its capacity to withstand these forces. Assessing the seismic behaviour of historical masonry structures poses a significant challenge due to the lack of reliable data on structural and material properties. Unlike modern structures adhering to strict seismic codes, historical constructions were often built using traditional methods without detailed engineering calculations, making accurate seismic behaviour estimation difficult. To address this challenge, various experimental and analytical techniques have been devised, including laboratory tests on material samples, in-situ testing of structural elements, and numerical modelling. These methods offer valuable insights into the structural behaviour of historical masonry structures and aid in formulating appropriate retrofit strategies to enhance their seismic resilience.

As part of the current investigation, the authors conducted on-site inspections of historical masonry structures in the earthquake-affected region that experienced damage in recent seismic events to evaluate their present structural condition. The visually assessed structures were classified into distinct categories such as regular buildings, mosques, church buildings, and masonry walls each thoroughly examined under these specific classifications. The outcomes of the inspection have been systematically presented to offer a comprehensive insight into the damage sustained by these significant historical structures located in Türkiye's East Anatolia Region. Figure 11 depicts the distribution of historical structures affected by the earthquake across the region, and Table 1 provides the corresponding names of these structures.

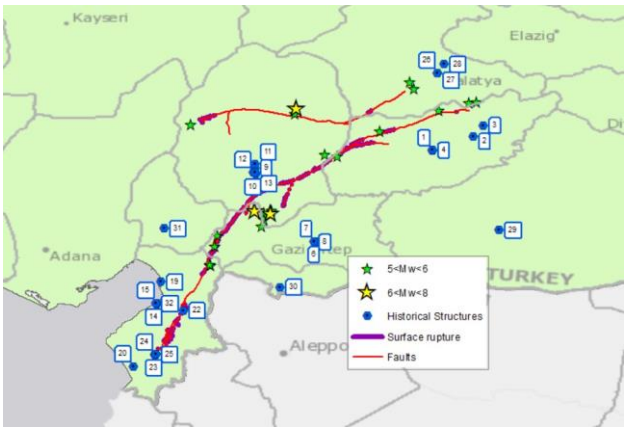


Figure 11. Location of the historical structures over the earthquake effected region.

Table 1. Corresponding structures.

Historical Masonry Structures					
1	The Grand Mosque	12	Fatih Mosque	23	Antakya Greek Orthodox Church
2	Handshaking Columns*	13	Bayazıtlı Mosque	24	Antakya Protestant Church
3	Kahta Castle	14	St. Nicholas Orthodox Church*	25	Mahmeriye Mosque
4	Yenipınar Mosque	15	Iskenderun Catholic Church*	26	Yeni Mosque
5	Şirvani Mosque*	16	Hatay Council Building*	27	Hacı Yusuf Taş Mosque
6	Karagöz Mosque*	17	The Grand Mosque of Antakya	28	Sütlü Minaret
7	Kurtuluş Mosque*	18	Hatay Habib-I Neccar Mosque*	29	The Grand Mosque of Urfa
8	Bayazhan*	19	Sarı Selim Mosque, Payas*	30	The Grand Mosque of Kilis
9	The Grand Mosque of Kahramanmaraş (Mosque Kebir)*	20	Church of Mary, Samandağ*	31	Enverül Hamid Mosque
10	Arasa Mosque	21	Aziz Georgios Greek Orthodox Church	32	Mithatpaşa Primary School*
11	Saraçhane Mosque*	22	Darb-I Sak Castle		

*Considered in this study.

4.1 Historical Masonary Buildings

This section outlines the damage encountered by historical governmental and trading buildings, school structures, and the subsequent sections will detail the damage to mosques, churches, and masonry walls. Figure 12 shows the damage of the exterior walls of Bayazhan in Gaziantep. Bayazhan is a building characterized by a rectangular shape with an open section in the middle, and the building was constructed using the cut stone masonry. It was built in 1909 and underwent restoration in 2019 (Kultur Envanteri, 2023).

The distance of Bayazhan to the fault rupture line for the first earthquake is around 58 km. According to Figure 12b, the disintegration, mainly delamination of the external leaf, of masonry was observed during the site investigation conducted by the authors. In literature, this

behaviour is also described as the "zero" mechanism, occurring when a masonry portion is incapable of resisting nearly any horizontal force and disintegrates into pieces (Indirli et al. 2013, Vlachakis et al. 2020). Figure 12c illustrates the overturning of gable end walls known as local failure mechanism which is due to the inadequate connection with the roofing system and the walls. Similar failure mechanism is also reported by Güleç (2023) in which the author observed failures due to inadequate connection between roof system and the walls.

Figure 12. Bayazhan in Gaziantep, (a) Bayazhan before Kahramanmaraş earthquakes (Photo Credit: Gaziantep Provincial Directorate of Culture and Tourism). (b) Damage at the walls of the east side of Bayazhan. (c) Damage at walls the west side of Bayazhan.

The mainshock's maximum Mercalli intensity (MMI) was estimated to have reached MMI XI–XII in Antakya and near the epicenter. MMI XI or higher was observed along the fault rupture from the epicenter to Antakya, spanning approximately 400 kilometers. The evident fault rupture and near-field effects led to severe building damage and collapses in Antakya during the Mw 7.7 earthquake. Additionally, Antakya is situated in the Amik basin, a Holocene sediment-filled basin bounded by two strands of the Dead Sea Fault System to the east and west. The values for peak ground acceleration (refer to Figure 6) and peak ground velocity are notably (Erdik et al., 2023) higher in the Hatay Province to the southwest, likely due to basin amplification effects and directivity effects. (Erdik et al. 2023, Kazaz et al. 2024, METU-EERC 2023). The Hatay Council Building, situated in Antakya Province (refer to Figure 13a), experienced severe structural damage during the earthquake. The construction of the building was completed in 1928, and the building consist of cut stone load-bearing walls and reinforced concrete column forming the core around the courtyard. As depicted in Figure 13b, the load-bearing system constructed with cut-stone completely collapsed, and the reinforced concrete columns failed, exhibiting weak column behaviour at the connections. Figure 13c and 13d depict Mithatpaşa Primary School, built in 1926 by the French, located in Iskenderun Province in Hatay. The school, constructed with rubble stone featuring long walls and a timber roof, experienced complete collapse of the roof and the second floor during the Kahramanmaraş earthquake sequence.

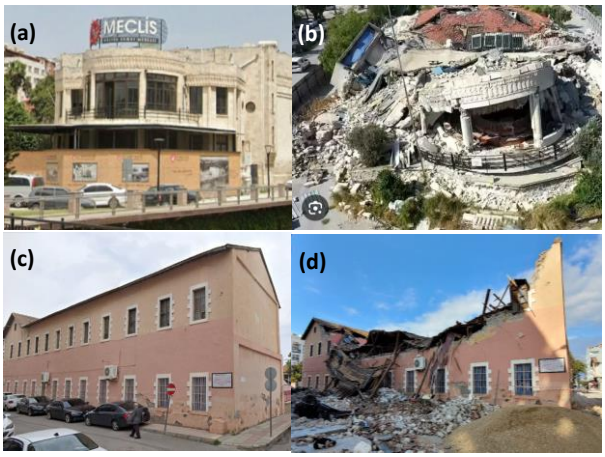


Figure 13. (a) Hatay Council Building before Kahramanmaraş earthquakes (Google Earth, 2022). (b) Hatay Council Building, damage after the earthquakes (CNN TURK, 2023). (c) Mithatpaşa Primary School, Kahramanmaraş earthquakes (Google Earth, 2022). (d) Mithatpaşa Primary School, damage after the earthquakes.

4.2 Historical Masonary Mosques

Masonry mosques are commonly found in many parts of the world, and their seismic behaviour has been the subject of considerable research (Arıoğlu and Anadol 1973, Caktı et al. 2013, Doğangün et al.,2007, Kocaman and Kazaz 2023, Saygılı et al. 2023). These studies provide valuable insights into the seismic behaviour of masonry mosques and offer practical solutions for improving their seismic resistance. In Turkish architecture, particularly during the Anatolian Seljuk period, large mosques with masonry piers or wooden columns and multiple domes are referred to as 'ulu' mosque (the grand mosque). In the Ottoman period, mosques commissioned by sultans are generally called 'selatin' mosques (Tayla, 2007). The fundamental structural components of the mosque's supporting system include a main dome, buttresses, secondary domes, and main arch. Detailed information about significant failures observed in the structural elements of the mosques is provided in the following subsections.

Recent articles related to the 2023 earthquakes are also pointed out the damages observed in masonary mosques

(Avğın and Köse 2023, Onat et al. 2023, Kocaman et al. 2024, Işık et al. 2023).

Figures 14a and 14b represent the complete collapse of The Habibi Neccar Mosque, situated in Antakya Province, where high PGA values were documented (AFAD, 2023; Erdik et al., 2023). The Habibi Neccar Mosque, initially constructed around the 7th century and recognized as the first mosque in Anatolia, underwent reconstruction around the 11th century and has undergone multiple repairs over time (Hatay Governorship, 2024). The Habibi Neccar Mosque is a masonry structure that was constructed with cut stone. The collapse of the masonry dome was followed by the out-of-plane behaviour of the masonary walls. URM walls are most vulnerable to flexural out-of-plane behaviour (Oyguc and Oyguc, 2017). The partial collapse of the Grand Mosque of Kahramanmaraş is depicted in Figures 14c and 14d, with the partial collapse of its minaret. The Grand Mosque of Kahramanmaraş was built in 15th century and belongs to the group of mosques with wooden ceilings. The mosque, reflecting the characteristics of the early Anatolian Seljuk architecture and the exterior walls are constructed of rough-cut and rubble stone.

4.2.1 Minarets

Masonry minarets are tall, slender structures that have been used for centuries as architectural features of mosques and other religious buildings. In Anatolia, the earliest minarets were built by the Seljuks. Usually, the minarets had a stone base and a brick shaft. The transition from the square base to the circular form of the shaft was realized by means of Turkish triangles (Uluengin et al., 2019). Figure 15 shows the sections of a typical minaret: (1) spire, (2) upper part of the minaret body, (3) balcony, (4) cylindrical or polygonal body/shaft (5), transition segment, (6) pulpit.

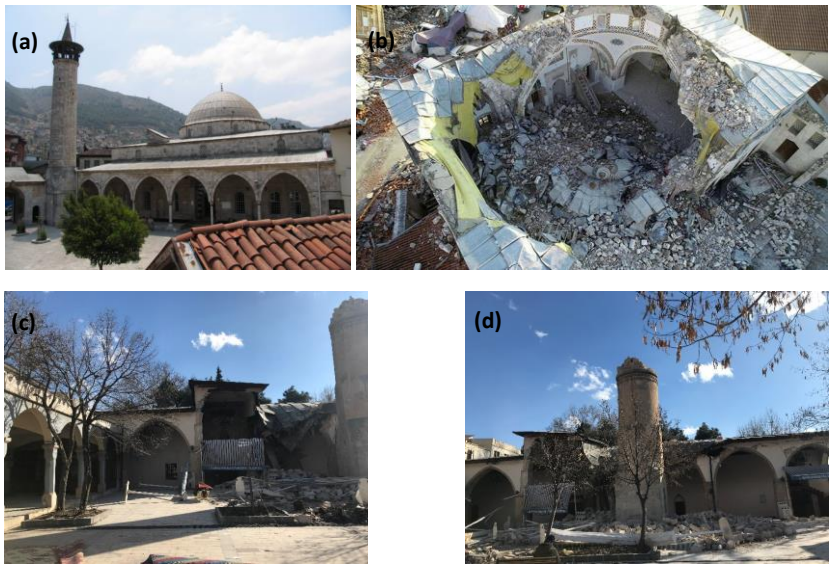


Figure 14. (a) Habib-I Neccar Mosque before the Kahramanmaras Earthquakes (Google Earth, 2022). (b) Damage in Habib-I Neccar Mosque the after the earthquakes (DHA, 2023). (c) Damage in The Grand Mosque of Kahramanmaraş after the earthquakes, (d) Damage in The Grand Mosque of Kahramanmaraş after the earthquakes.

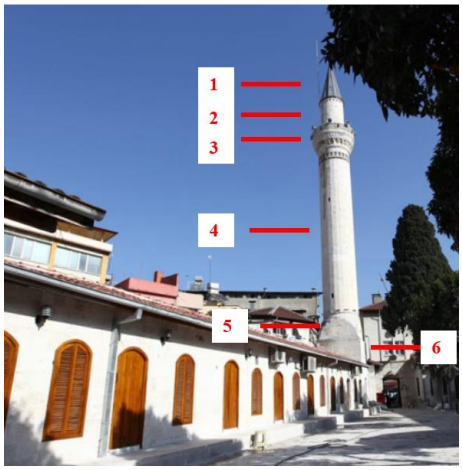


Figure 15. The Grand Mosque of Antakya before the Kahramanmaras Earthquakes and details of a typical minaret (Antakya Municipality, 2015).

Due to their height and slender nature, these structures are vulnerable to seismic forces, which can cause them to sway and potentially collapse.

As part of the current investigation into the evaluation of historic masonry structures in the earthquake-affected region following recent seismic events, the authors visually inspected several minarets to assess their current structural condition. In particular, the differences between the pre-earthquake and post-earthquake states of these structures were investigated to better understand the extent of the damage sustained by the earthquakes. For this purpose, the image of the minarets was obtained following the earthquakes, facilitating a thorough visual analysis of the structures. These

photographs offer a detailed illustration of the damage incurred by the minarets, showcasing the diverse structural alterations resulting from the seismic events. By presenting these images, the objective is to offer a more holistic insight into the effects of earthquakes on historic masonry structures, particularly minarets. Through this presentation, the aim is to contribute to the advancement of more effective measures for earthquake-resistant design and construction practices in the future. As an example, Figure 16a shows the minaret of Sarı Selim Mosque in Iskenderun, constructed in the 16th century, while Figure 16b illustrates the minaret of Karagöz Mosque in Gaziantep, built in the 18th century, both constructed using masonry techniques. According to both figures, damage is evident in the balcony section of the minarets. As reported by Doğangün et al. (2007), minarets are more susceptible to damage in areas such as the hood, upper part, balcony, and transition sections during seismic events. The region above the balcony experiences maximum displacement, and the lack of stairs in the upper body contributes to reduced rigidity, leading to a rapid increase in the displacement. Figure 16c and 16d shows the Şirvani Mosque in Gaziantep constructed in 17th century as masonry structure. The collapse of the minaret lead to extensive damage also at the mosque.

Figure 16. (a) Damage in the minarets at Sarı Selim Mosque in Iskenderun, Hatay. (b) Damage in Karagöz Mosque in Gaziantep city centre. (c) Şirvani Mosque in Gaziantep before the Kahramanmaraş Earthquakes (Google Earth, 2022). (d) Collapse of the Minaret of Şirvani Mosque after the earthquakes.

4.2.2 Domes

Masonry domes, often found in historical structures, are distinguished by their curved and spherical design, playing a crucial role in covering large interior spaces in temples, palaces, churches, and mosques. These domes, being constructed with materials that possess minimal tensile strength, are susceptible to significant damage and collapse when subjected to powerful seismic forces. Instances of severe structural damage and collapses in masonry domes have been documented in historical events (Bayraktar et al., 2022). Domes serve as structural elements covering surfaces of buildings with square, polygonal, and circular floor plans in three-dimensional space. These curved surfaces bear vertical forces, including their own weight and external loads like snow. In historical constructions, masonry is commonly employed as the primary material. The structural concept relies on the distribution of loads from the uppermost keystone to adjacent stones, gradually transferring the load to the dome's base (Bilgin, 2006).

Figure 17a and 17b illustrates the Gaziantep Kurtuluş Mosque prior and after the Kahramanmaraş earthquake sequences. The Gaziantep Kurtuluş Mosque, formerly known as the Virgin Mary Church, is a 125-year-old structure constructed with cut stone. Originally built as a church in 1892, this historic building, situated in Gaziantep, served as a prison after its church function until 1980. Subsequently, it underwent conversion into a mosque (Güllü and Karabekmez, 2016). The central dome, spanning approximately 12 meters in diameter, has a height of 30 meters above the ground (Güllü and Karabekmez, 2016). The collapse of the dome occurred in the mosque, which is mainly due to significant diameter of the dome and due to the insufficient connection to the

body of the main structure. The typical damage at the balcony of the minaret also occurred in the mosque.

(a) (b)

Figure 17. Kurtuluş Mosque in Gaziantep before the Kahramanmaraş Earthquakes (Google Earth, 2022). (b) Dome and minaret damage in Kurtulus Mosque after the earthquake.

4.3 Historical Masonary Churches

Churches are the significant historical structures of the region with their architectural features. Out-of-plane failure mechanism were observed in the churches. In the absence of a 'box like behaviour' of structures, the internal forces of the walls perpendicular to the seismic action give rise to out-of-plane bending. Long walls or walls with insufficient transversal support suffers vertical, one-way bending as seen in Figure 18 in Iskenderun Catholic Church. The walls experienced out-of-plane failure, also due to the top part of the façades might inadequately connected with the roof, and the wall behaves as a cantilever about their base (rocking type of failure) (Vlachakis et al., 2020).

(a) (b)

Figure 18. Iskenderun Catholic Church (a, b) Out-of-plane damage in the Iskenderun Catholic Church after the earthquake.

Multiple failure mechanisms observed during the field studies in St. Nicholas Orthodox Church in Iskenderun, Hatay (see Figure 19). The distance of the church to fault rupture is around 18 kilometres. The church's construction was initiated in the 1870s and features masonry construction, with load-bearing walls composed of brick or stone. The church experienced damage during the Amik earthquake of 1872 and reopened after 1876. Out-of-plane mechanism of the front wall at the entrance of the Church were examined as reported in Figure 19a and 19b.

(a) (b)

Figure 19. St. Nicholas Orthodox Church in Iskenderun, (a, b) Observed combined in-plane and out-of-plane mechanisms in the St. Nicholas Orthodox Church after the earthquake.

In addition to out of plane mechanisms, in-plane damages were also observed. As reported by Güleç (2023), cracks commonly form around openings such as doors and windows due to stress concentrations. Based on the observations of Güleç (2023) and the guidelines outlined in the Turkish Building Earthquake Code (TBEC,2018) intersecting walls or vertical tie beams (e.g., timber) can be employed to mitigate these cracks. According to the TBEC, the spacing between vertical tie beams in newly constructed unreinforced masonry structures must not exceed four meters. Therefore, during the restoration process, careful attention should be given to maintaining this spacing.

6. Conclusions

On February 6th, 2023, a powerful earthquake struck the province of Kahramanmaraş in Türkiye. The earthquake had a magnitude of 7.7 on the Richter scale, and it was followed by another strong earthquake with a magnitude of 7.6. The earthquakes caused significant loss of life and injury, and significant disruption to the region's historical masonry structures. Seismic behaviour of historical masonry structures is a significant concern for the preservation of the worlds' cultural heritage and the safety of people. These structures are vulnerable to seismic loading due to their low strength, poor seismic detailing, and limited ductility. This vulnerability resulted in cracking, displacement, and even collapse under the force of ground motion. In addition to its inherent weakness, the damage to masonry mosques can be worsened by a range of factors, including inadequate reinforcement and detailing, poor construction quality, and insufficient maintenance. The combination of these factors led to partial or total collapse of the structures.

On-site observations indicate that historical buildings are susceptible to various types of damage and malfunctions

that can be classified into several categories. For example, cracks and slight shifts in the stones of the minarets were observed, as well as failures above the balcony area. Minor cracks in the vertical connections of mosque walls were also observed, which can be remedied with paint. In addition, failure in church buildings due to use of long walls, and lack of quoin stones in the corners were observed.

To ensure the historical masonary structures' resilience to seismic events, it is essential to assess their seismic behaviour accurately and develop suitable assessment, restoration and retrofit strategies. The seismic performance of masonry structures can be enhanced by utilizing high-tensile-strength fiber-reinforced mortar or steel reinforcement systems, all while preserving the historical significance of the structures. Adhering to seismic design codes is crucial throughout the reconstruction process (e.g., material properties, unreinforced length of the walls). The preservation of our cultural heritage is a collective responsibility, and ensuring the seismic resilience of historical masonry structures is an essential part of it. The current study presents a clear before-and-after comparison, to demonstrate the urgent need for effective seismic safety measures in the design, construction, and maintenance of historical masonry buildings. Furthermore, learning from past earthquakes and applying this knowledge to reduce future vulnerabilities will strengthen community resilience and decrease the likelihood of disasters.

Declaration of Ethical Standards

It is hereby declared that scientific and ethical principles were followed during the preparation of this work, and all sources used are cited in the reference list.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, investigation, visualization and writing – original draft.

Author-2: Conceptualization, writing – review and editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data Availability Statement

The authors declare that the main data supporting the findings of this work are available within the article.

Acknowledgement

The authors acknowledge the support received by the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TÜBİTAK) [grant number 123D052: Evaluation of Seismological and Engineering Effects of February 6, 2023, Mw = 7.7 and Mw = 7.6 Kahramanmaraş, Pazarcık and Elbistan Earthquakes by Field Study", and the support received by the Bursa Technical University (BTU). The Authors would like to thank to Prof. Beyhan Bayhan for his remarkable photographs that contribute to this study. The authors would also like to express their gratitude to Dr Gökhan Barış Sakcalı and Ms Melike Akçay for compiling the information on the names and history of the collapsed buildings in the earthquake-affected region.

7. References

Ağvın, S. & Köse M (2023). Mosques and minarets damages in the earthquakes on February 6, 2023. Proceedings of the 3rd International Civil Engineering & Architecture Conference Volume 1: Civil Engineering. http://dx.doi.org/10.31462/icearc.2023.sme305

Avğın, S., Köse, M.M. & Özbek, A., (2024). Damage assessment of structural and geotechnical damages in Kahramanmaraş during the February 6, 2023, earthquakes. Engineering Science and Technology, an International Journal, 57, 101811. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101811.

Akar, F., Işık, E., Avcil., F., Büyüksaraç, A., Arkan, E., & İzol, R., 2024. Geotechnical and structural damages caused by the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes in Gölbaşı (Adıyaman). Applied Sciences, 14(5), 2165. https://doi.org/10.3390/app14052165.

Arıoğlu, E., and Anadol, K. (1973). On the earthquake resistance of the Süleymaniye Mosque (İstanbul) in the historical perspective (1557–1973). In: 5th World Conference on Earthquake Engineering, International Association for Earthquake Engineering, Rome, Italy.

Arslan, M.H., Dere, Y., Ecemiş, A.S., Doğan, G., Öztürk, M., & Korkmaz, S.Z., (2024). Code-based damage assessment of existing precast industrial buildings following the February 6th, 2023 Kahramanmaraş earthquakes (Pazarcık Mw 7.7 and Elbistan Mw7. 6). Journal of Building Engineering, 86, 108811. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108811.

Bayraktar, A., Hökelekli, E., & Yang, T. T. Y. (2022). Seismic failure behavior of masonry domes under strong ground motions. *Engineering Failure Analysis*, 142, 106749. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106749

Bilgin, H. (2006). Mimar Sinan Yapılarında Kubbeli Örtü Sistemlerinin Yapısal Analizi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 21(3), 119-128.

Büyüksaraç, A., Işık, E., Bektaş, Ö., Avcil, F., (2024). Achieving Intensity Distributions of 6 February 2023 Kahramanmaraş (Türkiye) Earthquakes from Peak Ground Acceleration Records. Sustainability, 16(2), 599. https://doi.org/10.3390/su16020599.

Cakir, F., Uckan, E., Shen, J., Seker, B.S., Akbas, B., (2015). Seismic damage evaluation of historical structures

during Van eartjquake, October 23, 2011. Engineering Failure Analysis. 58(2015) 249–266. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.030.

Caktı, E., Lemos, J., Saygılı, Ö., and Oliveira, C. S. (2013). Dynamic Analysis of the Mustafa Pasha Mosque Model by Discrete Elements. SE-50EEE International Conference on Earthquake Engineering, Skopje, North Macedonia.

Cetin, K. O., Mylonakis, G., Sextos, A., and Stewart, J. P. (2020). Seismological and Engineering Effects of the M 7.0 Samos Island (Aegean Sea) Earthquake. Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association: Report GEER-069.

Cetin, K.Ö., Soylemez, B., Guzel, H. and Cakir, E., 2024. Soil liquefaction sites following the February 6, 2023, Kahramanmaraş-Türkiye earthquake sequence. Bulletin of Earthquake Engineering, 1-24. https://doi.org/10.1007/s10518-024-01875-3.

Doğan, M., 2013. Failure of structural (RC; masonry, bridge) to Van earthquake. Engineering Failure Analysis. 35, 489-498. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.05.010

Doğangün, A., Sezen, H., Tuluk, Ö. İ., Livaoğlu, R., & Acar, R. (2007). Traditional Turkish Masonry Monumental Structures and their Earthquake Response. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(3), 251–271. https://doi.org/10.1080/15583050701436980

ESRI. (2011). ArcGIS Desktop: Release 10.8 (10.8). *Environmental Systems Research Institute*, Redlands, California, USA.

Güleç A. (2023). Kahramanmaraş Depreminin Yığma Yapılar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Gazi Journal of Engineering Sciences, 9(3), 634-646. https://doi.org/10.30855/gmbd.0705094

Güllü, H., & Karabekmez, M. (2016). Gaziantep Kurtuluş camisinin deprem davranışının incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 455–470.

Indirli, M., S. Kouris, L. A., Formisano, A., Borg, R. P., & Mazzolani, F. M. (2013). Seismic Damage Assessment of Unreinforced Masonry Structures After The Abruzzo 2009 Earthquake: The Case Study of the Historical Centers of L'Aquila and Castelvecchio Subequo. *International Journal of Architectural Heritage*, 7(5), 536–578. https://doi.org/10.1080/15583058.2011.654050.

Işık, E., Avcil, F., Arkan, E., Büyüksaraç, A., İzol, R. & Topalan R. (2023). Structural damage evaluation of mosques and minarets in Adıyaman due to the 06 February 2023 Kahramanmaraş earthquakes. Engineering Failure Analysis, 151, 107345. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107345.

Işık, E., Avcil, F., İzol, R., Büyüksaraç, A., Bilgin, H., Harirchian, E., Arkan, E., (2024). Field Reconnaissance and Earthquake Vulnerability of the RC Buildings in Adıyaman during 2023 Türkiye Earthquakes. Applied Sciences, 14(7), 2860.

Ivanov, M.L., & Chow, W., (2023). Structural damage observed in reinforced concrete buildings in Adiyaman during the 2023 Turkiye Kahramanmaras Earthquakes. In Structures, 58, 105578 https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105578

Izol, R., Işık, E., Avcil, F., Arslan, M.H., Arkan, E., & Büyüksaraç, A., (2024). Seismic performance of masonry structures after 06 February 2023 earthquakes; site survey and FE modelling approach. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 186, 108904. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108904

Karasin, I. B., 2023. Comparative analysis of the 2023 Pazarcık and Elbistan Earthquakes in Diyarbakır. Buildings, 13(10),2474. https://doi.org/10.3390/buildings13102474

Karataş, L., & Bayhan, B., (2023). Damage assessment and restoration proposal following the 2023 Türkiye earthquakes: UNESCO World Heritage Site Diyarbakır City Walls, Türkiye. Heritage Science, 11(1), 1-18. https://doi.org/10.1186/s40494-023-01072-6

Kazaz, İ., Bilge, İ. H., & Gürbüz, M. (2024). Near-fault ground motion characteristics and its effects on a collapsed reinforced concrete structure in Hatay during the February 6, 2023 Mw7.8 Kahramanmaraş earthquake. *Engineering Structures*, 298, 117067. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117067

Kocaman, İ., & Kazaz, İ. (2023). Collapse mechanism of historical masonry mosques under strong ground motions. *Engineering Failure Analysis*, 144, 106983. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106983.

Kocaman, I., Mercimek, Ö., Gürbüz, M., Erbaş, Y., Anıl, Ö., (2024). The effect of Kahramanmaraş earthquakes on historical Malatya Yeni Mosque. Engineering Failure Analysis,161,108310. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108310.

Kocakaplan Sezgin, S., Ahmadi, E. & Kashani, M.M (2024). Time-domain acceleration-based pulse characterization of 2023 Kahramanmaraş earthquakes. Bull Earthquake Eng 22, 6259–6279. https://doi.org/10.1007/s10518-024-02007-7.

Kocakaplan Sezgin, S., Sakcalı, G.B., Özen, S., Yıldırım, E., Avcı, E., Bayhan, B., Çağlar, N., 2024. Reconnaissance report on damage caused by the February 6, 2023, Kahramanmaraş Earthquakes in reinforced-concrete structures, Journal of Building Engineering, Volume 89, 109200. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109200.

Nasery, M.M., Çelik, M., Şadoğlu, E., (2024). Damage assessment of Siverek Castle during the Kahramanmaraş Earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6) on 06 February 2023: Remediation and strengthening proposals. Engineering Geology, 334, 107511. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107511

Onat O., Deniz F., Özmen A., Özdemir E., Sayın E. (2023). Performance evaluation and damage assessment of historical Yusuf Ziya Pasha Mosque after February 6, 2023 Kahramanmaras earthquakes. Structures, 58, 1-25. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105415

Oyguc, R., and Oyguc, E. (2017). 2011 Van Earthquakes: Lessons from Damaged Masonry Structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(5),1-20. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001057

Öser, C., Sargin, S., Yıldırım, A.K., Korkmaz, G., Altınok, E., Kelesoglu, K., 2024. Geotechnical aspects and site investigations on Kahramanmaras earthquakes, February 06, 2023. Natural Hazards, 1-32.

Sarhosis, V., Dais, D., Smyrou, E., Bal, İ. E., & Drougkas, A. (2021). Quantification of damage evolution in masonry walls subjected to induced seismicity. *Engineering Structures*, 243, 112529. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112529

Sarhosis, V., Giarlelis, C., Karakostas, C., Smyrou, E., Bal, I. E., Valkaniotis, S., & Ganas, A. (2022). Correction to: Observations from the March 2021 Thessaly Earthquakes: an earthquake engineering perspective for masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(10), 5517–5518. https://doi.org/10.1007/s10518-022-01452-6

Saygılı, Ö., Lemos, J. V., and Moghimi, S. (2023). Site Specific Hazard Assessment and Multi-Level Seismic Performance Evaluation of Historical Mosque. *International Journal of Architectural Heritage*, 18(7), 1–21. https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2216175

Tayla, H. (2007). Geleneksel Türk Mimarisinde Yapı Sistem ve Elemanları. 1. Basım, Cilt I, Türkiye Anıt ve Çevre Turizm Derneği Koruma Vakfı, İstanbul, 40-150.

Uluengin, F., Uluengin, B., and Uluengin, M. B. (2019). Classic Construction Details of Ottoman Monumental Architecture, Seventh Edition, Yem Yayın, İstanbul, 24-146.

Vlachakis, G., Vlachaki, E., & Lourenço, P. B. (2020). Learning from failure: Damage and failure of masonry structures, after the 2017 Lesvos earthquake (Greece). *Engineering Failure Analysis*, 117, 104803. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104803.

Yuzbasi, J., (2024). Post-Earthquake Damage Assessment: Field Observations and Recent Developments with Recommendations from the Kahramanmaraş Earthquakes in Türkiye on February 6th, 2023 (Pazarcık M7. 8 and Elbistan M7. 6). Journal of Earthquake Engineering, 1-26. https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2353864.

Internet References

1- AFAD. (2023). 06 Şubat 2023 Pazarcik (Kahramanmaraş) Mw 7.7 Elbistan (Kahramanmaraş) Mw 7.6 Depremlerine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu. https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmaras%20%20Depremleri_%20On%20Degerlendirme%20Raporu.pdf, (09.02.2023)

2- Anadolu Ajansı. (2023, February 21). Hatay Merkezli Deprem Meryem Ana Kilisesindeki Hasarı Artırdı. Anadolu Ajansı. https://www.aa.com.tr/tr/asrin-felaketi/hatay-merkezli-deprem-meryem-ana-kilisesindeki-hasari-artirdi/2826625, (21.02.23)

3- Antakya Municipality. (2015). Antakya Ulu Mosque. https://www.antakya.bel.tr/icerik/41/640/ulu-cami.aspx (12.01.2024)

4- ArkeolojiSanat. (2023, February 13). Karakuş Tümülüsü'ndeki tokalaşma sütunu depremde yıkıldı. Www.Arkeolojisanat.Com. https://www.arkeolojisanat.com/shop/blog/karakus-tumulusundeki-tokalasma-sutunu-depremde-yikildi_3_1372036.html, (13.02.2023)

5- CNN TURK. İşte deprem sonrası Hatay Meclis binası. https://Www.Cnnturk.Com/Video/Turkiye/Iste-Deprem-Sonrasi-Hatay-Meclis-Binasi-2041337, (08.09.2023)

6- DHA. Antakya'daki 14 asırlık Habib-i Neccar Camisi depremde yıkıldı. https://www.Dha.Com.Tr/Foto-Galeri/Antakyadaki-14-Asirlik-Habib-i-Neccar-Camisi-Depremde-Yikildi-2204243/1, (10.02.2023)

7- Erdik, M., Tümsa, M. B. D., Pınar, A., Altunel, E., and Zülfikar, A. C. (2023). A preliminary report on the February 6, 2023, earthquakes in Türkiye. Temblor. https://doi.org/10.32858/temblor.297, (12.01.2024)

8- Go Turkiye. (2020). Kahramanmaraş Go Turkiye. https://kahramanmaras.goturkiye.com/tr/gor, (12.01.2024)

9- Google Earth. (2022). Google Earth Pro 7.3.6.9345. Date accessed: 12/05/2023. <https://www.google.com/earth/index.html> (Pro 7.3.6.9345. (December 29, 2022)). https://www.google.com/earth/index.html, (29.01.2024)

10- Haber Global. (2023). Deprem Hataydaki İngiliz Protestan Mektebinde Hasara Sebep Oldu. Haber Global. https://haberglobal.com.tr/gundem/deprem-hataydaki-ingiliz-protestan-mektebinde-de-hasara-sebep-oldu-231896, (13.02.2023)

11- Hatay Governorship. (2024). Anadolu'nun İlk Camisi. http://www.hatay.gov.tr/anadolunun-ilk-camisi, (12.01.2024)

12- KOERI-RETMC. (2023). Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake research Institute Regional Earthquake-Tsunami Monitoring Center. http://udim.koeri.boun.edu.tr, (10.12.2023)

13- Kultur Envanteri. (2023). Bayaz Han, Gaziantep. https://kulturenvanteri.com/tr/yer/bayazhan-gaziantep-kent-muzesi/#18.42/37.061637/37.370827, (10.01.2024)

14- METU-EERC. (2023). Preliminary report on the Pazarcık (Kahramanmaraş) Mw 7.7 and Elbistan (Kahramanmaraş) Mw 7.6 earthquakes. https://eerc.metu.edu.tr/en/system/files/documents/DMAM_Report_2023_Kahramanmaras-Pazarcik_and_Elbistan_Earthquakes_Report_final_ENG.pdf, (20.02.2023)

15- Reitman, N. G., Richard W. Briggs, William D. Barnhart, Jessica A. Thompson Jobe, Christopher B. DuRoss, Alexandra E. Hatem, Ryan D. Gold, John D. Mejstrik, & Sinan Akçiz. (2023). Preliminary fault rupture mapping of the 2023 M7.8 and M7.5 Türkiye Earthquakes. https://doi.org/10.5066/P985I7U2, (15.06.2023)

16- TADAS. (2023). Turkish Accelerometric Database and Analysis System (TADAS). https://tadas.afad.gov.tr, (19.04.2023)

17- Turkish Building Earthquake Code (2018). https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm. (18.03.2018)

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1493278
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035604 (635-646)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035604 (635-646)

Monitoring and Evaluation of Meteorological Drought in Malatya Station: Standard Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI)

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 31.05.2024
Kabul/Accepted: 11.01.2025
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Malatya İstasyonunda Meteorolojik Kuraklığın İzlenmesi ve Değerlendirilmesi: Standart Yağış İndeksi (SPI) ve Keşif Kuraklık İndeksi (RDI)

İlteriş TAŞKOLU[1], Reşat ACAR[2], Burak ÇIRAĞ[2*]

[1] *Istanbul Esenyurt University, Vocational School, Construction Technology Program, Istanbul, Türkiye*
[2] *Atatürk University, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Erzurum, Türkiye*

Abstract

Drought is one of the biggest natural disasters in our country and in the world. It brings many financial and moral problems in all geographies where it is seen socially and economically. In this study, the impact of drought, which causes so many negativities, on Malatya province is discussed. With the help of the widely used Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI), detailed drought analyses were made for 3, 6, 9, and 12 months, time intervals using data form 1957-2018. According to the results of the analysis, approximately one out of every two months in the study region was dry. Although the two methods give similar results, slight differences are observed. The reason for this is; unlike SPI, RDI includes temperature data along with precipitation. The driest periods for both methods were observed between 2012 and 2014. According to the SPI method; the driest month was July 2014 with an index value of -3.62, while according to the RDI; July 2014 was again observed with an index value of -3.52. Trend analysis of precipitation and temperature data was made and it was determined that precipitation tends to decrease and temperature tends to increase. It is obvious that climate change, increasing temperature and decreasing precipitation will expose the region to the threat of severe drought in the coming years. The study provides basic information to local administrators and researchers.

Keywords: Drought analysis, Drought assessment, Precipitation, Standardized precipitation index, Reconnaissance drought index.

Öz

Kuraklık, ülkemizde ve dünyada oldukça geniş bölgelere yayılmış en büyük doğal afetlerin başında gelmektedir. Sosyal ve ekonomik olarak görüldüğü tüm coğrafyalarda maddi ve manevi birçok sorunu da peşinden getirmektedir. Yapılan bu çalışmada bunca olumsuzluğa sebebiyet veren kuraklığın Malatya ili için olan etkisi ele alınmıştır. Oldukça yaygın olarak kullanılan Standart Yağış İndeksi (SPI) ve Keşif Kuraklık İndeksi (RDI) yardımıyla 1957-2018 arasındaki veriler kullanılarak 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman aralığı için detaylı kuraklık analizleri yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre; çalışma bölgesinde yaklaşık olarak her iki aydan biri kurak geçmiştir. İki yöntemde birbirine yakın sonuçlar vermesine rağmen düşük oranda farklılıklar gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise; SPI'dan farklı olarak RDI, yağışla birlikte sıcaklık verisini de dahil etmesidir. Her iki yöntem içinde en kurak dönemler 2012-2014 yılları arasında gözlemlenmiştir. SPI yöntemine göre; en kurak ay -3,62 indeks değeriyle Temmuz 2014 olurken, RDI'ya göre ise; -3,52 indeks değeriyle yine Temmuz 2014 görülmüştür. Yağış ve sıcaklık verilerinin trend analizleri yapılmış olup, yağışın azalma, sıcaklığın ise artma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. İklim değişikliği, artan sıcaklık ve azalan yağış gelecek yıllarda bölgeyi çok ciddi kuraklık tehdidiyle karşı karşıya bırakacağı aşikardır. Çalışma yerel yöneticilere ve araştırmacılara temel bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kuraklık analizi; Kuraklık değerlendirme; Yağış; Standart yağış indeksi; Keşif kuraklık indeksi

1. Introduction

Water is probably the most important natural resource in the Middle East due to its historical significance in establishing human life in Mesopotamia (Gezici *et al.* 2024). Abnormal changes in precipitation and temperature are the main causes of flood hazards and, for some regions, drought phenomena (Dehghani *et al.* 2022, Çirağ and Fırat 2023). Drought can be defined as a natural disaster or extreme weather event caused by a prolonged lack of precipitation (Katipoğlu *et al.* 2021). According to the physical impact of drought on the environment, there are four categories of drought: meteorological, agricultural, hydrological, and socioeconomic drought (Wilhite and Glantz 1985, Addi *et al.* 2021, Topçu 2022). Meteorological drought is a drought that can last for months to years and occurs as a result of less than normal precipitation (Hobbins *et al.* 2008, Çelik and Yakar 2024). As drought develops to a certain extent, water storage

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Burak Çırağ — e-posta/e-mail: burak.cirag@atauni.edu.tr

and river flow in aquifers, lakes or reservoirs will be affected, leading to hydrological drought and socioeconomic losses (Mehran *et al.* 2015, Xu *et al.* 2019, Xu *et al.* 2021). Agricultural drought can be defined as a deficiency in soil moisture that can cause great damage to agriculture and socioeconomically (Zhang *et al.* 2021).

Drought is a disaster that develops slowly and shows its effects for many years, unlike disasters that occur rapidly such as earthquakes and floods (Şener 2021). Drought therefore has no clear beginning and end (Kchouk *et al.* 2022). However, there are various drought indices to determine the impact and severity of drought. Drought indices provide insight into changes over time by determining the characteristics of drought, such as its severity. They therefore form the basis of drought management plans (Wilhite 2005, Katipoğlu *et al.* 2020). Liu *et al.* (2021) conducted drought analysis in Sichuan province in southwest China using SPI (Mckee *et al.* 1993) and the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI). As a result of the study, they reported that there were significant differences between the two indices for some regions. They also attributed the main causes of frequent drought in this region to synoptic climatology and atmospheric anomalies of precipitation circulation. Taylan and Bahşi (2021) aimed to analyze the drought of Gaziantep province in Türkiye by using SPI. As a result of the study, they stated that the longest dry period in Gaziantep station occurred between 1950-1960. Mohammed and Yimam (2021) examined the intensity of drought with RDI (Tsakiris *et al.* 2005) for the Lakes' Region of Ethiopian Rift Valley using rainfall and temperature data between 1986 and 2019 for 3 and 12 months. They stated that drought was experienced in almost all stations within the study area. Mondol *et al.* (2021) used the Effective Drought Index (EDI) to investigate the frequency and severity of drought in the Barind tract and the Teesta floodplain in Bangladesh. They concluded that the results and findings of the study indicate that drought is on an increasing trend. Kartal (2024) aimed to analyze the drought of Elazığ province in Turkey using SDI, RDI and the Effective Reconnaissance Drought Index (eRDI). As a result of the study, it was emphasized that the results of the three indices were very similar to each other.

This study aims to analyze the drought intensity and the trend of precipitation and temperature values of Malatya province, which provides a significant amount of Türkiye's and the world's fresh and dried apricot needs. In this context, using monthly temperature and precipitation data from 1957 to 2018, drought indices were calculated employing the SPI and RDI methods, yielding outputs across different time scales (3, 6, 9, and 12 months). Innovative Trend Analysis (ITA) method was used for trend analysis. Within the scope of the study, drought values were determined using monthly data, analyzed according to drought classification and the similarity between the indices was analyzed. The study presents the drought trend of the region on a temporal scale in detail by using long-term measurement records. The study also aims to contribute to the understanding of the impact of climate change at the local scale.

2. Materials and Methods

2.1 Study area

Malatya province (Figure 1), which provides a significant amount of Türkiye's and the world's apricot demand, was selected as the study area. Malatya is located between 35 54' and 39 03' north latitudes and 38 45' and 39 08' east longitudes in the Upper Euphrates Basin of the Eastern Anatolia Region in Türkiye and has a surface area of 12.313 km2 and a population of 808.692 people (Çırağ and Fırat 2022). According to the data of the Turkish Meteorology General Directorate (MGM) (Int. Kyn. 1), the highest total daily precipitation between 1927 and 2023 was 88.9 mm (11.06.1997), the highest snowfall was 33 cm (31.01.1950), the highest temperature was 41°C (27.07.2012) and the lowest temperature was -24.9°C (05.01.1942). The average temperature and total precipitation data used for this study were obtained from the Meteorological observation station located at the coordinates 38°20'12.00"N - 38°13'2.40"E in Malatya province and 950 m above sea level.

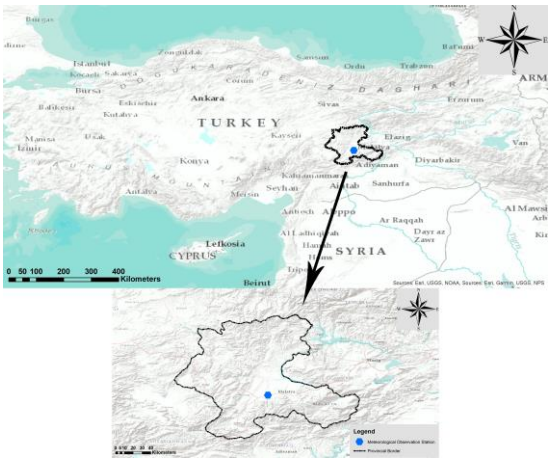


Figure 1. Location of the meteorological observation station in Malatya province

2.2 Drought indices

2.2.1 SPI

The SPI is calculated by fitting the gamma probability density function to a given precipitation time series (Zarch *et al.* 2015). Precipitation is transformed into normalized numerical values and the SPI expresses the amount by which observed precipitation deviates from the long-term

average in terms of standard deviation (Equation 1). Therefore, the SPI can be used to describe and compare drought conditions in different regions. The index provides a reliable estimate of the magnitude, severity and spatial extent of drought. The SPI is positive when precipitation is above the long-term average, while the SPI is negative when precipitation falls below the long-term average (Tirivarombo *et al.* 2018).

$$SPI = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (1)$$

where, xi is the precipitation amount of the selected period i, x̄ is the long-term average precipitation and σ is the standard deviation for the selected period.

2.2.1 RDI

First proposed by Tsakiris *et al.* (2005), it is an index for monitoring agricultural and meteorological drought that requires cumulative precipitation and potential evapotranspiration (PET) data (Topçu and Seçkin 2022). The RDI is a meteorological index widely used in the assessment of drought. The RDI is expressed in three different ways: initial value (α), normalized RDI and standardized RDI. The initial value (α) is presented aggregated over monthly time periods and can be calculated on a monthly, seasonal or annual basis (Ansarifard *et al.* 2018). When expressing the Exploratory Drought Index, (α_k^i) and (RDI_{st}) (standardized) are used. The calculation should be started by finding the initial value (α_k^i) of the Exploratory Drought Index. Let P denote precipitation for month j of year i (j = 1 (October),..., 12 (September)) and PET denote potential evapotranspiration for month j of year i (j = 1 (October),..., 12 (September)). In this case, (α_k^i) can be calculated as given in Equation 2, where N is the number of hydrological years and k is the number of months (Taşkolu 2023).

$$\alpha_k^i = \frac{\sum_{j=1}^{k} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{k} PET_{ij}},\ i = 1,2,\ldots,N\ ,\ j = 1,2,\ldots,k \quad (2)$$

In this study, the Thornthwaite potential evapotranspiration method, which is easier and more practical than other methods, was used to calculate PET. In the Thornthwaite method, potential evapotranspiration is estimated as given in Equation 3 (Thornthwaite, 1948; Taşkolu and Güngör, 2025).

$$PET = 16\left(\frac{N}{12}\right)\left(\frac{m}{30}\right)\left(10\frac{T_{mean}}{I}\right)^a \quad (3)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12}\left(\frac{T_{mean}}{5}\right)^{1.514} \quad (4)$$

$$a = (6.75)10^{-7}I^3 + (-7.71)10^{-5}I^2 + (1.79)10^{-2}I + 0.49 \quad (5)$$

where T_{mean} is the monthly average temperature (°C), N is the monthly average daylight hours (hours/days), a is the coefficient, and I is the heat index.

As stated by Zarch *et al.* (2015), SPI and RDI can be classified according to the drought classification in Table 1.

Table 1. SPI and RDI classification (Zarch *et al.* 2015)

SPI and RDI value	Drought category
2 or more	Extremely wet
1.5–1.99	Very wet
1–1.49	Moderately wet
0.99–0.0	Normal
0.0 to −0.99	Near normal
−1 to −1.49	Moderately dry
−1.5 to −1.99	Severely dry
−2 and less	Extremely dry

For both indices, different time periods such as monthly (i) can be determined by considering the effect of precipitation deficiency on different water resources. In general, studies use different time periods such as 1, 3, 6, 12, 24 and 48 months (i) to see short-term and long-term effects. This methodology is based on how long it takes for the impact of a lack of precipitation over time periods to be felt on available water resources. For example, while a decrease in precipitation in any given month can have a rapid impact on soil moisture, the impact on groundwater and streams occurs over a longer period of time (Özfidaner and Topaloğlu, 2020). Therefore, it is necessary to study different time periods to see short-term and long-term effects.

These time periods are characterized by the total precipitation in each month and the preceding months. For example, for SPI-3, the value in March is based on the values in January, February and March. Therefore, for time scales, the analysis is performed by shifting from the initial data to the time scale. In other words, if precipitation values starting from January 1957 are available, the first SPI-3 value can be obtained in March. Thus, 3-month timescales can be used to analyze drought in fast-responding systems such as agriculture, 6-month timescales for seasonal droughts and 12-month timescales for long-term droughts.

2.3 Trend analysis

2.2.1 ITA

The ITA method, first proposed by Şen (2012), was developed to analyze the trends of hydrological time series values. The fact that it does not require any assumptions is the main reason why the ITA method is preferred (Caloiero *et al.* 2018). In the application phase of the ITA method, firstly, the available hydrological data

set is divided into two equal parts according to time series consecutively. These divided time series data are ordered from smallest to largest and marked in the Cartesian coordinate system. The first half time series is placed on the x-axis (X_i), while the second half time series is placed on the y-axis (X_j). Finally, a 1:1 line is drawn and it can be interpreted that if there is a clustering in the upper region of the 1:1 line, there is an increasing trend, if there is a clustering in the lower region, there is a decreasing trend and if there is a clustering on the line, there is no trend (Taşkolu 2023). The degree of trend is determined by the distance from the origin (0,0). The closer to the origin, the lower the degree of trend, and vice versa, the further away from the origin (closer to the extreme region of the 1:1 line), the higher the degree of trend (Şen 2012, Şen 2014).

2.4 Performance evaluation criteria for correlation analysis

Coefficient of determination (R^2) and the root mean square error (RMSE) performance evaluation criteria were used to determine the agreement between SPI and RDI drought indices. R^2, which can be defined as the ratio of the variance of the dependent variable estimated from independent variables, takes the lowest value -∞ and the highest value +1 (Chicco *et al.* 2021). RMSE analyzes the distribution of data around the line of best fit and takes values between 0 and ∞. A value of 0 indicates a state of perfect fit (Gezici and Şengül 2023). The following equations are used to calculate these criteria:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(b_i - b_{ort})^2 - \sum_{i=1}^{n}(b_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(b_i - b_{ort})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(b_i - y_i)^2}{n}} \quad (7)$$

where b_i is the observed value, y_i is the output value, and b_{ort} is the average of observed values.

3. Results and Discussions

3.1 SPI and RDI analysis results based on monthly time series

Drought is an important natural disaster with environmental, economic and social impacts worldwide. It brings many negative consequences such as decreasing water resources, decreasing agricultural productivity, damaging ecosystems, and societies experiencing problems in water supply (Gümüş *et al.* 2016). Therefore, the detection, monitoring and management of drought is of great importance. In this study, comprehensive analyses were conducted using SPI and RDI to examine drought and humidity conditions in Malatya province in detail.

SPI is a widely used method for determining drought and humidity levels by expressing the amount of precipitation in a given period in terms of standard deviation. Analyses at different time scales (SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12 and RDI-3, RDI-6, RDI-9, RDI-12) reveal both short-term and long-term drought trends. RDI provides a more comprehensive analysis with PET data along with precipitation (Vangelis *et al.* 2013). The data obtained with these methods are of great value for water resources management, agricultural planning and climate change adaptation strategies.

The data obtained as a result of the analyzes carried out in the study region reveal the temporal distribution of drought and humidity conditions. In this context, the most humid and driest months obtained in SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12 and RDI-3, RDI-6, RDI-9, RDI-12 scales were determined, and the rates of observations in various drought categories in monthly time series were detailed. SPI and RDI results for 3-6-9-12 months are given in Figure 2 below. According to SPI-3 results, the wettest month was in September 1991 with a value of 2.88. On the other hand, the driest month was observed in July 2014 with a value of -3.62. According to SPI-6 results, the wettest month was recorded in December 1991 with a value of 1.96. The driest month was recorded in August 2012 with a value of -3.06. According to SPI-9 data, the wettest month was recorded in September 1969 with a value of 1.71. The driest month was recorded in June 2014 with a value of -3.05. According to SPI-12 analysis, the wettest month was recorded in October 1988 with a value of 1.54. The driest month was recorded in August 2014 with a value of -2.99. According to RDI-3 results, the wettest month was February 1972 with a value of 5.02. On the other hand, the driest month was observed in July 2014 with a value of -3.52. According to RDI-6 results, the wettest month was recorded in March 1987 with a value of 2.06. The driest month was recorded in May 2014 with a value of -3.00. According to RDI-9 data, the wettest month was June 1993 with a value of 1.72. The driest month was recorded in June 2014 with a value of -3.01. According to RDI-12 analysis, the wettest month was recorded in October 1993 with a value of 1.63. The driest month was recorded in August 2014 with a value of -2.94. During these dry months, decreased crop productivity occurred in the Malatya basin as stated in the study of Sunkar *et al.* (2013). In the study, when 'extremely dry, severely dry, moderately dry and near normal' classes were taken as dry periods, the number of drought events (from 3 to 12 months) decreased as the time scale increased, similar to the results of Yılmaz (2023).

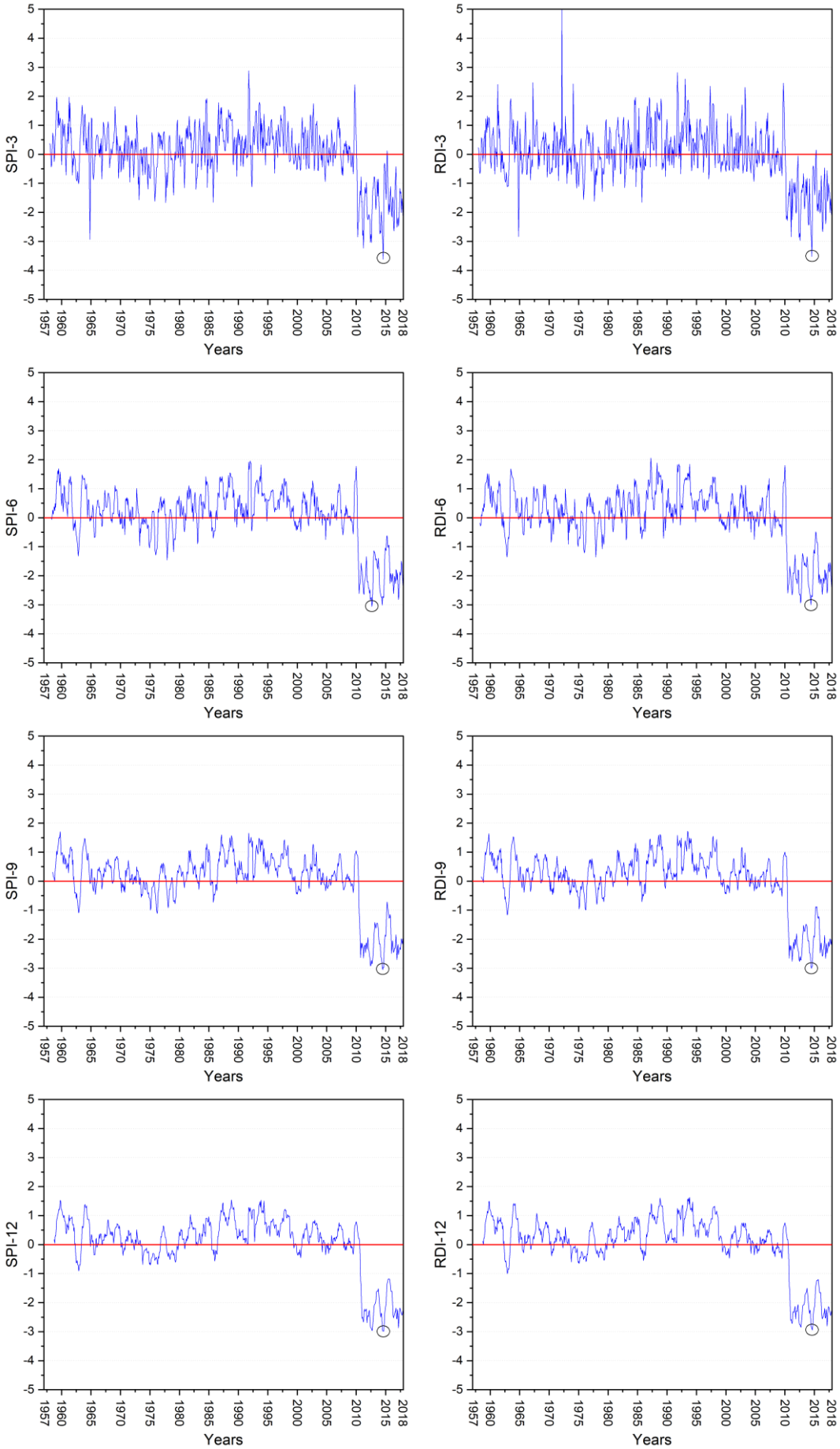


Figure 2. SPI ve RDI comparison of time series of SPI and RDI

According to the results of both indices at all time scales, a dry period started after 2010. This dry period started as a sudden decrease at the end of July 2009 for all time scales. For the drought analysis between 1957-2018, the driest month in all time scales occurred during this dry period. According to Figure 2, the most abrupt transition from wet to dry period occurred during this dry period.

The number of dry periods of 6 months and longer for different time scales according to SPI and RDI values are given in Figure 3.

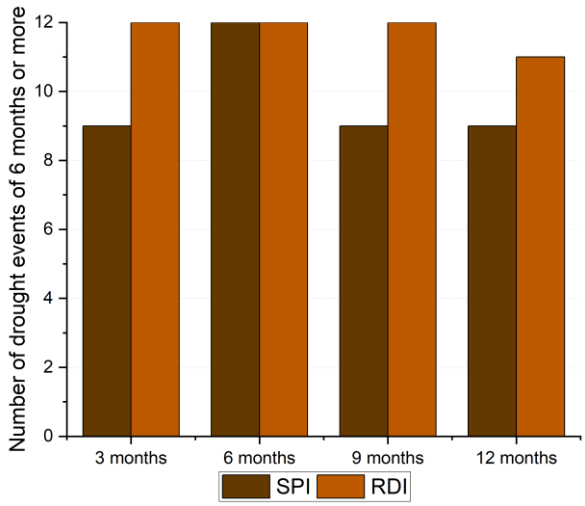


Figure *3.* Number of droughts lasting 6 months or more

As a result of the analysis for SPI 3-6-9-12, the number of consecutive dry periods of 6 months or more was found to be 9-12-9-9, respectively. This situation was again observed as 12-12-12-12-11 for RDI. The main reason for the higher number of long-term dry periods in RDI results is the temperature effect. In their study, Topuz and Karabulut (2020) made a similar statement; they stated that the number of snow-covered days and the number of snowy days decreased in Malatya station, that is, the number of dry periods increased in line with this. In addition, Çelik *et al.* (2018), in their study using the SPI index, stated that drought may pose a significant problem in Malatya according to the trends.

3.2 Analysis results according to drought classes

In line with the results of SPI and RDI methods, drought forecasts for the study region are organized according to 8 different drought classes from extremely dry to extremely wet. Values less than 0 are considered as dry and values greater than 0 are considered as wet. The results obtained are given in Figure 4 below.

In this study, the 'near normal' class is not considered as months with intense drought in order to see the time periods when drought is intense. 'Extremely dry, severely dry and moderately dry' classes are defined as months with intense drought. These months will be referred to as 'dry months' in the rest of the study. In this context according to SPI-3 results, when the monthly time series were analyzed, it was determined that 5.6% of the data were extremely dry, 4.1% were severely dry, 4.7% were moderately dry and 27.1% were close to normal. These data show that 14.4% of the total number of dry months were observed. When the SPI-6 results were analyzed, it was observed that 7.7% of the monthly time series were extremely dry, 3.3% were severely dry, 3.9% were moderately dry and 23.0% were close to normal. These results indicate that there were 14.9% dry months in total. According to the monthly time series for SPI-9 data, 9.0% were extremely dry, 2.8% were severely dry, 2.3% were moderately dry and 23.6% were near normal dry months. These data show that there are 14.1% dry months in total. And according to the SPI-12 analysis, in the monthly time series, 10.3% of extreme dry months, 1.8% of severe dry months, 1.4% of moderate dry months and 21.9% of near-normal dry months were observed. These results show that there are 13.5% dry months in total. Similarly, Başak (2017) determined that the percentage of drought of Malatya station between 1929 and 2014 was below 50% according to the SPI method.

According to the RDI-3 results, when the monthly time series were analyzed, it was determined that 3.8% of the data were extremely dry, 4.0% were severely dry, 5.5% were moderately dry and 36.8% were close to normal. These data show that a total of 13.3% of dry months were observed. When the RDI-6 results were analyzed, it was observed that 7.3% of the monthly time series were extremely dry, 4.5% were severely dry, 2.5% were moderately dry and 25.3% were close to normal. These results reveal that there are 14.3% dry months in total. According to the monthly time series for RDI-9 data, 9.4% were extremely dry, 2.6% were severely dry, 1.8% were moderately dry and 24.7% were near normal dry months. These data show that there are 13.8% dry months in total. And according to the RDI-12 analysis, in the monthly time series, 10.5% of extreme dry months, 1.7% of severe dry months, 1.4% of moderate dry months and 22.3% of near-normal dry months were observed. These results indicate that there is a total of 13.6% dry months. Cebeci *et al.* (2019) classified Malatya province as 'very drought' in their drought analysis for the whole of Turkey. They also stated that the drought index value has increased in recent years.

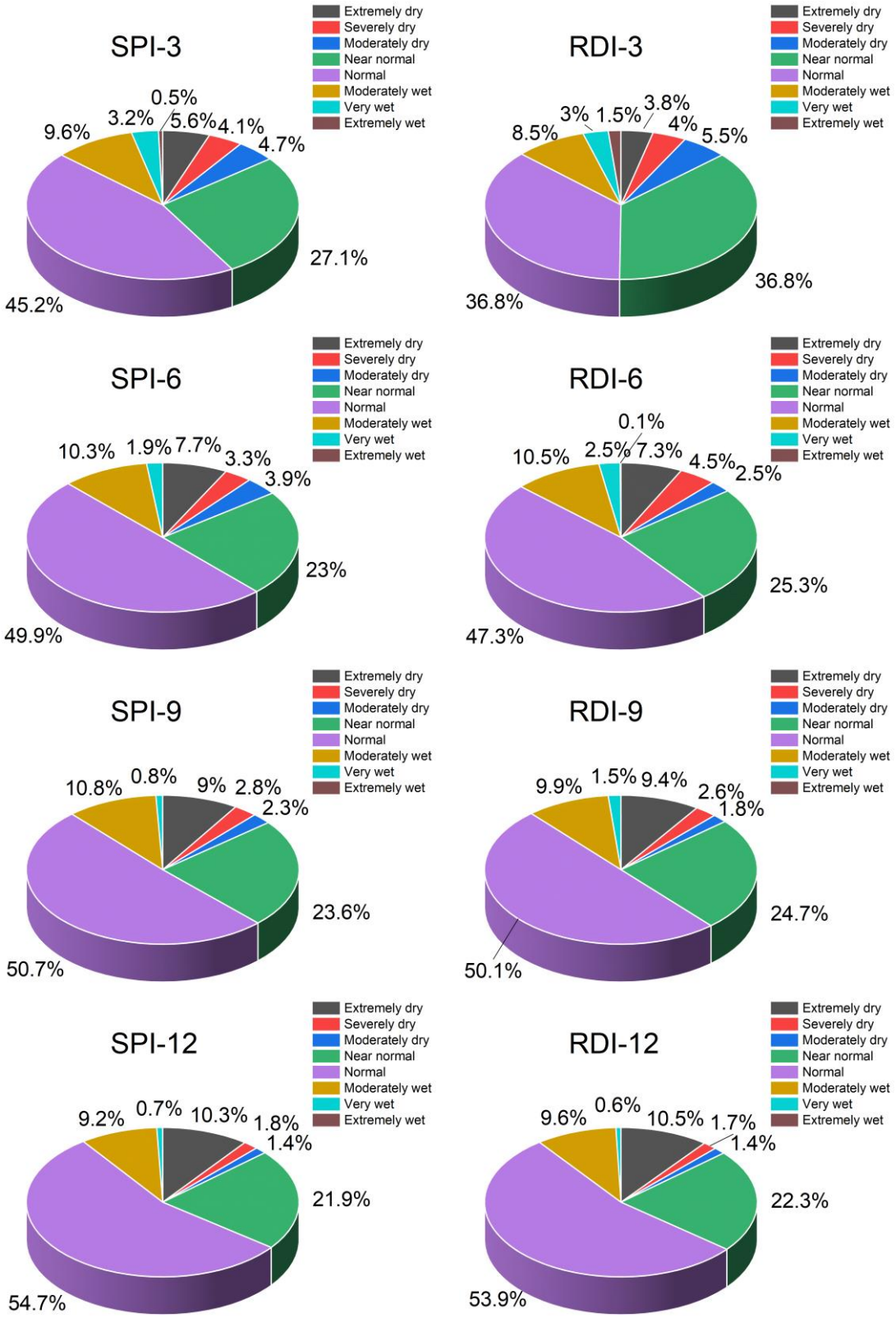


Figure 4. Comparison of SPI and RDI according to drought classes at different time scales

3.4 Correlation analysis

Correlation analysis is a statistical method that determines whether there is a linear relationship between two numerical data and, if so, the direction and severity of this relationship (Özgün *et al.* 2020). In this study, it was used to make sense of the relationship between SPI and RDI. The relationship between SPI and RDI drought values in 3,6,9 and 12-month time series and performance evaluation criterion values are given in Figure 5.

3.4 Results of trend analysis

The two most important parameters in drought analysis studies are precipitation and temperature. Many indices

make analyzes in the light of these parameters. Lack of precipitation leads to a decrease in soil moisture, destruction of ecosystems and many socioeconomic problems. In regions with low precipitation, it is very common that agricultural yields cannot be obtained and irrigation water is depleted. In such cases, not only agricultural damages but also economic problems occur (Deniz 2009). With these negative effects; the water level in rivers, lakes and dams drops below normal and there are difficulties in providing drinking water. At the same time, an increase in temperature can also have negative consequences such as lack of precipitation. Drought is a very common natural disaster in extremely hot regions (Kurnaz 2023). In line with the mentioned negativities; it is very important to make trend analyzes for precipitation and temperature in drought studies. Trend analyses support the analysis of the drought situation of the region by providing information on the trend of the climatic characteristics of the region (Taşkolu 2024). The results of the trend analysis of precipitation and temperature as a result of the station data used in this study are presented in Figure 6.

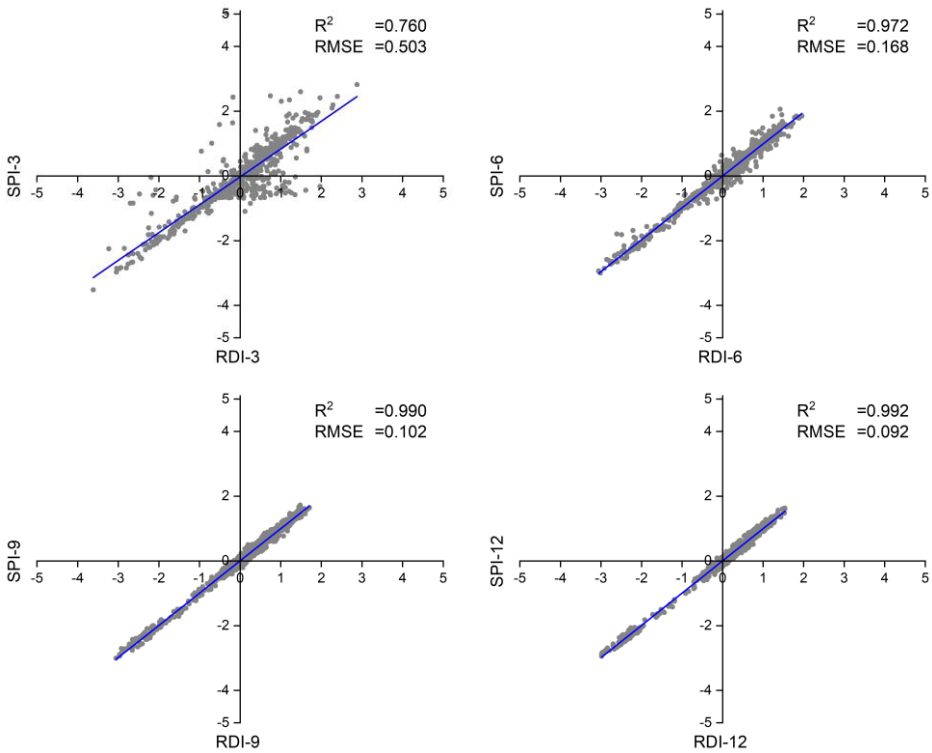


Figure 5. The relationship between SPI and RDI

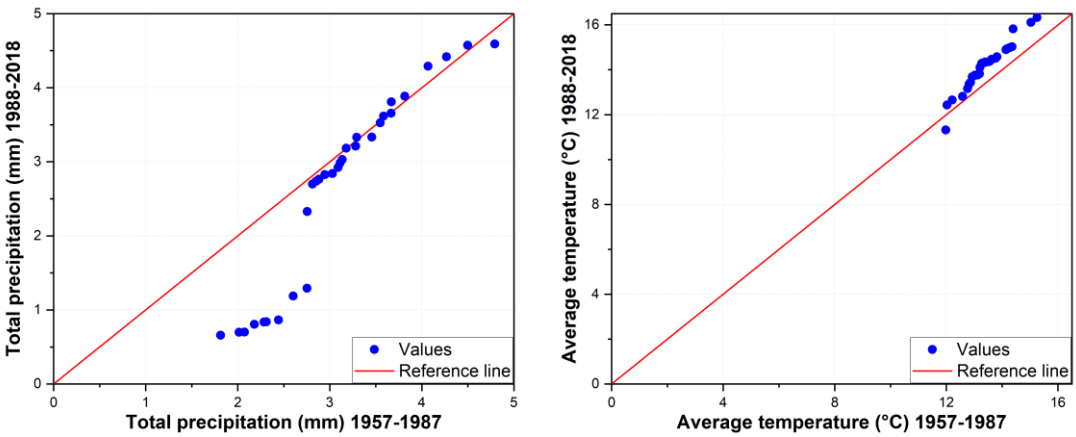


Figure 6. Precipitation and temperature trend according to ITA

When we look at the precipitation trend analysis, the values are clustered in 2 regions in total, above the 1:1 line and in the lower triangular area. This clearly shows that there is a decreasing trend. In the temperature trend analysis, on the contrary, there is a clustering in the upper triangular area. The fact that this clustering is the farthest from the point (0,0) indicates that there is a high increasing trend. This region, where precipitation

decreases and temperature increases, faces a serious drought threat. In parallel with the studies of Çelik *et al.* (2018), an increasing drought trend was detected in Malatya province with increasing temperature. In addition, Avcı and Esen (2019), in their study for Malatya station, stated that similar to the current study, precipitation has a decreasing trend and temperature has an increasing trend. Similarly, Keskin *et al.* (2018) reported a decrease in the annual average of precipitation trends and an increase in the annual average of temperature trends for Malatya province. Finally, Keskin and Saplıoğlu (2023) investigated the temperature trends of the Eastern Anatolia Region and found that the temperature in Malatya province is in an increasing trend.

4. Conclusions

In this study, drought values at different time periods (3-6-9-12 months) were analyzed using SPI and RDI, which examines the effect of precipitation deficiency and temperature increase on soil moisture, reservoirs and natural lakes. Then trend analyses were made with precipitation and temperature data sets. The data sets of the Malatya province station, which is the study region, between 1957-2018 were used.

As a result of the analyzes obtained; except for the 3-month RDI (RDI-3), Malatya province station region is in the humid class in total percentage for both methods and for each period. However, if we look at the results of ITA; with increasing temperature and decreasing precipitation values, there is a strong possibility that the region will be in the drought class as a total percentage for both methods and time periods in a short time.

Although the fact that the region is in the humid class in total percentage does not mean that there is no drought, the fact that approximately one of the 2 months is dry is a serious threat for the region. When we look at the SPI 3-6-9-12 monthly values, 14.4%, 14.9%, 14.1%, 13.5% had a dry period, respectively. When we look at the values of RDI 3-6-9-12 months, 13.3%, 14.3%, 13.8%, 13.6% had a dry period, respectively. The small differences between these indices, which are close to each other, are due to the fact that the RDI method uses PET data together with precipitation. Such large percentages of aridity have negative consequences in many areas such as access to drinking water for the local people, the variety of crops in agriculture and access to water used in industry. In line with the results of SPI and RDI analysis, the lowest drought values in 2012-2014 are the main reason for the low crop quality and difficulties in drinking water supply during that period.

The positive correspondence between SPI and RDI values is highest in the 12-month time interval. In this context, it is seen that the relationship between the two indices increases as the time interval increases.

Trend analysis using ITA showed a generally decreasing trend in precipitation data and an increasing trend in temperature data. This finding indicates that long-term water management and agricultural planning studies in Malatya province should take into account the impacts of climate change. The decreasing trend in precipitation poses potential threats to the sustainability of water resources in the region, and it is necessary to re-evaluate water management policies and develop climate change adaptation strategies.

This study constitutes an important step in terms of analyzing long-term data and identifying climatic trends. These findings, which are a basic reference for future research, will contribute to a better understanding of the impacts of climate change at local scales. In this context, conducting similar analyses with the data of other meteorological stations in the region will enable the development of more comprehensive climate strategies at regional and national scales.

Declaration of Ethical Standards
The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement
Author 1: Conceptualization, Methodology / Study design, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Writing – original draft
Author 2: Writing – review and editing, Supervision
Author 3: Conceptualization, Methodology / Study design, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Writing – original draft, Writing – review and editing, Visualization, Supervision

Declaration of Competing Interest
The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data Availability
The meteorological dataset from The Turkish Meteorology General Directorate is not available to the public. Accessible only through submission of an application by scientific researchers.

5. References

Addi, M., Asare, K., Fosuhene, S. K., Ansah-Narh, T., Aidoo, K. and Botchway, C. G., 2021. Impact of large-scale climate indices on meteorological drought of coastal Ghana. *Advances in Meteorology*, 2021, 1-17. https://doi.org/10.1155/2021/8899645

Ansarifard, S. and Shamsnia, S. A., 2018. Monitoring drought by reconnaissance drought index (RDI) and standardized precipitation index (SPI) using DrinC software. *Water Utility J*, **20**, 29-35.

Başak, A., 2017. Aşağı fırat havzasında bulunan beş ilin kuraklık analizi ve kuraklık indisinin yapay sinir ağları ile tahmini (Yüksek lisans tezi), Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 153.

Caloiero, T., Coscarelli, R. and Ferrari, E., 2018. Application of the innovative trend analysis method for the trend analysis of rainfall anomalies in southern Italy. *Water Resources Management,* **32**, 4971-4983. https://doi.org/10.1007/s11269-018-2117-z

Cebeci, İ., Demirkıran, O., Doğan, O., Sezer, K. K., Öztürk, Ö., and Elbaşı, F., 2019. Türkiye'nin iller bazında kuraklık değerlendirmesi. *Toprak Su Dergisi*, 169-176. https://doi.org/10.21657/topraksu.655613

Çelik, M. A., Kopar, İ. and Bayram, H., 2018. Doğu Anadolu Bölgesi'nin mevsimlik kuraklık analizi. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, **22(3)**, 1741-1761.

Çelik, M. Ö. and Yakar, M., 2024. Mersin'in Farklı Kuraklık İndeksleri Aracılığıyla Kuraklık Tehdidinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **24(1),** 71-84. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1331753

Chicco, D., Warrens, M. J. and Jurman, G., 2021. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj computer science*, **7**, e623. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623

Çırağ, B. and Fırat, M., 2022. Taşkın Yayılım Haritalarında Arazi Kullanım Türü Ve Yüzeysel Akış Etkilerinin Değerlendirilmesi: Malatya İli Örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **25(3),** 222-236. https://doi.org/10.17780/ksujes.1094321

Çirağ, B. and Firat, M., 2023. Two-dimensional (2D) flood analysis and calibration of stormwater drainage systems using geographic information systems. *Water Science & Technology*, **87(10),** 2577-2596. https://doi.org/10.2166/wst.2023.126

Dehghani, F., Khalili, D., Zand-Parsa, S. and Kamgar-Haghighi, A. A., 2022. Influence of climatic variability on detected drought spatio/temporal variability and characteristics by SPI and RDI. Iranian Journal of Science and Technology, *Transactions of Civil Engineering*, **46(4),** 3369-3385. https://doi.org/10.1007/s40996-022-00879-w

Deniz, D., 2009. Türkiye'deki Kuraklığın Standart Yağış İndeksi (SPI) ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale,106.

Esen, F., and Avcı, V., 2019. MALATYA HAVZASI'NDA SICAKLIK VE YAĞIŞIN TREND ANALİZİ. *İnönü Üniversitesi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi,* 8(1), 230-246.

Gezici, K. and Şengül, S., 2023. Estimation and analysis of missing temperature data in high altitude and snow-dominated regions using various machine learning methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, **195(4),** 517. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11143-7

Gezici, K., Katipoğlu, O. M. and Şengül, S., 2024. Hybrid machine learning models for groundwater level prediction in a snow-dominated region: An evaluation of EEMD, VMD and EWT decomposition techniques. *Hydrological Processes*, **38(5),** e15169. https://doi.org/10.1002/hyp.15169

Gümüş, V., Başak, A. and Oruç, N., 2016. Standartlaştırılmış yağış indeksi (SYİ) yöntemi ile Şanlıurfa istasyonunun kuraklık analizi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, **1(1),** 36-44.

Hobbins, M. T., Dai, A., Roderick, M. L. and Farquhar, G. D., 2008. Revisiting the parameterization of potential evaporation as a driver of long-term water balance trends. *Geophysical Research Letters*, **35(12).** https://doi.org/10.1029/2008GL033840

Katipoğlu, O. M., Acar, R. and Şengül, S., 2020. Comparison of meteorological indices for drought monitoring and evaluating: a case study from Euphrates basin, Turkey. *Journal of Water and Climate Change*, **11(S1),** 29-43. https://doi.org/10.2166/wcc.2020.171

Katipoğlu, O. M., Acar, R. and Şenocak, S., 2021. Spatio-temporal analysis of meteorological and hydrological droughts in the Euphrates Basin, Turkey. *Water Supply*, **21(4),** 1657-1673. https://doi.org/10.2166/ws.2021.019

Kchouk, S., Melsen, L. A., Walker, D. W. and Van Oel, P. R., 2022. A geography of drought indices: mismatch between indicators of drought and its impacts on water and food securities. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **22(2),** 323-344. https://doi.org/10.5194/nhess-22-323-2022

Keskin, M. E., and Saplıoğlu, K., 2023. Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesindeki Sıcaklık Eğilimlerinin Yenilikçi Trend Analizi ve Mann-Kendall ile Belirlenmesi. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, **5(1),** 1-16. https://doi.org/10.60093/jiciviltech.1487245

Keskin, M. E., Çakto, İ., Çetin, V., and Bektaş, O., 2018. DOĞU ANADOLU BÖLGESİ SICAKLIK VE YAĞIŞ TREND ANALİZİ. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi,* **6(2),** 294-300. https://doi.org/10.21923/jesd.397353

Kurnaz, M. L., 2023. İklim Değişikliği ve Uyum Süreçlerinde Türkiye. *Resilience*, **7(1),** 199-208.

https://doi.org/10.32569/resilience.1312684

Liu, C., Yang, C., Yang, Q. and Wang, J., 2021. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, **11(1),** 1280. https://doi.org/10.1038/s41598-020-80527-3

McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* **17,** 22, 179-183.

Mehran, A., Mazdiyasni, O. and AghaKouchak, A., 2015. A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: Linking climate variability, local resilience, and demand. Journal of Geophysical Research: *Atmospheres*, **120(15),** 7520-7533. https://doi.org/10.1002/2015JD023147

Mohammed, Y. and Yimam, A., 2021. Analysis of meteorological droughts in the Lake's Region of Ethiopian Rift Valley using reconnaissance drought index (RDI). *Geoenvironmental Disasters*, **8(1),** 13. https://doi.org/10.1186/s40677-021-00183-1

Özfidaner, M., and Topaloğlu, F., 2020. Standart yağış indeksi yöntemi ile güneydoğu anadolu bölgesinde kuraklık analizi. *Toprak Su Dergisi*, 9(2), 130-136. https://doi.org/10.21657/topraksu.767002

Özgün, G., Vaheddoost, B. and Aras, E., 2020. Standart yağış indeksi (SPI) metodu kullanılarak kuraklık analizi ve Bursa Doğancı Barajı ile ilişkilendirilmesi. *Academic Perspective Procedia*, **3(2),** 876-885. https://doi.org/10.33793/acperpro.03.02.23

Şen, Z., 2012. Innovative trend analysis methodology. *Journal of Hydrologic Engineering*, **17(9),** 1042-1046. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000556

Şen, Z., 2014. Trend identification simulation and application. *Journal of Hydrologic Engineering*, **19(3),** 635-642. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000811

Şener, E., 2021. Standartlaştırılmış yağış indeksi ile kuraklık indekslerinin eğilim analizi: Akşehir Örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **21(6),** 1470-1484. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1005703

Sunkar, M., Hatun, Ü. and Toprak, A., 2013. Malatya havzası ve çevresinde iklim özelliklerinin meyveciliğe etkisi. *In 3rd International Geography Symposium* 566-574.

Taşkolu, İ., 2023. Güneydoğu Anadolu Bölgesi için kuraklık analizi (Yüksek lisans tezi), Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 155.

Taşkolu, İ., Acar, R., and Çırağ, B., 2024. Trend Analysis of Precipitation and Temperatures in the Black Sea Region Using the Innovative Trend Analysis. *Journal of Studies in Advanced Technologies*, **2(2),** 74-82. https://doi.org/10.63063/jsat.1505540

Taşkolu, İ., and Güngör, M., 2025. Kuraklık analizi ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi örneği. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. Erken erişim.

Taylan, D., and Bahşi, A. M., 2021. Gaziantep ili meteorolojik kuraklık analizi ve KAS ilişkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(2), 371-382. https://doi.org/10.19113/sdufenbed.868780

Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94. https://doi.org/10.2307/210739

Tirivarombo, S. O. D. E., Osupile, D. and Eliasson, P., 2018. Drought monitoring and analysis: standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardised precipitation index (SPI). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,* **106**, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.07.001

Topçu, E., 2022. Appraisal of seasonal drought characteristics in Turkey during 1925–2016 with the standardized precipitation index and copula approach. *Natural Hazards*, **112(1),** 697-723. https://doi.org/10.1007/s11069-021-05201-x

Topçu, E. and Seçkin, N., 2022. Drought assessment using the reconnaissance drought index (RDI): A case study of Eastern Mediterranean, Seyhan, Ceyhan, and Asi basins of Turkey. *Journal of Engineering Research*, **10(2B).** https://doi.org/10.36909/jer.12113

Topuz, M. and Karabulut, M., 2021. Doğu Anadolu Bölgesinde kar örtülü gün ve kar yağışlı günler sayısının eğilim analizi (1970-2020). *Doğu Coğrafya Dergisi,* **26(46),** 1-24. https://doi.org/10.17295/ataunidcd.928393

Tsakiris, G. and Vangelis, H. J. E. W., 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, **9(10),** 3-11.

Vangelis, H., Tigkas, D. and Tsakiris, G., 2013. The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation. *Journal of Dry Environments*, **88**, 130-140. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.07.020

Wilhite, D. A. and Glantz, M. H., 1985. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, **10(3),** 111-120.

Wilhite, D.A., 2005. Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues (1st ed.). *CRC Press.* https://doi.org/10.1201/9781420028386

Xu, L., Chen, N., Yang, C., Zhang, C. and Yu, H., 2021. A parametric multivariate drought index for drought monitoring and assessment under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, **310**, 108657. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108657

Xu, L., Chen, N., Zhang, X. and Chen, Z., 2019. Spatiotemporal changes in China's terrestrial water storage from GRACE satellites and its possible drivers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres,* **124(22),** 11976-11993. https://doi.org/10.1029/2019JD031147

Yılmaz, M. U., 2023. Keşif kuraklık indeksi ve standartlaştırılmış yağış indeksi kullanılarak kırklareli ilinde kuraklığın eğilimi ve zamansal değişkenliği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi,* **9(2),** 341-364. https://doi.org/10.21324/dacd.1296428

Zarch, M. A. A., Sivakumar, B. and Sharma, A., 2015. Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of Hydrology,* **526**, 183-195. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.071

Zhang, Y., Hao, Z., Feng, S., Zhang, X., Xu, Y. and Hao, F., 2021. Agricultural drought prediction in China based on drought propagation and large-scale drivers. Agricultural *Water Management,* **255,** 107028. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107028

Internet References

1-MGM., İllere ait genel istatistik verileri. https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A (28.05.2024)

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1499440
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035701 (647-657)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035701 (647-657)

Sulu Çözeltilerden Amoksisilin Adsorpsiyonuna Yönelik Amin Fonksiyonel Silika Aerojel Sentezi ve Karakterizasyonu

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 11.06.2024
Kabul/Accepted: 05.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Synthesis and Characterization of Amine Functional Silica Aerogel for Adsorption of Amoxicillin from Aqueous Solutions

Selay SERT ÇOK*

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir- Türkiye

Öz

Son yıllarda kontrolsüz antibiyotik salınımının neden olduğu su kirliliği sucul yaşam için ciddi bir tehdit haline geldiğinden, bu çalışmada, yüksek eko toksisiteye sahip β-lactam sınıfı bir antibiyotik olan amoksisilin moleküllerini sudan uzaklaştırmak için amin işlevsel silika aerojel bir adsorban geliştirilmiştir. Geliştirilen adsorban maliyet ve enerji yoğun sentez yöntemleri kullanılmadan, herhangi bir katalizör ilavesi olmaksızın, tek-aşamalı basit bir sol-jel yöntemiyle ortam koşullarında üretilmiştir. Aerojelin amin işlevselliği üç fonksiyonlu bir aminosilan olan 3-Aminopropiltrimetoksisilan'ın sol-jel sistemine eş-jelleşme yaklaşımı izlenerek dahil edilmesiyle sağlanmıştır. Sentezlenen aerojelin fizikokimyasal ve mikroyapısal özellikleri IR-spektrofotometri, taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve N_2 porozimetre analizleri ile açığa çıkarılmıştır. Karakterizasyon bulguları silika yüzeyindeki amin işlevselliğini kanıtlamış ve üretilen aerojelin son derece düşük yoğunluğa (ρ=0.17 g/cm^3), yüksek gözenekliliğe (ϕ=88%) ve gelişmiş bir mezogözenekli yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Aerojelin adsorpsiyon özellikleri kesikli-sorpsiyon deneyleriyle incelenmiştir. Sonuçlar denge ve kinetik verilerin sırasıyla Langmuir ve sözde-ikinci mertebe kinetik modellerine uygunluk gösterdiğini doğrulamıştır. Optimum işletme koşullarda (C_i=100 ppm, m_{ads}/V_{soln}=1, pH=6) denge kapasitesi 55.7 mg/g olarak kaydedilmiştir. Sentezlenen aerojel aynı zamanda en az beş döngü boyunca tekrarlanabilir kullanıma uygunluk göstermiştir. Gelişmiş silika ağ yapısının eşlik ettiği zengin amin fonksiyonelliği, üretilen adsorbanın rekabetçi bir adsorpsiyon performansına sahip olmasını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: *Amin fonksiyonel silika aerojel; Sol-jel; Adsorpsiyon; Antibiyotik giderimi; Amoksisilin.*

Abstract

Since water pollution caused by uncontrolled antibiotic release has become a serious threat to aquatic life in recent years, in this study, an amine-functional silica aerogel adsorbent was developed to remove amoxicillin molecules, a β-lactam class antibiotic with high ecotoxicity, from water. The developed adsorbent was synthesized under ambient conditions by a simple one-step sol-gel method without using costly and energy-intensive synthesis methods and without any catalyst addition. The amine functionality of the aerogel was achieved by incorporating 3-Aminopropyltrimethoxysilane, a trifunctional aminosilane, into the sol-gel system following a co-gelation approach. The physicochemical and microstructural properties of the aerogel were revealed by IR-spectrophotometry, scanning electron microscopy and N_2 porosimetry analyses. Characterization findings proved the amine functionality on the silica surface and showed that the produced aerogel had extremely low density (ρ=0.17 g/cm^3), high porosity (ϕ=88%) and a well-developed mesoporous structure. The adsorption properties of the aerogel were investigated by batch-sorption experiments. The results confirmed that the equilibrium and kinetic data fit the Langmuir and pseudo-second-order kinetic models, respectively. Under optimum operating conditions (C_i=100 ppm, m_{ads}/V_{soln}=1, pH=6) the equilibrium capacity was recorded as 55.7 mg/g. The synthesized aerogel also demonstrated good regenerative properties for at least five cycles.

Keywords: *Amine functional silica aerogel; Sol-gel; Adsorption; Antibiotic removal; Amoxicillin.*

1. Giriş

Antibiyotikler, insanlarda ve hayvanlarda viral, mikrobiyal enfeksiyon semptomlarını tedavi etmek için yaygın olarak kullanılan farmasötik bileşiklerdir. Artan küresel nüfus ile tıbbi ve veterinerlik uygulamalarında antibiyotik kullanımındaki yoğun artış ve bu bileşenlerin tam metabolize edilememesi çevre suyunda giderek artan bir antibiyotik kirliliğine sebep olmaktadır (Biswal ve Balasubraminian 2022). Antibiyotiklerin kararlı yapıları su kütlelerinde biyolojik birikime neden olur ve düşük derişimlerde bile olsa antibiyotiklere uzun süreli maruziyet, halk sağlığını ciddi şekilde tehdit eden antibiyotiğe dirençli viral veya bakteriyel genlerin (ARG) oluşmasına neden olabilir (Yu vs 2021). Dünya Sağlık Örgütü, ARG'lerin oluşumunu bu yüzyılın en önemli halk sağlığı sorunlarından biri olarak kabul etmiştir. Buna

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Selay SERT ÇOK e-posta/e-mail: selay.sert@ege.edu.tr

sebep olan makrolid, penisilin, tetrasiklin ve kinolon antibiyotik grupları yeni çevresel kirleticiler (emerging pollutants) olarak atfedilmektedirler (Kovalakova vd. 2020). Amoksisilin birçok enfeksiyonun tedavisinde sıklıkla kullanılan beta-laktam ailesine ait penisilin grubu bir antibiyotiktir (Moussavi vd. 2013; de Franco vd. 2017). Penisilin sınıfı ve aminopenisilin altsınıfına ait bu yarı sentetik antibiyotik, anhidrit, sodyum ve trihidrat olmak üzere üç farklı formda bulunur. Amoksisilin, suda, etanol veya metanolde düşük çözünürlüğe sahipken, hidroksit alkali çözeltilerde yüksek çözünürlüğe sahiptir. Erime noktası 194°C'dir ve üç adet fonksiyonel grubundan kaynaklanan üç ayrışma sabitine (pKa_1: 2,4 (karboksilik asit), pKa_2: 7,4 (amin) ve pKa_3: 9,6 (fenol)) sahiptir (de Marco et al., 2017).

Ekosistemlerde biyolojik birikimin önlenmesi açısından ortadan kaldırılması yüksek öncelikli sınıfa ait olan bu farmasötik kirleticinin sulu ortamlardan giderimine yönelik ileri oksidasyon, membran ayırma, foto-katalitik bozunma, iyon değişimi ve adsorpsiyon gibi birçok arıtma yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler arasından adsorpsiyon, daha az atık oluşumu hem kesikli hem de sürekli arıtma yöntemlerine uygunluk, düşük kirletici konsantrasyon seviyelerinde uygulanabilirlik, rejenerasyon ve yeniden kullanım imkânı, işletme kolaylığı ve düşük sermaye ve işletim maliyeti gibi farklı avantajları sebebiyle öne çıkmaktadır (Güzel vd. 2021). Bugüne kadar antibiyotik adsorpsiyonu için karbon bazlı malzemeler, polimerler ve reçineler, metal-organik çerçeveler, killer ve mineraller gibi çeşitli adsorbanlar araştırılmıştır (Lu vd. 2020). Bununla birlikte, bu adsorbanların nispeten yüksek fiyat, kolay polimerizasyon ve ikincil kirlilik gibi dezavantajları, alternatif adsorbanlar araştırılmasını gerekli kılmaktadır (Yu vd. 2021).

Günümüzde olağanüstü nano gözenekli yapıları ile silika aerojeller, çeşitli kirleticilerin sudan etkin bir şekilde uzaklaştırılması işlemlerinde adsorban olarak büyük bir ilgi görmektedir (Ganesamoorthy vd. 2021). Silika aerojellerin sahip oldukları gelişmiş açık gözenekli ağ yapısı, uyarlanabilir yüzey özellikleri ve kontrol edilebilir hidrofobiklikleri bu malzemeleri atık su arıtımı uygulamalarında eşsiz bir aday haline getirmiştir (Abedpour vd. 2023). Silika aerojellerin şimdiye kadar, atık sulardan yağ ve organik çözücü, boya, ağır metal giderimi gibi birçok çevresel ıslah uygulamasında adsorban malzeme olarak etkinliği kanıtlanmış olsa da bu malzemelerin sulu çözeltilerden antibiyotik, özellikle amoksisilin, giderim performanslarını araştıran çalışmalar oldukça nadirdir. Var olan sınırlı çalışmalar ise amorf silika yapılarından ziyade düzenli gözenekli silika nanoparçacıkların kullanıldığı adsorpsiyon süreçleri üzerinedir (Elnazer vd. 2024). Halbuki silika aerojellerin farklı boyut aralıklarında gözenekler içeren gelişmiş nanoyapıları ve hedefe özgü işlevselleştirilebilme özellikleri onları sulu çözeltilerden amoksisilin gideriminde umut vadeden adsorbanlar haline getirmektedir. Sol-jel kimyasının çok yönlülüğü sayesinde silika yüzeyi ile hedef kirletici molekül arasındaki etkileşimler, farklı yüzey fonksiyonel gruplarının eklenmesiyle geliştirilebilir.

Amin fonksiyonel grubunun sahip olduğu yüksek nükleofil yapı ve kompleks oluşturabilme yeteneği, organik grupların adsorpsiyonunda bu yapılara yüksek adsorpsiyon yeteneği kazandırmaktadır (Cashin et al., 2018; Da'na, 2017; Fujiki et al., 2015; Khan Rind et al., 2024; Naseer, 2024). Bu nedenle adsorpsiyon temelli ayırma uygulamalarında, silika aerojellere amin fonksiyonel gruplarının ilavesi, geniş çapta araştırılmış ve birçok organik maddenin (örn. organik) boyalar, fenolik bileşikler) ve inorganik kirleticiler (örneğin ağır metaller) gideriminde etkinliği kanıtlanmış bir yöntemdir (Barczak 2019). Buna karşın, amin fonksiyonlu silika adsorbanların ilaç veya biyomolekülleri adsorplama yeteneği literatürde yeterince değerlendirilmemiştir. Amin modifiyeli silika yapılarının antibiyotik gideriminde, özellikle amoksisilin grubu antibiyotiklerin gideriminde kullanıldığı çalışmalar ise yok denecek kadar azdır. Lu ve ark. küresel düzenli gözenekli MCM-41 silika adsorbanı diamin içerikli yapılarla işlevselleştirmiş ve bu adsorbanın siprofloksasin tipi antibiyotik gideriminde kullanımını incelemiştir. Elde edilen sonuçlar amin işlevselliğin modifiye edilmemiş silika adsorbana göre antibiyotik tutma kapasitesini iki kat arttırdığını (q_{max}= 139 mg/g) göstermiştir (Lu vd. 2020). Başka bir çalışmada ise Rumman ve ark. yine MCM-41 tipi mezogözenekli silika tutucularda amin işlevselliğinin siprofloksasin adsorpsiyon performansına etkisini incelemiş ve silikalara sentezden sonra kimyasal aşılama yoluyla amin gruplarının ilavesiyle elde edilen malzemenin maksimum adsorpsiyon kapasitesini 164 mg/g olarak kaydetmişlerdir (Abu Rumman vd. 2021). Yeni bir çalışmada ise Mohseni-Bandpei ve ark. ponzataşından türetilmiş silika aerojel nanomalzemelerinde sentez sonrası amin aşılamasının sefiksim türü antibiyotiklerin giderimindeki etkisini kesikli ve sürekli deneylerle araştırmış ve amin aşılanmış adsorbanların denge adsorpsiyon kapasitesini kesikli sistemde 19 mg/g ve sürekli sistemde 27 mg/g olarak raporlamışladır (Mohseni-Bandpei vd. 2023). Aynı yazarlar başka bir çalışmalarında ise yine ponzataşı türevli silika aerojellere sentez sonrası amin aşılaması yaparak elde edilen tutucunun ibuprofen giderimine etkisini incelemiş ve optimum adsorpsiyon koşullarında

malzemenin maksimum adsorpsiyon kapasitesini 39 mg/g olarak bulmuşlardır (Mohseni-Bandpei vd. 2020). Sözü edilen tüm çalışmalarda silika yüzeyine amin işlevselliğin ilavesi sentez sonrası kimyasal aşılama yoluyla gerçekleştirilmiştir. Sentez sonrası aşılama yaklaşımı literatürde sıklıkla kullanılan bir yöntem olsa da genellikle düşük işlevsellik derecesi, yoğun çözgen kullanımı, meşakkatli ve zaman alıcı yıkama adımları gibi dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Öte yandan amin içerikli silanların silika aerojel yapısına sentez sırasında ilave edildiği eş-jelleşme yaklaşımı, seçilen organosilanların silika iskeletine sol-jel reaksiyonları sırasında bağlanması sayesinde yüksek fonksiyonellik imkanı sunan ve zaman-maliyet etkin bir yöntemdir.

Gerçekleştirilen bu çalışma, sulu ortamdan adsorpsiyon yoluyla amoksisilin giderimine yönelik amin fonksiyonel silika aerojel adsorbanların geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda silika temelli aerojel, geleneksel bir silika başlatıcısı olan tetraetilortosilikat ile amin fonksiyonel bir silan olan 3-aminopropiltrietoksisilan ve metil fonksiyonel bir diğer organosilan olan metiltrimetoksisilan'ın birlikte jelleştirilmesi yoluyla, tek-adımlı basit bir sol-jel stratejisi izlenerek ortam koşullarında sentezlenmiştir. Sentezlenen aerojelin fizikokimyasal ve morfolojik özellikleri IR spektrofotometrisi, taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve nitrojen porozimetrisi analizleriyle karakterize edilmiştir. Üretilen malzemenin sulu çözeltilerden amoksisilin tipi antibiyotik gideriminde kullanımı kesikli adsorpsiyon kinetik ve denge deneyleriyle incelenmiştir. Kirletici başlangıç derişimi, adsorban dozajı ve çözelti pH'ı ve temas süresi gibi çeşitli çalışma parametreleri altında hazırlanan aerojelin amoksisilin giderim verimi ve tutma kapasitesi araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. *Materyal*

Çalışmada silika başlatıcı olarak tetraetilortosilikat (TEOS, %99), metiltrimetoksisilan (MTMS, 95%) ve 3-aminopropiltrietoksisilan (APTES, 98%), çözgen olarak ise etanol, n-hekzan ve deiyonize su kullanılmıştır. Hedef kirletici olarak (2S,5R,6R)-6-{[(2R)-2-Amino-2-(4-hidroksifenil)asetil]amino}-3,3-dimetil7-okso-4-tiya-1-azabisiklo [3.2.0]heptan-2-karboksilik asit (Amoksisilin, %98) antibiyotik seçilmiştir. Tüm kimyasallar Merck'ten temin edildi ve ek saflaştırma yapılmadan kullanılmıştır.

2.2. *Metot*

Tipik adsorban sentezinde APTES ortam koşullarında etanol ve su varlığında 16 saat boyunca herhangi bir katalizör ilavesi olmaksızın hidrolize edilmiş, daha sonra karışıma TEOS eklenerek elde edilen sol 30 dk daha karıştırılmıştır. Çözelti içerisinde APTES/TEOS molar oranı 3/7 olarak ayarlanmış, karışımdaki toplam Si miktarının toplam çözgen miktarına molar oranı ise toplam Si/EtOH/H_2O = 1/16/10 olarak belirlenmiştir. TEOS ilavesinden sonra çözelti pH'ı 7 olarak kaydedilmiş ve karışım ortamda jelleşmeye bırakılmıştır. Bir saat içerisinde örnek tamamen jelleşmiştir. Jelleşmeden sonra ıslak jel bir gün boyunca kendi kabında yaşlandırmaya bırakılmış, yaşlandırılan jel 24 saatlik periyodlarla iki kez hekzanla yıkanmıştır. Son adım olarak ıslak jel gece boyunca 80°C'lik etüvde kurutulmuştur.

2.3 *Karakterizasyon*

Potansiyel bir adsorbanın gözenek ve yüzey özellikleri o malzemenin adsorplama yeteneği üzerinde belirleyici faktörler olduğundan, sentezlenen aerojel kimyasal, morfolojik yapı ve gözenek özelliklerini açısından karakterize edilmiştir. Üretilen aerojelin yığın yoğunluğu (ρ_b) kurutma işleminden sonra elde edilen kütle-hacim oranlarından hesaplanmış ve buna karşılık gelen gözeneklilik değeri Denklem.1 kullanılarak bulunmuştur:

$$\%\,Gözeneklilik = \left(1 - {}^{\rho_b}/_{\rho_s}\right) \times 100 \qquad (1)$$

Bu denklemde ρ_s silika iskeletinin yoğunluğunu temsil eder ve bu çalışmada olduğu gibi amin modifiye edilmiş silika omurgası için, değeri literatüre uygun olarak 2.30 g/cm^3 olarak alınmıştır (Li et al., 2020). Malzemenin kimyasal yapılanması PERKIN ELMER Spectrum-100 FTIR spektrofotometresinde 500-4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında incelenmiştir. Aerojelin morfolojik özellikleri SEM analizi ile açığa çıkarılmıştır. Analiz düşük vakum altında 7,5 kV hızlanma voltajıyla çalışan Thermo Scientific Apreo S (Thermo Fisher Scientific, ABD) cihazında gerçekleştirilmiştir ve mikrograflar 100000 büyütme oranında elde edilmiştir. Üretilen malzemenin gözenek özellikleri ise Quantachrome Autosorb-6 gözenek analiz cihazı kullanılarak N_2 adsorpsiyonu yoluyla analiz edilmiştir. Ölçümlerden önce üretilen aerojel 120°C'de 12 saat süreyle vakum altında gaz giderim işlemine tutulmuş ve adsorpsiyon-desorpsiyon izotermleri 77 K'de elde edilmiştir. Aerojelin görünür yüzey alanı, toplam gözenek hacmi, mikro gözenek hacmi ve ortalama gözenek çapı gibi gözenek parametreleri, Brunauer–Emmett–Teller (BET), Barrett–Joyner–Halenda (BJH) ve Dubinin-Radushkevich yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir.

2.4. *Adsorpsiyon Çalışmaları*

Sentezlenen amin modifiyeli aerojelin amoksisilin kirleticisi üzerindeki denge ve kinetik adsorpsiyon davranışını aydınlatmak için bir dizi kesikli adsorpsiyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Tipik bir kesikli denge

deneyinde, değişen başlangıç derişimlerine (5-125 ppm) sahip belirli miktarda adsorban ve amoksisilin çözeltisi, 50 ml'lik bir erlenmeyer kullanılarak ortam koşulları altında 24 saat boyunca 250 rpm'de karıştırılmıştır. Denge deneyleri sırasında çözeltilerin pH'ı nötr pH'ta (pH ~5-6) tutuldu. 24 saatlik temastan sonra adsorbanlar, 0,22 µm şırınga filtresiyle filtrasyon yoluyla çözeltiden ayrılmıştır. Daha sonra süpernatan çözeltisinin konsantrasyonu, 230 nm dalga boyunda UV-Vis Spektrofotometre (Shimadzu-UV 1800) ile belirlendi. Sonuçların güvenilirliği için deneyler üç kez tekrarlanmıştır. Optimum çalışma koşullarını belirlemek için adsorban dozajının (m_{ads}/V_{soln}= 0.5, 1, 1.5) ve pH'ın (2-12) aerojelin adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkisi de test edilmiştir. Bu deneylerde başlangıç amoksisilin derişimi ve adsorpsiyon süresi sırasıyla 100 ppm ve 24 saat olarak ayarlandı ve çözeltilerin pH'ı 0,2 M HCl veya 0,5 M NH_4OH kullanılarak ayarlanmıştır.

Kinetik deneyler, optimum çalışma koşullarında (başlangıç amoksisilin derişimi: 100 ppm, adsorpsiyon dozajı (m_{ads}/V_{soln}): 1, çözelti pH: 6) farklı zaman aralıklarında (15-1440 dakika) gerçekleştirilmiştir. Her deneyden sonra adsorbanın denge adsorpsiyon kapasitesi (q_e) ve giderim verimliliği ($R\%$) sırasıyla Denklem 2 ve Denklem 3'e göre hesaplanmıştır:

$$q_e(mg/g) = \frac{(C_0 - C_e)V}{m_{ads}} \quad (2)$$

$$R\% = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

Bu denklemde $C_0(mg/L)$ ve $C_e\,(mg/L)$ sırasıyla başlangıç ve denge amoksisilin konsantrasyonu, $V\ (L)$ antibiyotik çözeltisinin hacmi ve $m_{ads}\ (g)$ kullanılan aerojel miktarıdır. Amin modifiye silika aerojel ve amoksisilin molekülleri arasındaki adsorptif etkileşim ve adsorpsiyon mekanizması hakkında daha fazla bilgi edinmek için adsorbanların tutma davranışı farklı denge izotermi ve kinetik modelleri analiz edilmiştir. Denge adsorpsiyon deneylerinde adsorbanların adsorpsiyon mekanizması Langmuir ve Freundlich denge izoterm modellerine göre incelenmiştir. Model denklemlerin doğrusallaştırılmış hali Denklem 4 ve 5' de verilmiştir.

Langmuir izoterm modeli:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m + K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (4)$$

Freundlich izoterm modeli:

$$lnq_e = lnK_F + \frac{1}{n} ln\, C_e \quad (5)$$

Bu denklemlerde, $q_m(\,mg/g)$ maksimum adsorpsiyon kapasitesi, $C_e\ (mg/L)$ denge amoksisilin derişimi, $K_L\ (L/mg)$ Langumir denge sabiti, $K_F\ (mg/g)$ Freundlich denge sabiti, n ise heterojenlik faktörü adı verilen ampirik bir sabittir.

Temas süresinin antibiyotik adsorpsiyon sürecine etkisi, farklı zaman aralıklarında (15-1440 dakika) gerçekleştirilen kinetik çalışmalarla incelenmiş, adsorpsiyon prosesini yöneten mekanizmaları değerlendirmede deneysel verilerle eşleştirmek üzere üç kinetik model (sözde birinci mertebe, sözde ikinci mertebe, tanecik içi difüzyon) kullanılmıştır. Modellere ait denklemler aşağıda verildiği gibidir. Sözde birinci mertebe kinetik hız modeli (Pseudo-first order kinetic model):

$$\ln(\,q_e - q_t) = lnq_t - \,k_1\,t \quad (6)$$

Sözde ikinci mertebe kinetik hız modeli (Pseudo-first order kinetic model):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} - \frac{t}{q_e} \quad (7)$$

Tanecik içi difüzyon modeli (Intraparticle diffusion model):

$$q_t = k_{int} t^{1/2} + C \quad (8)$$

burada $q_e\ (mgg^{-1})$ denge adsorpsiyon kapasitesini, $q_t(mgg^{-1})\ t$ anındaki adsorpsiyon kapasitesini, k_1 (min^{-1}) sözde birinci mertebe hız sabitini, k_2 $(g\,mg^{-1}\,min^{-1})$ sözde ikinci mertebe hız sabitini, $k_{int}\ (mg\ g^{-1}\ min^{-1/2})$ denklem hız sabitini ve C ise sınır tabakasının kalınlığı ile ilgili bir model sabitini göstermektedir.

2.5. Rejenerasyon Çalışması

Sentezlenen adsorbanın yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması adsorpsiyon sürecinin sürekliliği açısından önemlidir (Abu Rumman et al., 2021; Lu et al., 2020; Pandey et al., 2021; G. Tian et al., 2024). Çalışmada üretilen amin modifiyeli aerojelin rejenerasyon yeteneğini ortaya çıkarmak için eluent olarak 0,2 M HCl çözeltisinin kullanıldığı adsorpsiyon-desorpsiyon döngüsel çalışmaları da yürütülmüştür. Desorpsiyon deneyleri, 0.2 mg amoksisilin yüklü adsorbanın, ortam koşulları altında 180 dakika boyunca 20 ml eluent çözeltisi ile temas ettirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Süspansiyonun santrifüjlenmesinden sonra süpernatanın konsantrasyonu UV-Vis Spektrofotometresi ile ölçülmüştür. Her desorpsiyon deneyinden sonra aerojel, bir sonraki döngüden önce pH=6 olana kadar deiyonize su ile yıkanmıştır. Daha sonra her döngüdeki desorpsiyon kapasitesi ($q_{e,des}$) aşağıda verilen denklemle hesaplanmıştır:

$$q_{e,des}(mg/g) = \frac{C_f \times V_{eluent}}{m_{yüklü\ aerojel}} \quad (9)$$

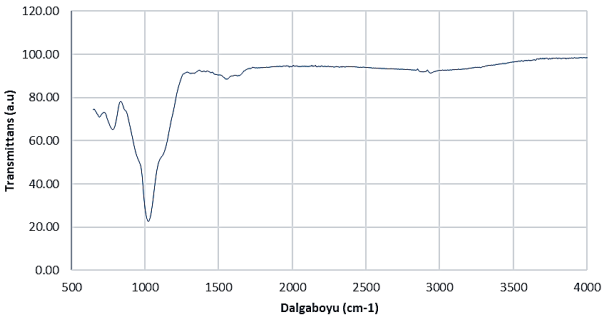
burada V_{eluent} (L), $m_{yüklü\ aerojel}$ (mg) ve C_f (mg / L), sırasıyla eluent çözeltisinin hacmini, amoksisilin yüklü aerojelin miktarını ve eluent çözeltisinde ölçülen amoksisilin derişimini temsil etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. *Karakterizasyon Bulguları*

3.1.1. *Kimyasal Özellikler*

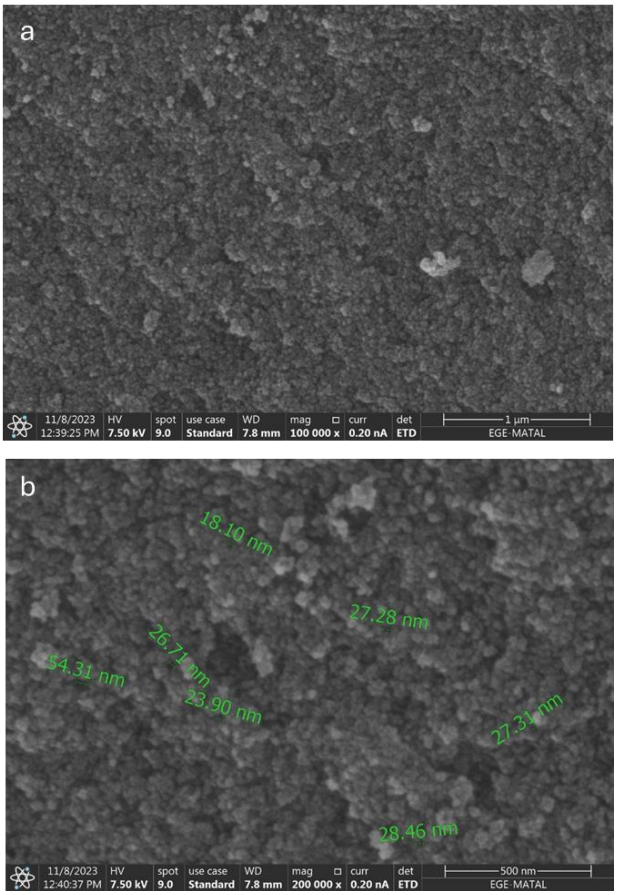
Amin fonksiyonel silika aerojelin kimyasal tanımlaması FTIR analizi ile yapılmış ve elde edilen spektrum Şekil.1'de gösterilmiştir. Spektrumda 1000-1050 cm^{-1} dalga boyu aralığında görünen güçlü sinyaller siloksan bağlarının asimetrik gerilme titreşiminden kaynaklanmakta ve üç boyutlu silika ağ yapısını doğrulamaktadır. 694 cm^{-1} dalga boyunda beliren sinyal silika iskeletini oluşturan Si-O bağlarının simetrik bükülme titreşim moduna, 808 cm^{-1} dalga boyu civarında gözlenen net sinyal simetrik Si-O-Si titreşimine, 1100 cm^{-1} dalga boyu civarında geniş omuz olarak ortaya çıkan sinyal ise, Coulomb etkileşimlerinden kaynaklanan Si-O-Si bağlarının çapraz titreşim moduna atfedilebilir (Lu vd. 2020). 1275-1485 cm^{-1} arasındaki dalga boylarına yakın gözlenen sinyaller, C-N bağının farklı titreşim modlarına, 1465–1642 cm^{-1} ortaya çıkan belirgin sinyaller N–H grubunun bükülme titreşimine atfedilir (Abu Rumman vd. 2021). 1640 cm^{-1} ve 2890 cm^{-1}'de elde edilen daha zayıf sinyaller de sırasıyla N-H deformasyon moduna ve N-H gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir (Zhang vd. 2023). Tüm bu karakteristik sinyaller, sentezlenen aerojeldeki başarılı amin işlevselliğini doğrular niteliktedir.



Şekil 1. Amin fonksiyonel aerojelin FTIR spektrumu

3.1.2. *Morfolojik Özellikler*

Sentezlenen aerojelin 100000 ve 200000 büyütme oranlarında elde edilmiş SEM mikrografları küresel silika taneciklerinin yığın agregasyonundan oluşan iyi dağılmış gözenekli bir yapıyı işaret etmektedir. Silika parçacıkları, ağın her yerine neredeyse homojen dağılmış ve genel olarak 20-50 nm boyutunda gözenekler oluşturacak şekilde kümeler halinde paketlemiştir. Yalnızca TEOS türevli silika aerojel yapılarındaki tipik zincir-benzeri morfoloji yerine parçacık kümeli ağ yapısı, APTES türevli silika aerojellerin sıklıkla gözlenen bir karakteristiğidir (Mohseni-Bandpei et al., 2020; Zarrabi, 2023). Küresel ve ince silika tanelerinden oluşan bu çok gözenekli gelişmiş yapı, üretilen malzemenin düşük yoğunluk (0,172 g/cm^3) ve yüksek gözeneklilik (%92) değerlerine sahip olmasına olanak sağlamıştır. Amin modifiyeli silika yapıları üzerine literatürde yer alan çalışmalar genellikle daha yüksek yığın yoğunluğu ve daha düşük gözeneklilik raporlamışlardır (Capadona et al., 2006; Randall et al., 2011; Zhang et al., 2023). Dolayısıyla, çalışmada elde edilen bu değerler özellikle literatürdeki ortam koşullarında sentezlenen amin ilaveli silika sistemleriyle kıyaslandığında oldukça ümit vaat edicidir (Vareda et al., 2020).

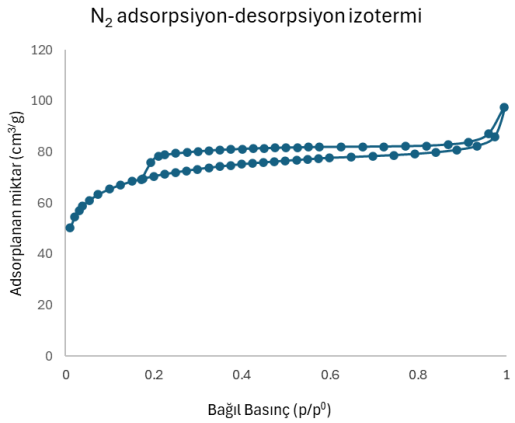


Şekil 2. Amin fonksiyonel silika aerojelin x100000 (a) ve x200000 (b) büyütme elde edilmiş SEM görüntüleri

3.1.3. *Dokusal Özellikler*

Sentezlenen amin fonksiyonel aerojelin dokusal özellikleri N_2 porozimetresi ile karakterize edilmiş ve elde edilen adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi ile malzemenin gözenek boyut dağılım eğrisi Şekil 3 ve Şekil 4' te gösterilmiştir. Üretilen aerojel kılcal yoğunlaşmanın histerezis ile birlikte eşlik ettiği mezogözenek yapısının bir göstergesi olan tip IV izoterm sergilemiştir. Histerezis döngüleri, ağ etkilerinden dolayı adsorpsiyon ve desorpsiyon eğrileri birbiriyle örtüşmediğinde ortaya çıkar. Bu nedenle, elde edilen izotermin şekli, gözenek

yapısının belirli özellikleri ve altta yatan adsorpsiyon mekanizması hakkında önemli bilgiler verir. Çalışmada elde edilen histerezis döngüsü H4 tipidir ve genellikle homojen olmayan dar ve yarık şekilli gözenek kanallarına sahip mezogözenekli malzemelere atfedilir (Cychosz et al., 2017; Thommes et al., 2015). Gözenek boyut dağılımı eğrisinden (Şekil 4) de görülebileceği gibi üretilen aerojelin gözenek yoğunluğu genellikle 2-5 nm boyut aralığında yoğunlaşmıştır. Numunede gözlemlenen düşük bağıl basınçlarda adsorpsiyon dalındaki yüksek N_2 alımı, silika ağındaki mikro gözeneklerin dolumu ile ilişkilidir ve bu tür mikro gözeneklerin varlığı, çözücü buharlaşması sırasında kılcal etkilerden dolayı mezo gözenekli matrisin kısmi tahribatıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 3. Amin fonksiyonel aerojelin N_2 adsorpsiyon- desorpsiyon izotermi

Şekil 4. Amin fonksiyonel aerojelin gözenek boyut dağılım eğrisi

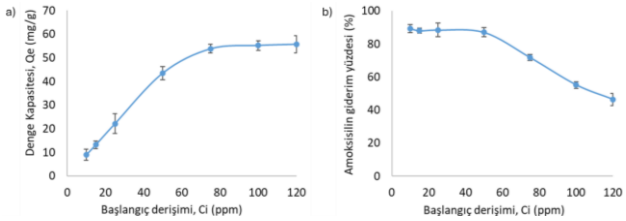
Çizelge 1 sentezlenen adsorbanın BET ve BJH yöntemlerinden elde edilen görünür yüzey alanını, toplam gözenek hacmini ve ortalama gözenek çaplarını göstermektedir. Literatürde metil modifiye organosilan, amin modifiye organosilan ve tetraalkoksilan üçlü öncüsüyle kurulmuş silika yapılarında eğer kurutma ortam koşullarında yapıldıysa elde edilen aerojellerin yüzey alanları genellikle < 50 m^2/g, gözenek hacimleri ise <0.03 cm^3/g olarak raporlanmıştır (Lamy-Mendes et al., 2019; Vareda et al., 2020). Öte yandan bu çalışmada, iyi gelişmiş mezo-gözenekli ağın bir sonucu olarak, amin fonksiyonel bu aerojelin, adsorptif özellikleri açısından yararlı olabilecek yüksek görünür yüzey alanı ve gözenek hacmi değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 1. Sentezlenen aerojelin gözenek özellikleri

Gözenek Özellikleri	Sayısal Değerleri
Görünür Yüzey Alanı (m^2/g)	223
Toplam gözenek hacmi (cm^3/g)	0.13
Ortalama gözenek çapı (nm)	2.3

3.2. *Kesikli Adsorpsiyon Deneyleri*

Bu bölümde sentezlenen amin fonksiyonel aerojelin amoksisilin tutma başarımı bir dizi kesikli adsorpsiyon deneyi ile test edilmiştir. En yüksek tutma kapasitesini sağlayan optimum çalışma koşullarını belirlemek amacıyla, başlangıç kirletici konsantrasyonu, adsorban dozajı, çözelti pH'ı, ve temas süresi operasyonel parametreler olarak araştırılmıştır.



Şekil 5. Başlangıç amoksisilin derişiminin denge kapasitesi ve giderim verimliliği üzerine etkisi

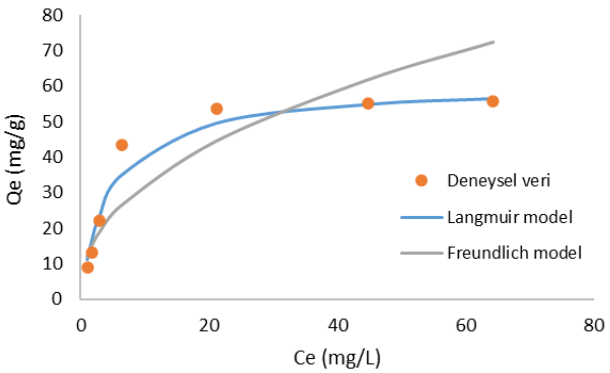
3.2. 1. *Denge Çalışmaları*

Farklı kirletici başlangıç derişimlerinin maksimum adsorpsiyon kapasitesi ve giderim verimliliği üzerindeki etkisi ilk çalışma parametresi olarak araştırılmış ve 24 saatlik temas sonunda elde edilen sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir. Başlangıç amoksisilin konsantrasyonunun artmasıyla birlikte, kütle transferi için artan itici güç nedeniyle elde edilen kapasitelerde belli bir düzeye kadar artış eğilimi gözlenmiştir. Adsorban yüzeyinde mevcut aktif adsorpsiyon bölgelerinin doygunluğa ulaşması sonucu 100 ppm'den sonra artan kirletici derişimleri elde edilen kapasite değerlerini neredeyse hiç değiştirmemiştir ve adsorban denge kapasitesi 55.7 mg/g olarak kaydedilmiştir. Adsorpsiyon kapasitesinin aksine, amoksisilin başlangıç konsantrasyonunun artmasıyla giderim verimi azalmış ve en yüksek giderim verimi 10 ppm amoksisilin çözeltisinde % 89.3 olarak bulunmuştur. Düşük kirletici derişimlerinde elde edilen yüksek giderim verimi literatürdeki birçok çalışma tarafından da desteklenmektedir (Bagri et al., 2024; Mirizadeh et al., 2024; Moussavi et al., 2013; Ruan et al., 2023; Wang et al., 2022). Çözeltideki adsorban miktarı sabit olduğundan giderim verimliliğindeki azalma eğilimi, kirletici molekül miktarının artmasına karşın aerojellerin aktif sorpsiyon bölgelerinin sınırlı mevcudiyetine atfedilmiştir (Sert Çok et al., 2025).

3.2.3. *Denge İzotermleri*

Sentezlenen aerojelin denge verileri, amin işlevli silika aerojel yapısı üzerindeki amoksisilin adsorpsiyon

mekanizmasını belirlemek için Şekil 6'da gösterildiği gibi Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri uygulanarak analiz edilmiştir ve elde edilen model parametreleri Çizelge 2'de özetlenmiştir. Seçilen modellerin uygunluğu korelasyon katsayıları (R^2) ile değerlendirilmiş ve Langmuir modelinin deneysel verilere yüksek uyum gösterdiği belirlemiştir. Langmuir modelinde elde edilen yüksek regresyon katsayıları (R^2 =0.996) amoksisilinin aerojel üzerine adsorpsiyonunun tek katmanlı olduğu ve adsorbanın homojen olarak dağılmış, düzgün bağlanma enerjilerine sahip aktif bölgeler içerdiği varsayımını doğrulamaktadır (Abu Rumman vd. 2021). Hedef kirleticiler için verimli adsorpsiyon sistemlerinin tasarlanmasında önemli bir parametre olan ve Langmuir modeli kullanılarak hesaplanan maksimum teorik adsorpsiyon kapasitesi (q_m) de çalışmada deneysel olarak elde edilen denge kapasitesi değerlerine de oldukça yakın sonuç vermiştir (Çizelge 2).



Şekil 6. Langmuir ve Freundlich denge izotermleri

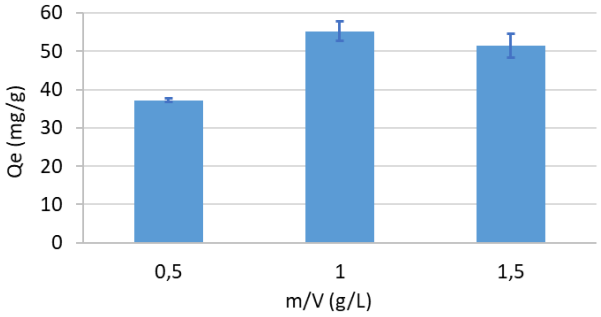
Freundlich modelinde nispeten daha düşük R^2 değerleri elde edilmesine rağmen, bu modeldeki heterojenlik faktörü (n) değerinin 1'den büyük olması, elverişli bir adsorpsiyon sürecine işaret etmektedir (Nassar vd. 2019).

Çizelge 2. Amin fonksiyonel aerojelin izoterm model parametreleri

Adsorban	q_e (mg/g)	İzoterm Modelleri					
		Langmuir Parametreleri			Freundlich Parametreleri		
		q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	n	K_F (mg/g)	R^2
Amin fonksiyonel silika aerojel	55.7	56.4	0.211	0.996	2.293	11.808	0.856

3.2. 2. *Adsorban Dozajı*

Pratik uygulamalarda maliyeti optimize etmek için önemli bir parametre olduğundan adsorban dozajının denge kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiş ve Şekil 7'te farklı adsorban dozajlarına bağlı olarak adsorpsiyon kapasitesindeki değişim gösterilmiştir.

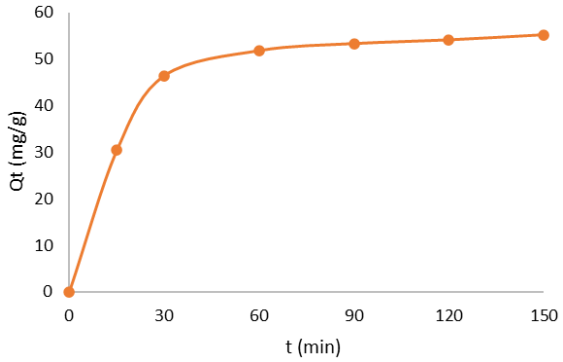


Şekil 7. Adsorban dozajının aerojel amoksisilin adsorpsiyon kapasitesine etkisi

Şekil 7'ye göre adsorpsiyon kapasitesi adsorban dozajının 0.5'ten 1'e yükseltilmesiyle önemli ölçüde artmış adsorban miktarının daha fazla arttırılmasıyla ise bir miktar azalmıştır. Düşük adsorban dozajında elde edilen düşük kapasite değerleri aktif adsorpsiyon bölgelerinin yetersizliğine bağlanabilir (Dinh et al., 2022; El Maataoui et al., 2019). Elde edilen kapasite değerlerinin adsorban dozajının daha fazla arttırıldığında sergilediği düşüş ise silika aerojelin aktif bağlanma bölgelerinin yüksek konsantrasyonlardaki agregasyonuna ve amoksisilin bağlanma bölgelerinin sınırlanmasına atfedilebilir (Abu Rumman et al., 2021). Antibiyotik adsorpsiyonu üzerine gerçekleştirilen çalışmalardan bazıları artan adsorban dozajı ile birlikte artan adsorpsiyon kapasitesine işaret ederken (Le et al., 2024; Pham et al., 2020) bu çalışma dahil birçok çalışma ise tanecik aglomerasyonu sonucu artan adsorban miktarıyla birlikte denge kapasitesinde düşüş meydana geldiğini ve en yüksek adsorpsiyon veriminin düşük/orta adsorban dozajında elde edildiğini bildirmişlerdir (Ruan et al., 2023; Sert Çok et al., 2025). Bu durum adsorban kullanımı açısından da avantaj sağlamaktadır.

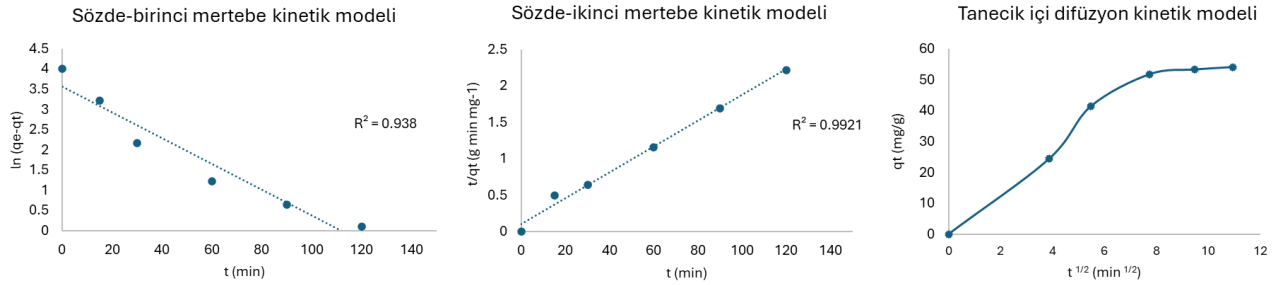
3.2. 4. *Kinetik Çalışmalar*

Amoksisilinin amin işlevsel silika aerojel üzerinde zamana bağlı adsorpsiyon davranışı, ortam koşullarında gerçekleştirilen kinetiği çalışmalar ile araştırılmıştır. Sentezlenen aerojel 30 dakikalık temas süresi içinde, denge kapasitelerinin yaklaşık % 90'ına ulaşmış ve hızlı adsorpsiyon kinetiği sergilemiştir (Şekil 8). Adsorbanın kinetik davranışı, altta yatan adsorpsiyon mekanizmalarını daha iyi anlamak için üç farklı kinetik modelin uygulanmasıyla analiz edilmiş ve elde edilen grafikler ile model parametreleri Şekil 9 ve Çizelge 3 'te verilmiştir.



Şekil 8. Temas süresinin adsorbanın amoksisilin adsorpsiyon kapasitesine etkisi

Doğrusal olmayan regresyon sonuçlarına sentezlenen aerojelin adsorpsiyon davranışı, sözde birinci dereceden (PFO) kinetik modele kıyasla sözde ikinci dereceden (PSO) kinetik modelle daha iyi tanımlanmış ve bu modelde daha yüksek korelasyon katsayıları (R^2>0,98) elde edilmiştir. Bu durum adsorpsiyon sürecinin fiziksel adsorpsiyonun katkısıyla kemisorpsiyon tarafından yönetildiği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, sözde-ikinci mertebe kinetik modelinden belirlenen denge kapasiteleri deneysel olarak elde edilen denge kapasitelerine son derece yakın değerler göstermiştir (Çizelge 3).



Şekil 9. Adsorpsiyon kinetiğinin modellenmesi: Zamana bağlı amoksisilin adsorpsiyon verilerinin sözde-birinci mertebe, sözde-ikinci mertebe ve tanecik içi difüzyon kinetik modellerine uygulanması

Çizelge 3. Amoksisilin adsorpsiyonu kinetik model parametreleri

Adsorban	$Q_{e,den}$	Sözde-birinci mertebe			Sözde-ikinci mertebe		
		k_1 (min^{-1})	$Q_{e,teo}$ (mg/g)	R^2	k_2 (g/mg min)	$Q_{e,teo}$ (mg/g)	R^2
Amin işlevsel silika aerojel	55.2	0.0318	35.31	0.938	0.0029	56.50	0.9921

Adsorpsiyon sürecini kontrol eden difüzyon mekanizmasını aydınlatmak için adsorbana tanecik için difüzyon kinetik modeli de uygulanmış ve tanecik içi difüzyon modeli Şekil 9'dan da görülebileceği üzere üç fazlı doğrusallık ile karakterize edilmiştir. Burada 6 $dk^{½}$'ya kadar ilk doğrusal bölge antibiyotik moleküllerinin adsorbanların dış makro/mezo gözenek yüzeyine harici difüzyonunu ifade ederken 6-8 $dk^{½}$ arasındaki ikinci doğrusal bölge aerojelin mikroyapısında bulunan mikro gözenekler aracılığıyla gerçekleşen iç difüzyon mekanizmasına atfedilmektedir. 8 $dk^{½}$ 'den sonra yer alan üçüncü lineer plato ise denge durumuyla ilgilidir.

Kinetik çalışmalar amoksisilin antibiyotiğin amin işlevsel aerojel üzerindeki adsorpsiyon sürecinin gözenek dolumuyla ilintili fiziksel adsorpsiyonun yanı sıra esas olarak kimyasal çekimler tarafından yönetildiğini göstermiştir. Adsorban yüzeyinin farklı fonksiyonel gruplarla işlevselleştirilmesinin, adsorban ve kirletici molekülleri arasındaki kimyasal etkileşimleri arttırdığı ve kimyasal çekimleri baskın adsorpsiyon mekanizması haline getirdiği literatürde yer alan farklı antibiyotik adsorpsiyon çalışmalarında da ortaya konmuştur (Dinh et al., 2022; Ninwiwek et al., 2019; Pandey et al., 2021; X. Tian et al., 2019).

3.2. 5. *pH Etkisi*

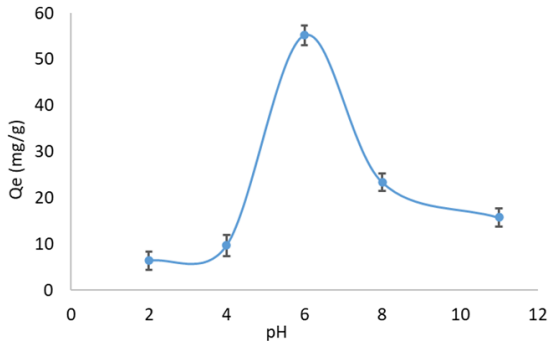
Antibiyotiklerin farklı pH'larda adsorpsiyon davranışı, adsorbat ile moleküller arasındaki elektrostatik etkileşimler tarafından belirlenir. Dolayısıyla çözelti pH'ının amoksisilin adsorpsiyon davranışına etkisi hem silika aerojelin yüzey yükü hem de amoksisilinin ayrışma sabitleri (pKa) dikkate alınarak açıklanabilir. Amoksisilin, yapısındaki farklı fonksiyonel gruplar (karboksil, amin, hidroksil) göz önünde bulundurulduğunda suda üç farklı formda iyonize olur ve 2.7 (-COOH), 7.5 ($-NH_2$) ve 9.6 (-OH) olmak üzere üç adet asit ayrışma katsayısına (pKa) sahiptir (Moussavi vd. 2013). Bu sebeple bu bileşik, yüksek asidik (pH< 2.7) ortamlarda katyonik, bazik ortamlarda (pH> 7.5) ise anyonik formda bulunurken, bu iki pH değeri arasında (2.7< pH <7.5) zwiterron halinde bulunur (El Azzouzi vd. 2022).

Bu çalışmada, çözelti pH'ına bağlı elektrostatik etkileşimlerin etkisi önemli bir operasyonel parametre olarak araştırılmıştır. Amin fonksiyonel silika aerojelin adsorpsiyon kapasitesindeki değişim 2-11 pH aralığında

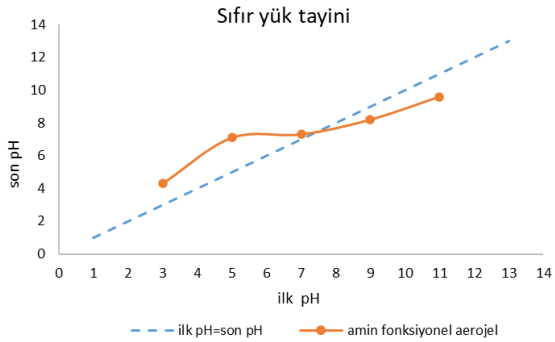
izlenmiş ve sonuçlar Şekil 10'da gösterilmiştir. Ayrınca pH testinden önce, sentezlenen aerojelin sıfır yük noktası (pH_{pzc}) bir dizi deneyle 7.45 olarak belirlenmiştir (Şekil 11). Sıfır yük noktası (pzc) tayini deneyleri daha önce yayınlanmış prosedürlere göre yürütülmüştür (Órfão vd. 2006). Tipik bir deneyde 100 ml'lik erlenmeyerler içerisine 10 ml 0,01 M NaCl çözeltileri hazırlanmıştır. Şişelerdeki çözeltinin pH'ı, 0,1 M HCl veya 0,1 M NaOH eklenerek 3, 5, 7, 9 ve 11'e ayarlanmıştır. Daha sonra her çözeltiye belirli miktarda adsorban (0,1 g) eklenmiş ve başlangıç pH'ları kaydedilmiştir. Ortam koşullarında 48 saatlik temastan sonra çözeltilerin son pH'ı ölçülmüştür. Numunelerin pzc noktaları daha sonra, Şekil 11' de gösterildiği gibi başlangıç pH'ına karşı son pH grafiğinin $pH_{başlangıç}$ = pH_{son} çizgisini kestiği noktadan belirlenmiştir. Deney sonucuna göre, çözelti pH'ının 7.45'ten düşük olduğu durumlarda fonksiyonel aerojelin yüzeyindeki amin grupları ortamdaki fazla H^+ iyonlarınca protonlanacak ve malzeme yüzeyi pozitif yüklenecektir. Tam tersi olarak, çözelti pH'ının 7.45'ten yüksek olduğu durumlarda ise yüzey fonksiyonel grupları çözeltideki OH^- iyonlarının fazlalığı nedeniyle deprotonlanacak ve yüzey negatif yüklenecektir. Antibiyotik molekülünün ve adsorban yüzeylerinin benzer yüklerle yüklendiği kuvvetli asidik ve alkali (pH < 2.7 ve pH>7.5) koşullarda moleküller arasındaki elektrostatik itme sebebiyle adsorpsiyon yeteneği önemli şekilde engellenmiş, en yüksek kapasite değerlerine ise amoksisilin molekülünün zwitteron halinde bulunduğu nötral pH'larda ulaşılmıştır (pH=6). Bu durum, elektrostatik etkileşimlerin yanı sıra, silika aerojelin hidroksil ve amino grupları ile amoksisilin molekülünün farklı fonksiyonel grupları (hidroksil, karboksil ve amino grupları) arasında oluşabilecek hidrojen bağlarının da bir diğer etkili adsorpsiyon mekanizması olabileceğine işaret etmektedir. Sudan amoksisilin gideriminde çözelti pH'ı arttıkça adsorpsiyon kapasitesindeki değişim literatürde yer alan farklı çalışmalarda da benzer bir trend göstermiştir ve bu çalışmalarda da en yüksek kapasite değerlerine amoksisilinin zwitteron halinde bulunduğu ortam pH'larında ulaşıldığı bildirilmiştir (Berges et al., 2021; Moussavi et al., 2013).

3.2. 6. Rejenerasyon ve Yeniden Kullanılabilirlik

Sentezlenen aerojel adsorbanın döngüsel performansının belirlenmesi, süreç devamlılığı ve adsorbanın uzun süreli kullanımı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle pratik uygulamalar için, adsorbanın rejenerasyonu ve yeniden kullanılabilirliği döngüsel adsorpsiyon-desorpsiyon çalışmasıyla araştırılmıştır. Amoksisilin yüklü silika aerojelin desorpsiyon işlemi, eluent olarak 0,2 M HCl kullanılarak gerçekleştirilmiş ve örneğin tutma kapasitesinde % 20'nin üzerinde azalma gözlenene kadar testler ardışık döngüler halinde yürütülmüştür.



Şekil 10. Çözelti pH'ının silika aerojelin amoksisilin adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi

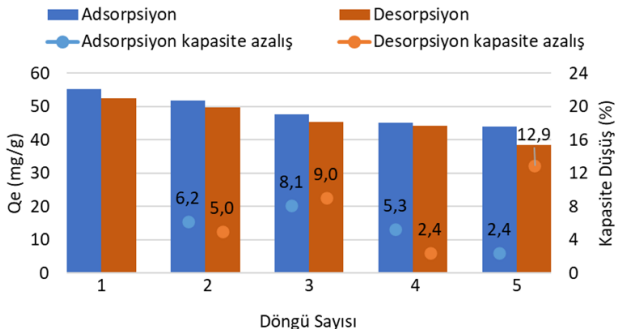


Şekil 11. Amin fonksiyonel aerojelin sıfır yük tayini grafiği

Kuvvetli asidik koşullarda zayıflayan elektrostatik etkileşimler sonucu yüksek desorpsiyon performansına erişilmiştir. Şekil 12' de özetlenen sonuçlar, amin fonksiyonel silika aerojelin 5 döngüye kadar adsorpsiyon kapasitesinin % 80'ini koruduğunu göstermiştir. Her döngüden sonra elde edilen kapasitede görülen hafif azalmalar, gözeneklerde tutulan kalıntı amoksisilin moleküllerinin varlığına ve/veya aktif bağlanma bölgelerinin kısmi tahribatına bağlanabilir. Bu çalışmada elde edilen bulgulara benzer olarak Pandey ve ark. amoksisilin adsorpsiyonuna yönelik olarak geliştirmiş oldukları silika adsorbanların rejenerasyon yeteneklerini test ettikleri çalışmada, 6 döngüden sonra modifiyesiz silika jellerin adsorpsiyon kapasitelerinin yalnızca %54'ünü, anilin modifiyeli silika adsorbanların ise 6 döngüden sonra kapasitelerinin %80'inden fazlasını koruduğunu bildirmişlerdir (Pandey et al., 2021).

Bir diğer çalışmada Elnazer ve ark. pirinç külünden üretmiş oldukları silika nanotanelerin amoksisilin adsorpsiyonundaki performanslarını inceledikleri çalışmalarında ürettikleri adsorbanların 6 döngü boyunca kapasitelerinde %7 azalmayla tekrarlı kullanıma uygun olduklarını raporlamışlardır (Elnazer et al., 2024). Dolayısıyla bu çalışmada elde edilen rekabetçi döngüsel performans çevresel ve ekonomik açılardan antibiyotik giderme uygulamalarında amin fonksiyonel silika

adsorbanların verimli kullanımına yönelik umut verici bir işarettir.



Şekil 12. Amin fonksiyonel silika aerojelin rejenerasyon döngüleri

4. Sonuç

Bu çalışma, amin-işlevselliğine sahip silika aerojelin kolay, zaman ve enerji açısından verimli bir sol-jel stratejisi izlenerek ortam koşullarında sentezlenmesini ve üretilen malzemenin sulu ortamlardan amoksisilin antibiyotik giderimindeki adsorptif performansını ortaya çıkarmayı amaçlamıştır. Yürütülen fizikokimyasal ve morfolojik karakterizasyon çalışmaları sonucunda sentezlenen aerojel yüzeyinin amin fonksiyonel grubuyla başarılı bir şekilde işlevselleştirildiği FTIR analizi ile, düşük yoğunluk ve yüksek gözeneklilik (ϕ=88%, ρ_{bulk}=0.17 g/cm^3) ile karakterize edilen gelişmiş mezogözenekli yapısı (S_{BET}= 223m^2/g, v_{pore}=0.13 cm^3/g) ise SEM, N_2 porozimetre analizleri ile kanıtlanmıştır. Çalışmanın devamında üretilen malzeme, yüksek amin işlevselliği ve çok gözenekli yapısının getirdiği avantajları göz önüne alınarak sulu çözeltilerden amoksisilin gideriminde adsorban olarak test edilmiştir. Bu kapsamda bir dizi kesikli adsorpsiyon deneyi tasarlanmış ve gerçekleştirilen denge ve kinetik sorpsiyon çalışmalarında en iyi işletme koşullarını ortaya çıkarmak için çözelti pH'ı, adsorban dozajı ve temas süresi gibi çeşitli işletme parametreleri test edilmiştir. Optimum koşullarda (C_i=100 ppm, m_{ads}/V_{soln}=1, pH=6) sentezlenen amin fonksiyonel aeojelin denge kapasitesi 55.7 mg/g olarak kaydedilmiştir. Denge ve kinetik çalışmalardan elde edilen deneysel veriler sırasıyla Langmuir izotermi (R^2 >0,996) ve sözde-ikinci mertebeden kinetik (R^2>0,992) modellerine uyumluluk göstermiş ve çoğunlukla kimyasal çekimlerle yönetilen tek tabakalı homojen bir adsorpsiyon sürecini işaret etmiştir. Denge kapasitesinin %90'ından fazlasına ilk 30 dk'lık temas süresinde ulaşması, hızlı sorpsiyon kinetiğini göstermekte ve sadece fiziksel etkileşimlerin (gözenek doldurma) değil, aynı zamanda elektrostatik etkileşimler ve hidrojen bağı gibi kimyasal etkileşimlerin de kısa temas süresinde yüksek sorpsiyon kapasitelerine ulaşılmasında önemli olduğunu vurgulamaktadır. Rejenerasyon çalışmaları da ayrıca sentezlenen adsorbanın en az 5 döngü boyunca elde edilen maksimum kapasitelerinin %80'ini koruduğunu ve tekrarlanabilir kullanım için uygun olduğunu doğrulamıştır.

Elde edilen sonuçlar, sulu ortamlardan yüksek riskli antibiyotik kirleticilerin giderim uygulamalarında silika aerojel tabanlı fonksiyonel adsorbanların kullanımına yönelik önemli bir referans değeri taşımaktadır ve çevresel ıslah uygulamalarında ileriye dönük çalışmalara ışık tutacak niteliktedir. Öte yandan geliştirilen adsorpsiyon sürecinin termodinamik incelemesinin yapılacağı gelecekteki çalışmalar, adsorpsiyon sürecinin bütüncül olarak ele alınmasına katkılar sunabilir. Bu çalışmalardan elde edilecek kinetik ve termodinamik veriler ışığında geliştirilecek adsorpsiyon prosesi, kesikli sistemlerin yanı sıra seyreltik akımlardan amoksisilin gideriminin test edilmesine olanak sağlayabilir. Son olarak üretilen adsorbanın gerçek farmasötik atık sularında ve eş kirleticiler varlığında seçimli amoksisilin adsorpsiyon performansının açığa çıkarılması da gelecekteki çalışmaların önemli bir konusudur ve geliştirilen teknolojinin sürekliliği açısından önem taşımaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarın bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edeceği hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Yazar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan eder.

Teşekkür

Bu çalışma Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri koordinatörlüğü tarafından finansal olarak desteklenmiştir. Proje No: 23943.

Kaynakça

Abedpour H, Moghaddas JS, Borhani MN, Borhani TN (2023) Separation of toxic contaminants from water by silica aerogel-based adsorbents: A comprehensive review. Journal of Water Process Engineering 53:103676. https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2023.103676

Abu Rumman G, Al-Musawi TJ, Sillanpaa M, Balarak D (2021) Adsorption performance of an amine-functionalized MCM–41 mesoporous silica nanoparticle system for ciprofloxacin removal. Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management 16: 100536. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100536

Barczak M (2019) Amine-modified mesoporous silicas: Morphology-controlled synthesis toward efficient removal of pharmaceuticals. Microporous and Mesoporous Materials 278:354–365. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.01.012

Biswal BK, Balasubramanian R (2022) Adsorptive removal of sulfonamides, tetracyclines and quinolones from wastewater and water using carbon-based materials: Recent developments and future directions. Journal of Cleaner Production 349:131421. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131421

de Franco MAE, de Carvalho CB, Bonetto MM, et al (2017) Removal of amoxicillin from water by adsorption onto activated carbon in batch process and fixed bed column: Kinetics, isotherms, experimental design and breakthrough curves modelling. Journal of Cleaner Production 161:947–956. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.05.197

El Azzouzi L, El Aggadi S, Ennouhi M, et al (2022) Removal of the Amoxicillin antibiotic from aqueous matrices by means of an adsorption process using Kaolinite clay. Scientific African 18:e01390. https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2022.E01390

Elnazer WY, Farrag TE, Beheary MS, Mansour RA (2024) Efficient adsorption of amoxicillin onto silica nanoparticles synthesized from rice husks. Desalination and Water Treatment 317:100086. https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100086

Ganesamoorthy R, Vadivel VK, Kumar R, et al (2021) Aerogels for water treatment: A review. Journal of Cleaner Production 329:129713. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129713

Guzel Kaya G, Aznar E, Deveci H, Martínez-Máñez R (2021) Low-cost silica xerogels as potential adsorbents for ciprofloxacin removal. Sustainable Chemistry and Pharmacy 22: 100483. https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100483

Kovalakova P, Cizmas L, McDonald TJ, et al (2020) Occurrence and toxicity of antibiotics in the aquatic environment: A review. Chemosphere 251:126351. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126351

Lu D, Xu S, Qiu W, et al (2020) Adsorption and desorption behaviors of antibiotic ciprofloxacin on functionalized spherical MCM-41 for water treatment. Journal of Cleaner Production 264:121644. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121644

Moussavi G, Alahabadi A, Yaghmaeian K, Eskandari M (2013) Preparation, characterization and adsorption potential of the NH4Cl-induced activated carbon for the removal of amoxicillin antibiotic from water. Chemical Engineering Journal 217:119–128. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.069

Mohseni-Bandpei A, Eslami A, Kazemian H, et al (2023) Enhanced adsorption and recyclability of surface modified hydrophobic silica aerogel with triethoxysilane: removal of cefixime by batch and column mode techniques. Environmental Science and Pollution Research 30:1562–1578. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22277-5

Mohseni-Bandpei A, Eslami A, Kazemian H, et al (2020) A high density 3-aminopropyltriethoxysilane grafted pumice-derived silica aerogel as an efficient adsorbent for ibuprofen: Characterization and optimization of the adsorption data using response surface methodology. Environmental Technology and Innovation 18:100642. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100642

Nassar MY, Ahmed IS, Raya MA (2019) A facile and tunable approach for synthesis of pure silica nanostructures from rice husk for the removal of ciprofloxacin drug from polluted aqueous solutions. Journal of Molecular Liquids 282:251–263. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.03.017

Órfão JJM, Silva AIM, Pereira JCV, et al (2006) Adsorption of a reactive dye on chemically modified activated carbons - Influence of pH. Journal of Colloid and Interface Science 296:480–489. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.09.063

Sert Çok S, Koç F, Dudás Z, Gizli N (2023) The Methyl Functionality of Monolithic Silica Xerogels Synthesized via the Co-Gelation Approach Combined with Surface Silylation. Gels *9*(1), 33. https://doi.org/10.3390/gels9010033

Yu F, Yang Z, Zhang X, et al (2021) Lanthanum modification κ-carrageenan/sodium alginate dual-network aerogels for efficient adsorption of ciprofloxacin hydrochloride. Environmental Technology and Innovation 24:1–13. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102052

Zhang Z, Zhao S, Li K, et al (2023) Resilient silica-based aerogels with organic and inorganic molecular hybrid structure prepared by a novel self-catalyzed gelling strategy for efficient heat insulation and CO2 adsorption. Chemical Engineering Journal 459:141579. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2023.141579

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1555391
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035702 (658-666)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035702 (658-666)

Poli(Dimetilamino Etil Metakrilat-ko-Metil Metakrilat)/Poliindol Kompozitlerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Antioksidan Özellikleri

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 24.09.2024.
Kabul/Accepted: 08.01.2025
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Synthesis, Characterization and Antioxidant Properties of Poly(Dimethylamino Ethyl Methacrylate-co-Methyl Methacrylate)/Polyindole Composites

Cengiz SOYKAN* , **Lokman GÜREL**

Uşak Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye

Öz

Amfifilik ve iletken kompozitler önemli biyomateryaller olarak kabul edilir ve bakteri üremesini etkili bir şekilde engelledikleri için antibakteriyel ajanlar olarak kullanılır. Bu çalışmada; İlk aşamada, hidrofilik monomer 2-dimetilamino etilmetakrilat (DMAEMA) ve hidrofobik monomer metil metakrilattan (MMA) serbest radikal polimerizasyonu kullanılarak amfifilik poli(DMAEMA-ko-MMA) kopolimeri sentezlendi. İkinci aşamada, poli(DMAEMA-ko-MMA) kopolimerinde in situ oksidatif polimerizasyon tekniği kullanılarak demir(III) klorür ($FeCl_3$) varlığında indol (IN) iletken monomeri kullanılarak farklı bileşimlerde kütlece %10, 30, 50, 70 ve 90 poliindol (PIN) içeriğine sahip beş seri kompozit hazırlandı. Polimer kompozitlerin (PC'ler) yapıları FTIR, TGA, SEM, AFM karakterizasyon teknikleri kullanılarak aydınlatıldı. TGA eğrilerinden PC'lerdeki PIN oranı arttıkça kompozitlerin kül bırakma oranının da arttığı görülmüştür. FESEM analizlerinden kompozitlerin homojen olmayan, bulutumsu ve süngerimsi bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. AFM analizlerinde kompozitlerin çıplak cam yüzeyinde düzgün, sıkı paketlenmiş ve homojen olmayan bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Kompozitlerin antioksidan özellikleri incelendi. Antioksidan çalışmaları bulguları, kompozitlerde PIN'in oranı arttıkça kompozitlerin antioksidan değerlerinin arttığını gösterdi.

Anahtar Kelimeler: *Amfifilik kompozitler; Poli(2-Dimetilamino etilmetakrilat); Poliindol; Antioksidan özellik.*

Abstract

Amphiphilic and conductive composites are considered important biomaterials and are used as antibacterial agents because they effectively inhibit bacterial growth. In this study; In the first step, amphiphilic poly(DMAEMA-co-MMA) copolymer was synthesized using free radical polymerization from hydrophilic monomer 2-dimethylamino ethylmethacrylate (DMAEMA) and hydrophobic monomer methyl methacrylate (MMA). In the second stage, five series of composites with polyindole (PIN) contents of 10, 30, 50, 70 and 90% by mass in different compositions were prepared using indole (IN) conductive monomer in the presence of iron(III) chloride ($FeCl_3$) using the in situ oxidative polymerization technique on poly(DMAEMA-co-MMA) copolymer. The structures of polymer composites (PCs) were elucidated using FTIR, TGA, SEM, AFM characterization techniques. From the TGA curves, it was seen that as the PIN ratio in PCs increased, the ash release rate of the composites also increased. From FESEM analysis, it can be said that the composites have a non-homogeneous, cloudy and spongy structure. AFM analyzes showed that the composites had a smooth, tightly packed and non-homogeneous structure on the bare glass surface. The antioxidant properties of the composites were examined. Antioxidant study findings showed that as the ratio of PIN in composites increased, the antioxidant values of the composites increased.

Keywords: *Amphiphilic composites; Poly(2-Dimethylamino ethylmethacrylate); Poly(Indole); Antioxidant property.*

1. Giriş

İletken polimerler (CP'ler), elektrokimyasal ve kimyasal sentezle hazırlanan aktif polimerlerin büyük bir grubunu oluşturan bir organik bileşik sınıfına aittir (Pal vd, 2020). CP'ler, bilim ve teknolojide birçok geniş uygulama alanı bulan önemli bir fonksiyonel malzeme sınıfını oluşturur

(Namsheer vd, 2021). Biyouyumlulukları nedeniyle CP'lerin kullanım alanları arasında doku mühendisliği (Guo vd, 2018; Dong vd, 2020), rejeneratif tıp (Park vd, 2019; Nair vd, 2019), ve hedefe yönelik ilaç geliştirilmesi, dağıtım sistemleri (Krukiewicz vd, 2016; Boehler vd, 2019) ve hücre ekimi (Lakard vd, 2007) bulunmaktadır. PC'ler ayrıca biyolojik materyallerin immobilizasyonu için etkili matrisler olarak da hareket edebilir, substratların ve reaksiyon ürünlerinin serbest difüzyonunu gerçekleştirebilir ve enzimler veya mikroorganizma hücreleri için biyouyumlu bir ortam yaratabilir. CP'ler farklı şekillerde hazırlanabilir. Kimyasal polimerizasyon tekniği CP üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Cengiz Soykan e-posta / e-mail: cengizsoykan@usak.edu.tr

biridir. Polimerizasyon üç ana aşamada gerçekleşir: oksidasyon, bağlanma ve deprotonasyon. Bu yöntem ölçeklenebilir ve aynı zamanda pahalı ekipman gerektirmediği için ekonomiktir. Genellikle kimyasal sentezle elde edilen polimer makromolekülleri arasında daha az iç çapraz bağ bulunduğundan uygun solventlerde daha fazla çözünürler (Nguyen vd, 2016). Kimyasal polimerizasyonda amonyum persülfat ($(NH_4)_2S_2O_8$), sodyum vanadat ($NaVO_3$), seryum sülfat ($Ce(SO_4)_2$), hidrojen peroksit (H_2O_2), potasyum iyodat (KIO_3), potasyum dikromat ($K_2Cr_2O_7$) ve demir (III) klorür ($FeCl_3$) gibi çeşitli oksitleyici maddeler kullanılır (Fan vd, 2020; Nie vd, 2021; Fadel vd, 2020; Jangid vd, 2020).

Saf polimerlerin kullanım alanı sınırlı olduğundan çeşitli bileşiklerle oluşturulan kompozitleri oldukça yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Nanokompozitlerin sentezi şu şekilde gerçekleşebilir: yerinde (sırayla), ex situ (ayrı ayrı) ve tek kapta (eş zamanlı olarak) (Nguyen vdi, 2016; Choudhary vd, 2021; Idumah vd, 2021). CP'lerin ve nanokompozitlerinin sentezine yönelik tüm yöntemler karşılaştırıldığında, CP'lerin ve nanokompozitlerin sentezine yönelik olanakların çok büyük olduğu görülebilir. CP'leri güçlü arayüzey etkileşimleriyle bir polimer matrisine entegre etmek için geliştirilen stratejiler, geniş uygulama alanı bulmak için bu benzersiz malzeme grubunu daha da geliştirmiştir. Ayrıca iletkenliği daha yüksek yeni monomerlerin ortaya çıkmasına yönelik sentez fırsatları geliştirilebilir. Biyolojik şablonlar kullanılarak ve çevreye daha az yük getiren yöntemler kullanılarak polimer kompozit sentezlerinin daha çevre dostu hale geldiği görülmektedir. İletken polimerlerin ve bunların nanokompozitlerinin sentezindeki bu ilerlemeler, başta elektronik, enerji ve tıp olmak üzere çeşitli alanlarda çok çeşitli yeteneklere sahip, daha verimli ve işlevsel malzemelerin elde edilmesini mümkün kılacaktır. Biyomedikal uygulamalarda en çok kullanılan antimikrobiyal reaktifler dört spesifik grupta incelenir: gümüş, kuaterner amonyum ve klorheksidin gibi katyonik aktif bileşikler, klor ve peroksit içeren oksidanlar, formaldehit ve izotiazolonlar gibi organik ajanlar ve cıva ve bakır gibi elektrofilik maddeler (Hons, 2011; Lu vd, 2007). Biyomedikal uygulamalarda kimyasal stabilite, uçucu olmama ve cilt geçirimsizliği gibi çeşitli avantajlara sahip antimikrobiyal polimerlerin kullanımı gün geçtikçe daha da önem kazanmaktadır (Huang vd., 2016; Elena vd., 2018). Floro grubu, kuaterner amonyum grubu ve sülfobetain gibi farklı ve önemli kirlenme önleyici fonksiyonel gruplar, belirli son uygulamalar için polimerin ve kompozitin moleküler yapısında yeni düzenlemeler yapılmasının yolunu açmaktadır (Kenawy vd, 2007). Amfifilik polimerler, Gram-pozitif ve Gram-negatif bakterilere karşı gelişmiş biyosidal aktiviteleri nedeniyle katyonik polimerlere göre önemli bir avantaja sahiptir (Carmona-Ribeiro vd, 2013; Taylor vd, 2014).

Poliindol bazlı kompozitler, umut verici reaktif oksijen türleri (ROS) üretme kapasitesi nedeniyle olağanüstü anti-mikrobiyal özellikler sergiler ve mikrobiyal büyümeyi etkili bir şekilde engelleyebilir. Poliindol bazlı kompozitlerin, özelliklerinin karşılıklı sinerjistik olarak geliştirilmesi nedeniyle kompozitteki matrisine göre daha gelişmiş antimikrobiyal aktivite sergiledikleri bulunmuştur Srivastava vd, 2013). Ayrıca insan vücudu üzerinde daha az sitotoksik etkiye sahiptirler. Bu nedenle poliindol kompozitleri antibiyotiklerin yerine potansiyel bir alternatif olarak kullanılabilir ve etkili bir biyomedikal ajan olarak görev yapabilir. İndol kısımlarının oksidatif polimerizasyonu, poliindolün polimerik zinciri boyunca sabit monomer aralıklarında pozitif yükler üretir. Bu katyonik doğa, elde edilen PIN'in antibakteriyel aktivitesinden sorumludur. Poliindol zincirlerinin pozitif yükü, bakteri hücre duvarının negatif yüklü yüzeyleri ile elektrostatik olarak etkileşime girerek bakterilerin membran yapısını geri dönülemez şekilde kesintiye uğratır, hücrelere nüfuz etmesine yol açar ve protein aktivitesini etkili bir şekilde engeller. Yüklü yüzeylerle etkileşim ve reaktif türlerin hücre duvarına difüzyonu nedeniyle hayati bileşenlerin hücrelerden sızması sonucu hücre ölümü meydana gelir (Shoeb vd, 2018). Poliindolün özellikleri antibiyotiklere ve mantar önleyici ilaçlara potansiyel alternatifler haline getirilecek şekilde ince ayar yapılabilir.

Polimerik amonyum kuaterner bileşikleri, düşük uçuculuk, yüksek kimyasal stabilite, düşük toksisite ve düşük cilt tahrişi potansiyeli gibi özelliklerinden dolayı antibakteriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. DMAEMA monomeri, hidrofobik segmentin uygun ara parçası uzunluğuna bağlı olarak antibakteriyel aktivite gösteren güçlendirilmiş hidrofobik monomerle kopolimerleştirilmiştir (Wang vd, 2014). Amfifilik kopolimerler, önemli biyomateryaller olarak kabul edilmekte ve bakteriyel büyümeyi etkili bir şekilde inhibe etmeleri nedeniyle antibakteriyel ajanlar olarak kullanılmaktadır (Lu vd, 2007). Hidrofilik monomer 2-dimetilamino etilmetakrilat (DMAEMA) ve hidrofobik monomer metil metakrilat (MMA) ın kopolimerizasyonundan P(DMAEMA-co-MMA)'nın amfifilik kopolimerleri sentezlenmiş ve zehirli boya uygulamalarında biyofilm yapışmasının kontrolünü incelemişleridir (Mushtaq vd, 2021). Rawlinson vd, 2010; katyonik antimikrobiyal polimer PDMAEMA'nın klinik izolatların büyümesini engellemede daha etkili olduğunu bildirmiştir. PDMAEMA, nispeten düşük toksisitesi, yüksek

transfeksiyon verimliliği ve çok yönlü sentez stratejileri nedeniyle ideal bir gen vektörü olarak büyük potansiyel göstermiştir (Li vd, 2017). Kompozit materyallerin antioksidan özelliklerinin araştırılması, makrofajlara yönelik özellikleri ve makrofaj hedeflemesi nedeniyle iltihaplanma yerinde antienflamatuvar ilaçları dağıtmak için özellikle kullanılabilir (Herb vd, 2021).

Bu çalışmada, değişen miktarlarda hidrofilik ve hidrofobik polimerlerle hazırlanan amfifilik ve iletken kompozitlerin bakterilere karşı antimikrobiyal aktivitesini arttırmaya yönelik kolay bir yaklaşımı rapor ediyoruz. Bu amfifilik kompozitler yerinde polimerizasyon yöntemiyle sentezlendi. ROS üretme kapasitesine sahip PIN ve DMAEMA'da t-amin fonksiyonel grubunun varlığı sayesinde istenilen antioksidan özellikler elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kimyasal maddeler

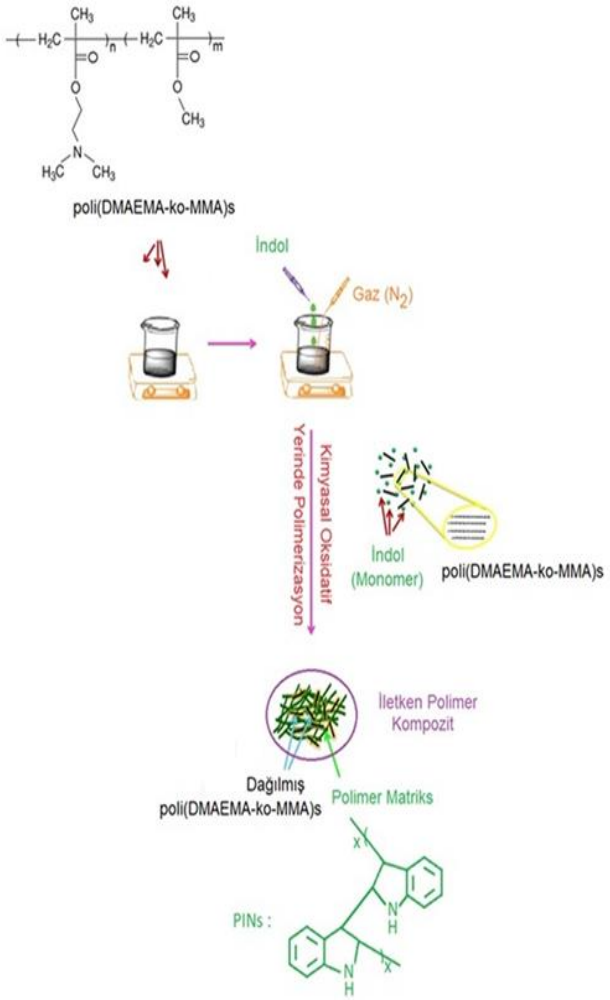
2-dietilamino etilmetakrilat (DMAEMA, %99), metilmetakrilat (MMA, %99), İndol (IN, %99), 2,2-Azobisizobutironitril (AIBN, %98), Demir(III) klorür ($FeCl_3$, %98), amonyum persülfat (APS), Kloroform ($CHCl_3$, %99) (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, ABD), kopolimer ve polimer kompozit sentezi reaksiyonlarında kullanıldı.

2.2. Polimer kompozitlerin sentezi

Bu çalışmada öncelikle amonyum persülfat başlatıcılı 1,4-dioksan çözeltisi içerisinde serbest radikal polimerizasyon tekniği ile 2-dimetilamino etil metakrilat ve etilmetakrilatın %50-%50 kütle oranlı kopolimeri hazırlandı.

Hazırlanan bu kopolimer, kütlece %10, 30, 50, 70 ve 90 PIN içeriğine sahip poli(DMAEMA-ko-MMA)/PIN iletken kompozitlerin literatürdeki yöntemde belirtildiği gibi hazırlanmasında kullanıldı (Billaud vd, 1995). Kompozitler sırasıyla PC1, PC2, PC3, PC4 ve PC5 kodlarıyla adlandırılmıştır. PC'lerin hazırlanma oranları Çizelge 1'de verilmiştir.

PC'lerin sentezinde öncelikle $FeCl_3$, 250 ml'lik üç ağızlı reaksiyon balonunda Tablo-1'de verilen oranlarda 25 ml kloroform içerisinde çözüldü. Reaksiyon balonu buzla 0 °C'ye soğutuldu. Bu arada reaksiyon balonuna azot gazı verildi. Daha sonra bu çözeltiye 25 ml kloroform içerisinde çözülmüş poli(DMAEMA-ko-MMA) polimeri ilave edilerek karıştırıldı. Son aşamada, 25 ml kloroform içerisinde çözündürülmüş indol monomeri, bir damlatma hunisi kullanılarak reaksiyon karışımına damla damla ilave edildi. Reaksiyon 3 saat sürdürüldü. Elde edilen PC'ler damıtılmış su ve kloroform ile yıkandı. Yıkama çözeltisinin rengi berraklaşınca yıkama sonlandırıldı. Elde edilen PC'ler süzüldü, vakum atmosferinde 40 °C'de kurutuldu ve analiz için saklandı. Kompozit sentezi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kompozit sentezi şematik gösterimi

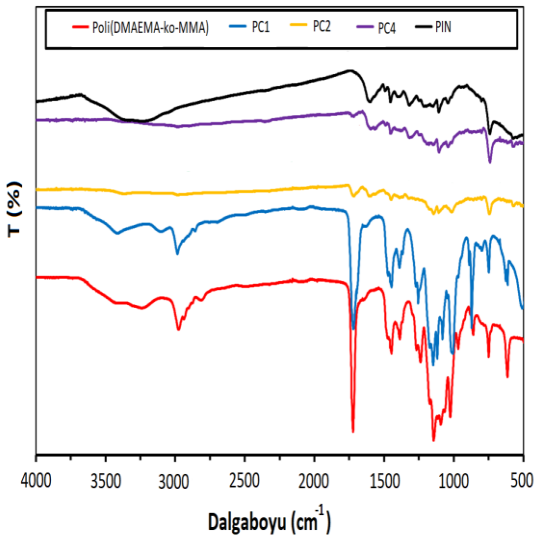
2.3. Karakterizasyon Teknikleri ve Ölçümler

PC'lerin Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektrumları, 400–4000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında Perkin Elmer Spectrum Two (UATR) IR Spektrometresi ile kaydedildi. TGA analizleri Hitachi 7000 TGA/DTA model termogravimetrik analiz cihazı ile oda sıcaklığı – 1000 °C aralığında azot atmosferi altında, 10 °C/dakika ısıtma hızında gerçekleştirildi. İletken polimer kompozitlerin yüzey morfolojisini incelemek için Zeis EVO LS10 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve VEECO Multimode 8 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanıldı. AFM analizlerinde mikroskop temas modunda kullanılmış ve ve konsolun tipik kuvvet sabiti 0,15 N m^{-1} olarak ayarlanmıştır. 1 Hz tarama hızı kullanılmıştır. Test materyallerinin toplam antioksidan durumu (TAS) düzeyi Rel Assay marka ticari kit (Rel Assay Kit Diagnostics, Türkiye) kullanılarak ölçüldü. Sonuçlar mmol Trolox eşdeğeri/lt olarak ifade edildi. Bu yöntem, daha stabil bir 2,2'-azino-bis(3-etilbenztiyazolin-6-sülfonik asit) (ABTS) radikal katyonunun antioksidanlar tarafından

karakteristik renginin ağartılmasına dayanmaktadır (Erel, 2004). Toplam oksidan durum (TOS) düzeyi Rel Assay marka ticari kit (Rel Assay Kit Diagnostics, Türkiye) kullanılarak ölçüldü. Bu yöntem, asidik ortamda çeşitli oksidatif türlerin varlığında demir iyonunun ksilenol turuncusu tarafından oksidasyonu yoluyla ferrik iyonun aromatik grupların gerilme titreşimleri nedeniyle 1600 cm-^{1} 'de absorpsiyon bandları görülmektedir. Burada PC'lerin spektrumlarında $–CH_2–$ ve $–CH_3$ gruplarının gerilme titreşimleri nedeniyle 2920 cm^{-1} 'de soğurma bandları görülmektedir (Wang vd, 2020). PC'lerde 1740 cm^{-1} 'deki spektrum absorpsiyon bandı, DMAEMA ve MMA ünitesinde C=O grubu esterin gerilme titreşimini sergilemiştir (Değirmenci, 2005). 2842 cm^{-1} 'deki band, $N(CH_3)_2$ grubunun C-H gerilme titreşimine atfedilmiştir (Zielinska vd, 2016; Okten vd, 2019). Her iki metakrilat ünitesinde'de 1150-1250 cm^{-1} 'deki band C-O-C'nin gerilme titreşimini göstermektedir (Li vd, 2012). Her spektrumda, tersiyer aminin C-N gerilme titreşimi için 1020 cm^{-1} 'deki band, kopolimer zincirinde DMAEMA segmentinin varlığını doğrulamaktadır. PC'lerin FTIR spektrumlarından kompozitlerdeki PIN oranı arttığında (PC1'den PC5'e) 3390 cm^{-1} 'deki PIN'e ait NH pikine ait absorpsiyon yoğunluğunun arttığını söyleyebiliriz. Ayrıca kompozitlerde PC1 den PC4 e doğru poli(DMAEMA-ko-MMA) konsantrasyonu azalmış ve buna göre C=O ve C-N grubunun band yoğunluğu da azalmıştır. DMAEMA hidrofilik yapıdadır ve Şekil-2'de 3000–3500 cm^{-1} 'deki O-H grubu nem tutma durumundan ileri gelmektedir. PC4'te poli(DMAEMA-ko-MMA) konsantrasyonunun çok düşük olması ve PIN içeriğinin daha yüksek olması nedeniyle –OH bandı kaybolmuştur.

Çizelge 1. Kompozitlerin hazırlanmasında kullanılan maddeler ve miktarları.

Kompozit Kodu	Kompozitin İndol içeriği (%, m/m)	poli(DMAEMA-ko-MMA) miktarı (g)	$FeCl_3$ miktarı (g)	$FeCl_3$ miktarı (mol x 10^2)	İndol miktarı (g)	İndol miktarı (mol x 10^2)
PC1	10	3,6	1,45	0,90	0,53	0,45
PC2	30	2,8	4,37	2,70	1,58	1,35
PC3	50	2,0	7,25	4,48	2,62	2,24
PC4	70	1,20	10,20	6,30	3,68	3,15
PC5	90	0,40	13,05	8,06	4,72	4,03

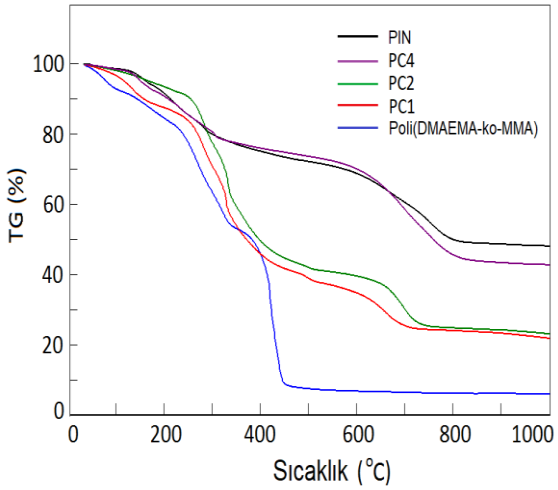


Şekil 2. Polimerlerin ve kompozitlerin FTIR spektrumları

3. Bulgular

3.1. FTIR analizi

PIN, poli(DMAEMA-ko-MMA) ve PC'lerin FTIR spektrumları Şekil-2'de verilmiştir. Poli(DMAEMA-co-MMA) spektrumunda 1740 cm^{-1} 'deki absorpsiyon bandı, esterin C=O grubuna ait gerilme titreşimini göstermiştir. Poli(İndol) spektrumunda, -C=C- ölçülmesine dayanmaktadır (Erel, 2004). Ferrik iyon, asidik ortamda Xylenol Orange ile renkli bir bileşik oluşturur. Bu renk değişimi spektrofotometrik olarak ölçülebilen toplam oksidan molekül miktarını belirler. (Erel, 2004). Tüm deneyler kit üreticisinin prosedürüne göre yapıldı. Sonuçlar µmol H_2O_2 eşdeğeri/lt olarak ifade edildi (Erel, 2005).



Şekil 3. Polimerlerin ve kompozitlerin TGA eğrileri

3.2. Termogravimetrik çalışmalar

PIN, poly(DMAEMA-ko-MMA) ve PC'lere ait TGA eğrileri Şekil-3 'de gösterilmektedir. TG eğrilerinden PC'lerdeki PIN oranı arttıkça kompozitlerin kalıntı bırakma oranının da arttığı görülmektedir. Poli(DMAEMA-ko-MMA) oranı

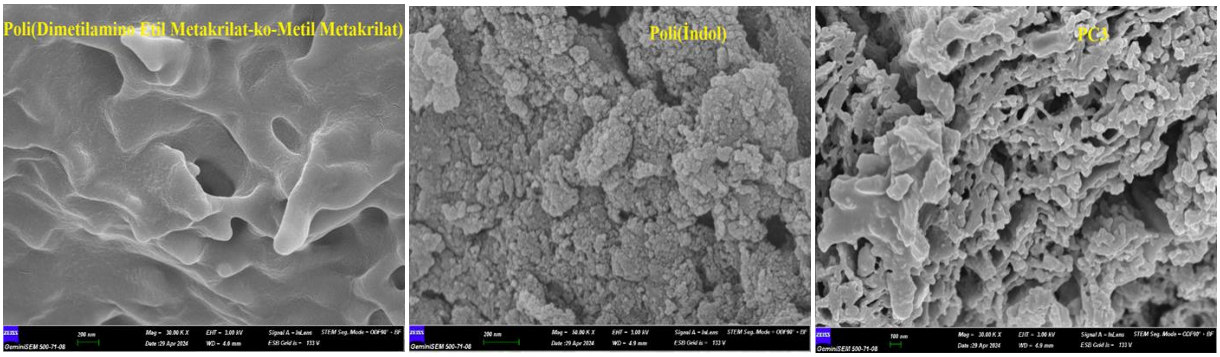
yüksek olan PC'lerin 400 °C civarında yaklaşık %20 kütle kaybına uğradığı ve daha kararlı davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. PIN oranı arttıkça PC'lerin daha yüksek sıcaklıklarda (700-1000 °C) stabil olduğu ve %40-48 oranlarında kalıntı bıraktığı görülmektedir. Bu durumun PIN'deki 6'lı ve 5'li gruplardan kaynaklandığı söylenebilir. Literatürde PIN'ın bozunma sıcaklığının polianilin, politiyofen ve polipirol gibi iletken polimerler için bildirilen değerlerden daha yüksek olduğu bildirilmektedir (Syed Abthagir vd, 1998)

Çizelge 2. İncelenen bileşiklerin termal analiz sonuçları.

Örnek adı	Maksimum bozunma sıcaklığı (°C)	%40 Ağırlık kaybı sıcaklığı (°C)	400 °C'deki Kütle kaybı (%)	700 °C'deki Kütle kaybı (%)	1000 °C'deki Kalıntı miktarı (%)
PIN	480	714	19	40	48
PC4	456	698	22	41	43
PC2	422	350	51	69	23
PC1	410	326	55	76	22
Poli(DMAEMA-ko-MMA)	390	310	56	94	5

3.3. Morfolojik analiz

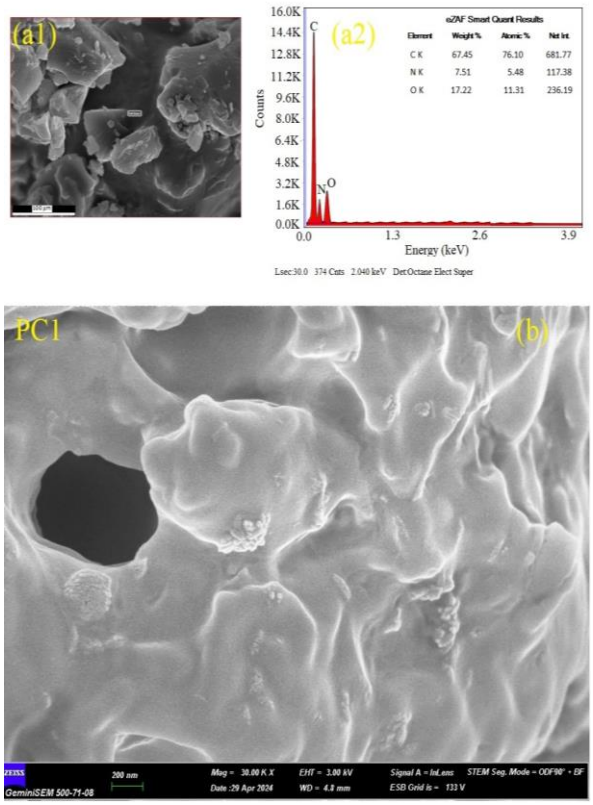
Malzemelerin özelliklerinin büyük ölçüde morfolojik yapılarına bağlı olduğu önemli bir gerçektir. Fizikokimyasal özellikler açısından polimer kompozitlerdeki bileşenlerin dağılımı son derece önemlidir. Poli(DMAEMA-ko-MMA), PIN ve PC4'e ait SEM görüntüleri Şekil-4 'de verilmektedir. Poli(DMAEMA-ko-MMA)'nın heterojen ve damarlı bir yapıya sahip olduğu, bu durumun yalıtkan fazdan ve kopolimer yapısının amfifilik özelliklerinden kaynaklandığı söylenebilir. Poliindolün SEM görüntüsünde girintili çıkıntılı yüzey yapısı, iletken polimer fazının homojen bir şekilde dağılmadığını göstermektedir. Görüntüde görülen çıkıntılar veya gözenekler muhtemelen iletken polimerdeki π - π etkileşimlerinden kaynaklanan amorf ve yarı kristalin fazın ayrışmış bölgelerini temsil etmektedir. PC4'ün SEM görüntüsünde iletken polimer PIN, yalıtkan matris poli(DMAEMA-ko-MMA) içinde bir ağ yapısı oluşturmuşsa, bu tür görüntüler kompozitin iletkenlik ve biyolojik özelliklerini artıran mikro yapılarını ortaya çıkarabilir. Kompozitteki yalıtkan kopolimer matrisi malzemenin genellikle mekanik dayanımını artırır ve kompozitin elektriksel yalıtım özelliklerini düzenler. Ancak, iletken polimerle bileşim ve karışım oranı önemlidir. Faz ayrışması çok yoğun ise kompozitin mekanik, biyolojik ve elektriksel performansı olumsuz etkilenebilir. İletken polimer fazın homojen dağılımı, malzemenin performansı için kritiktir. Yüzeyde gözlemlenen girintiler gözenekli bir yapıyı işaret eder. Bu durum, kompozitin dielektrik özelliklerini etkileyebilir (Mushtaq vd, 2021).



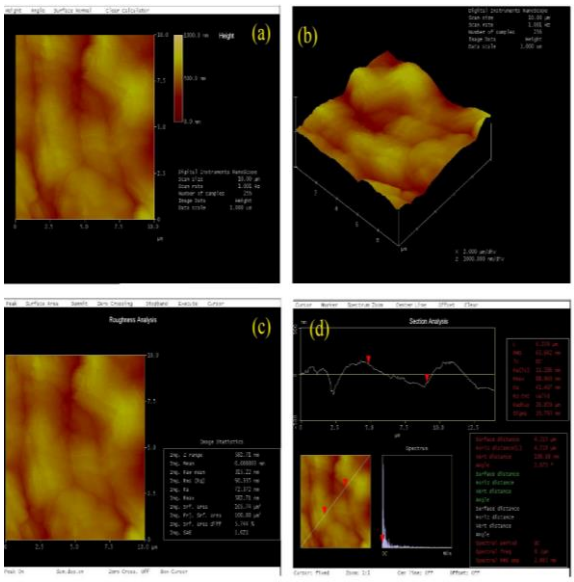
Şekil 4. Poli(DMAEMA-ko-MMA), PI ve PC4'ün FESEM görüntüleri

PC1'in FESEM EDX alan spektrumları ve EDX analizi yapılan yüzeyler Şekil 5(a1-a2)'de görülmektedir. C, N ve O elementlerinin zirveleri sırasıyla 0,270, 0,414 ve 0,535 keV olarak görülmektedir. PC1'ün FESEM görüntüleri Şekil 5(b)'de verilmiştir. FESEM görüntüsünde görüldüğü gibi PC1'in homojen olmayan, bulutumsu ve süngerimsi bir yapıya sahip olduğunu söyleyebiliriz. Aynı zamanda PC1'ün yüzey incelemesi de AFM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İnceleme, temas modu kullanılarak bir mikroskopla gerçekleştirildi. Çalışmada konsolun tipik kuvvet sabiti 0,15 Nm^{-1}'de sabit tutulmuştur. PC1'in yüzey morfolojisi incelemesi 1.001 Hz tarama hızında yapılmıştır. PC1'ün AFM görüntülerinde derinliklerde koyu renkler, yüksekliklerde ise açık renkler görülmektedir [Şekil 6(a)'da]. PC1'in AFM'deki tipik üç boyutlu (3D) görüntüsü Şekil 6(b)'de gösterilmektedir. AFM görüntüsünde PC1'in hetorejen ve bulanık-bulutumsu bir forma sahip olduğu söylenebilir. Profil

olarak yatay bir bölüm seçilerek 2D AFM görüntüsü (10 µm × 10 µm) ve PC1'ün kesiti elde edilmiştir. Şekil 6(d)'de PC1'ün RMS değeri 65.642 nm, yüzey mesafesi değerleri: 4.315 µm, yatay mesafe: 4.219 µm ve dikey mesafe: 196.98 nm gösterilmektedir. Bu verilerden; PC1'in çıplak cam yüzeyinde düzgün, sıkı paketlenmiş ve homojen olmayan bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5. (a1-a2) FESEM-EDX saha analizi ve **(b)** hazırlanan PC1'in FESEM' görüntüleri



Şekil 6. PC1'in (a) 2D AFM görüntüsü (b)3D AFM görüntüsü (c) Pürüzlülük analizi (d) kaplı camın kesit analizi. (Tarama boyutu 10 µm x 10 µm'dir)

3.4. Toplam Antioksidan (TAS) ve Toplam Oksidan Durumunun (TOS) Tayini

Oksidan ve antioksidan moleküllerin belirlenmesinde kullanılan toplam antioksidan durum (TAS) ve toplam oksidan durum (TOS) analizleri, uzun ömürlü reaktifler kullanılarak kolay, otomatik ve ucuz bir yöntemle güvenilir ve hassas sonuçlar elde etmemize olanak sağlar.

TOS seviyelerinin TAS seviyelerine oranının yüzdesi olarak ifade edilen oksidatif stres indeksi (OSI) hesaplandı. Sonuçlar "keyfi birimler" (OSI) olarak ifade edildi (Feng vd, 2012).

$$A_2 - A_1 = \Delta Abs \quad (1)$$

$$TAS = [\Delta Abs\ H_2O_2 - \Delta Abs\ \text{Örnek}] / [\Delta Abs\ H_2O_2 - \Delta Abs\ Standart] \quad (2)$$

$$TOS = \Delta Abs\ \text{Örnek} / \Delta Abs\ Standart\ x10^{\text{standart'ın konsantrasyonu}} \quad (3)$$

$$OSI\ (Arbitrary\ Unit) = TOS\ (\mu mol\ H_2O_2\ Eq/L) / TAS\ (mmol\ Eq/L) X10 \quad (4)$$

Bağıntılarından TAS, TOS ve OSI değerleri hesaplandı ve sonuçları Çizelge-3'de verildi. Ölçümlerde gözlemlenen renk değişikliklerine ait görseller Şekil-7'de görülmektedir. Çizelge-3'den kompozitlerdeki PIN oranının artması ile antioksidan etkinin arttığı görülmektedir.

Serbest radikallerin oluşumuna engel olan ve oluşturdukları hasarı önleyen değişik mekanizmalar bulunmaktadır. Antioksidanlar 4 farklı şekilde etkiye sahiptirler:

1. Toplayıcı Etki: Serbest oksijen radikallere etki ederek onların zayıflamasına yol açar.
2. Bastırıcı Etki: Serbest radikallerle etkileşip onlara hidrojen eklenmesine sebep olur ve aktivitelerini azaltır veya inaktif hale gelmelerine sebep olur. Vitaminler ve flavonoidler bu etkiye haizdirler.
3. Zincir Kırıcı Etki: Serbest oksijen radikallerini bağlayıp, zincirlerini kırıp fonksiyonlarını yok eder. Hemoglobin, seruloplazmin ve mineraller bu etkiye haizdirler.
4. Onarıcı Etki: Serbest radikallerin oluşturduğu hasar giderilir. Endojen antioksidanlar; enzimatik ve nonenzimatik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

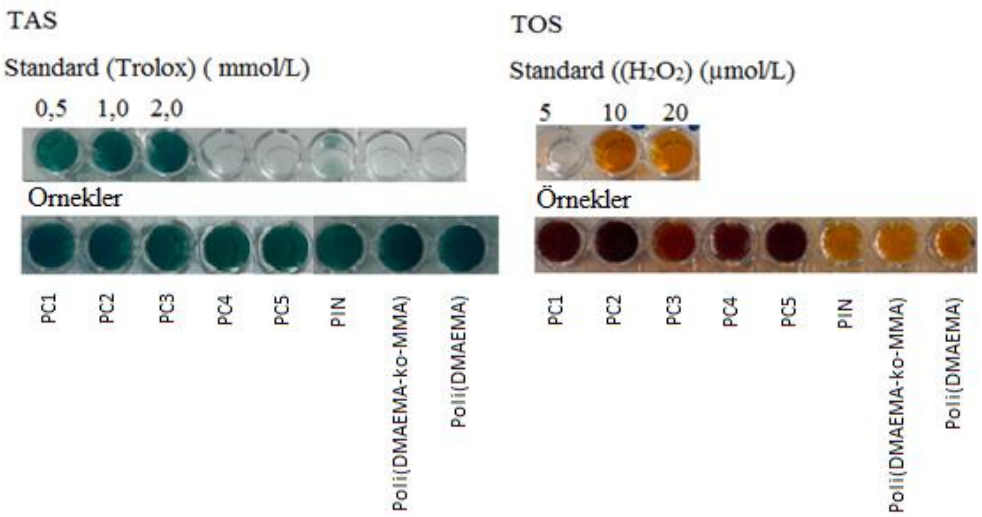
4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada sentezlenen poli(DMAEMA-ko-MMA) polimerinde indol iletken polimeri yerinde polimerizasyon yöntemiyle polimerize ederek bir seri kompozit elde edildi. Bu moleküllerin kimyasal yapısı spektroskopik yöntemler kullanarak aydınlatıldı ve yüzey morfolojisi karakterize edildi. PIN oranının artması ile antioksidan

etkinin arttığı görülmektedir. FTIR analizlerinde tanımlanan indol grupları ve $N(CH_3)_2$ gibi elektron çekici etkiye sahip gruplar PC'lerdeki antioksidan aktiviteden sorumludur. Poli(DMAEMA-ko-MMA)/PIN ompozitlerinin antioksidan ve oksidan aktiviteleri bu çalışma ile ilk kez incelendi. Elde edilen sonuçlardan kompozitlerin tıp alanında alternatif ürün olarak kullanılabileceği görülmektedir.

Çizelge 3. TAS, TOS ve OSİ seviyeleri

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PIN	Poli(DMAEMA-ko-MMA)	Poli(DMAEMA)
TAS (mmol Trolox Equiv/L)	1,076	1,115	1,158	1,214	1,263	2,278	1,257	1,259
TOS (µmol H_2O_2 Equiv/L)	1,319	1,519	2,114	2,126	2,392	12,840	10,471	0,321
OSİ (Arbitrary Unit)	0,816	0,734	0,548	0,571	0,,528	0,177	0,120	3,922



Şekil 7. TAS, TOS ve OSİ ölçümleri

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı
Yazar-1: Kaynaklar, Araştırma, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak.

Yazar-2: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak.

Çıkar Çatışması Beyanı
Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği
Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Bu araştırma; Uşak Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (UÜBAP) tarafından desteklenmiştir (Proje No:2017/TP025).

5. Kaynaklar

Billaud, D., Maarouf, E. B., Hannecart, E., 1995. Chemical oxidation and polymerization of indole. *Synthetic Metals,* **69,** 571–572. https://doi.org/10.1016/0379-6779(94)02573-H.

Boehler, C., Oberueber, F., Asplund, M., 2019. Tuning drug delivery from conducting polymer films for accurately controlled release of charged molecules. *Journal of Controled Release*, **304,** 173–180. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.05.017

Carmona-Ribeiro, A. M., de Melo Carrasco, L. D., 2013. Cationic antimicrobial polymers and their assemblies. *International Journal of Molecular Sciences*, **14,** 9906–9946. https://doi.org/10.3390/ijms14059906

Choudhary, R. B., Ansari, S., ve Majumder, M., 2021. Recent advances on redox active composites of

metal-organic framework and conducting polymers as pseudocapacitor electrode material. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* **145**, 110854. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110854

Değirmenci, M., 2005. Synthesis and characterization of Novel well-defined end-functional macrophotoinitiator of poly(MMA) by ATRP. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, **42A**, 21–30. https://doi.org/10.1081/MA-200040949

Dong, R., Ma, P. X., ve Guo B., 2020. Conductive biomaterials for muscle tissue engineering. *Biomaterials,* **229,** 119584. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2019.119584

Elena, P.,ve Miri, K., 2018. Formation of contact active antimicrobial surfaces by covalent grafting of quaternary ammonium compounds. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces,* **169,** 195–205. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.04.065

Erel, O., 2004. A novel automated direct measurement method for total antioxidant capacity using a new generation, more stable ABTS radical cation. *Clinical Biochemistry,* **37**, 277-285. https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2003.11.015.

Erel, O., 2005. A new automated colorimetric method for measuring total oxidant status. *Clinical Biochemistry,* **38**, 1103-1111. https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2005.08.008.

Fadel, M., Fadeel, D. A., Ibrahim, M., Hathout, R. M., ve El-Kholy, A. I., 2020. One-step synthesis of polypyrrole-coated gold nanoparticles for use as a photothermally active nano-system. *International Journal of Nanomedicine,* **15,** 2605–2615. https://doi.org/10.2147/IJN.S250042

Fan, Y., Bai, W., Mu, P., Su, Y., Zhu, Z., Sun, H., Liang, W., Li, A., 2020. Conductively monolithic polypyrrole 3-D porous architecture with micron-sized channels as superior salt-resistant solar steam generators. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **206**, 110347. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110347

Feng, J.F., Lu, L., Zeng, P., Yang, Y.H., Luo, J., Yang, Y.W., Wang, D., 2012. Serum total oxidant/antioxidant status and trace element levels in breast cancer patients. *international journal of clinical oncology*, **17**, 575-583. http://dx.doi.org/10.1007/s10147-011-0327-y

Guo, B., Ma, P. X., 2018. Conducting polymers for tissue engineering. *Biomacromolecules,* **19(6),** 1764–1782. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.8b00276

Herb, M., Schramm, M., 2021. Functions of ROS in macrophages and antimicrobial immunity. *Antioxidants,* **10(2),** 313. https://doi.org/10.3390/antiox10020313

Hons, J. C., 2011. The development of novel antifouling materials: A multi-disciplinary approach. Ph.D.Thesis, Dublin City University, Dublin, Ireland.

Huang, K., Yang, C., Huang, S., Chen, C., ve Lu, Y., 2016. Recent advances in antimicrobial polymers. *International Journal of Molecular Sciences*, **17**, 1578. https://doi.org/10.3390/ijms17091578

Idumah, C. I,, Ezeani, E. O., Nwuzor, I. C., 2021. A review: Advancements in conductive polymers nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology andMaterials,***60,**756–783. https://doi.org/10.1080/25740881.2020.1850783

Jangid, N. K., Jadoun, S., Kaur, N., 2020. A review onhigh-throughput synthesis, deposition of thin films and properties of polyaniline. *European Polymer Journal*, **125**, 109485.

https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109485

Kenawy, E. R., Worley, S. D., Broughton, R., 2007. Thechemistry and applications of antimicrobial polymers: A state-of-the-art review. *Biomacromolecules*, **8(5)**, 1359-1384. https://doi.org/10.1021/bm061150q

Krukiewicz, K., Bednarczyk-Cwynar, B., Turczyn, R., Zak, J. K., 2016. EQCM verification of the concept of drug immobilization and release from conducting polymer matrix. *Electrochimica Acta,* **212,**694–700. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.07.055

Lakard, S., Morrand-Villeneuve, N., Lesniewska, E.,Lakard, B., Michel, G., Herlem, G., Gharbi, T., Fahys, B., 2007. Synthesis of polymer materials for use as cell culture substrates. *Electrochimica Acta*,**53**,1114–1126. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.04.098

Li, J., Jiang, T. T., Shen, J. N., Ruan, H. M., 2012.Preparation and characterization of PMMA and its derivative via RAFT technique in the presence of disulfide as a source of chain transfer agent. *Journal of Membrane and Separation Technology,***1(2)**,117–128. https://doi.org/10.6000/1929-6037.2012.01.02.6

Li, Y., Ju, D., 2017. Chapter 12 - The application,neurotoxicity, and related mechanism of cationic polymers. *Neurotoxicity of Nanomaterials and Nanomedicine.* Pages 285-329. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804598-5.00012-X

Lu, G., Wu, D., Fu, R., 2007. Studies on the synthesisand antibacterial activities of polymeric quaternary ammonium salts from dimethylaminoethyl methacrylate. *Reactive and Functional Polymers*, **67**, 355–366. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2007.01.008

Mushtaq, S., Ahmad, N. M., Mahmood, A., Iqbal, M.,2021. Antibacterial amphiphilic copolymers of dimethylamino ethyl methacrylate and methyl methacrylate to control biofilm adhesion for antifouling applications, Polymers, 13, 216. https://doi.org/10.3390/polym13020216

Nair, S. S,, Mishra, S. K., Kumar, D., 2019. Recentprogress in conductive polymeric materials for biomedical applications. *Polymers for Advanced Technologies*, **30,** 2932–2953. https://doi.org/10.1002/pat.4725

Namsheer, K., Rout, C. S., 2021. Conducting polymers:A comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. *RSC Advances*, **11**, 5659–5697. https://doi.org/10.1039/D0RA07800J

Nguyen, D. N., Yoon, H., 2016. Recent advances innanostructured conducting polymers: From synthesis to practical applications. *Polymers*, **8(4**),118. https://doi.org/10.3390/polym8040118

Nie, S., Li, Z., Yao, Y., Jin, Y., 2021. Progress insynthesis of conductive polymer poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *Frontiers in Chemistry*, **9**, 803509. https://doi.org/10.3389/fchem.2021.803509

Okten, N. S., Canakci, C. C., Orakdogen, N., 2019. Hertzian elasticity and triggered swelling kinetics of poly(amino ester)-based gel beads with controlled hydrophilicity and functionality: A mild and convenient synthesis via dropwise freezing into cryogenic liquid. *European Polymer Journal*,**114**,176–188. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.02.018

Pal, T., Banerjee, S., Manna, P. K., Kar, K. K., 2020.Characteristics of Conducting Polymers BT. In Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials I: Characteristics; Kar, K. K. Ed.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, pp. 247–268. ISBN 978-3-030-43009-2. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43009-2

Park, Y., Jung, J., Chang, M., 2019. Research progresson conducting polymer-based biomedical applications. *Applied Sciences*, **9(6)**, 1070. https://doi.org/10.3390/app9061070

Rawlinson, L. A., Ryan, S. M., Mantovani, G., Syrett, J. A.,Haddleton, D. M., Brayden, D. J., 2010. Antibacterial effects of poly(2-(dimethylamino ethyl)methacrylate) against selected gram-positive and gram-negative bacteria. Biomacromolecules, **11,** 443–453. https://doi.org/10.1021/bm901166y

Shoeb, M., Mobin, M., Rauf, M.A., Owais, M., Naqvi,A.H., 2018. In vitro and in vivo antimicrobial evaluation of graphene–polyindole (Gr@PIn) nanocomposite against methicillin-resistant staphylococcus aureus Pathogen. *ACS Omega*, **3,** 9431–9440. https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00326ACS

Srivastava, A., Singh, P., Kumar, R., Verma, S. K., Kharwar, R. N., 2013. Indole-based polymer and its silver nanocomposite as advanced antibacterial agents: synthetic path, kinetics of polymerization and applications. *Polymer International,* **62,** 210–218. https://doi.org/10.1002/pi.4283

Syed Abthagir, P., Dhanalakshmi, K., Saraswathi, R.,1998. Thermal studies on polyindole and polycarbazole, *Synthetic Metals,* **93**, 1–7. https://doi.org/10.1016/S0379-6779(98)80125-2.

Taylor, P., Zhou, Z., Calabrese, D. R., Taylor, W., Finlay, J.A., Callow, M. E., Callow, J. A., Fischer, D., Kramer, E. J., Ober, C. K., 2014. Amphiphilic triblock copolymers with PEGylated hydrocarbon structures as environmentally friendly marine antifouling and fouling-release coatings. *Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research,* **30(5)**, 589-604. https://doi.org/10.1080/08927014.2014.897335

Wang, F.P., Yuan, T., Li, W.X., Zhang, J.Y., Wang, Q.Z.,2014. Synthesis and characterization of amphiphilic copolymer poly[2-(dimethylamino)ethyl methacrylate-co-methyl methacrylate]. *Advanced Materials Research,* **936,** 776–779.

Wang, Y., Shen, X., Ma, S., Guo, Q., Zhang, W., Cheng, L.,Ding, L., Xu, Z., Jianga, J., Gao, L., 2020. Oral biofilm elimination by combining iron-based nanozymes and hydrogen peroxide-producing bacteria. *Biomaterials Science,* **8**(9), 2447–2458. https://doi.org/10.1039/c9bm01889a

Zielinska, D., Stawski, D., Komisarczyk, A., 2016.Producing a poly(N,N-dimethylaminoethyl methacrylate) nonwoven by using the blowing out method. *Textile Research Journal,* **86**, 1837–1846. https://doi.org/10.1177/0040517515617420

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1553689
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035801 (667-675)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035801 (667-675)

Çerkezköy (Tekirdağ) İlçesi Yeraltı Su Kalitesi ve Kirlenme Potansiyelinin Araştırılması

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 20.09.2024
Kabul/Accepted: 07.01.2025
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Investigation of Groundwater Quality and Pollution Potential in Çerkezköy (Tekirdağ) District

Beyza ARAL[1], Ali Rıza DİNÇER[2], İbrahim Feda ARAL[3*]

[1] *Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği ABD, Tekirdağ, Türkiye*
[2] *Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye*
[3] *Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye*

Öz

Bu çalışmada Tekirdağ ili Çerkezköy ilçesinin yeraltı sularının fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırılmıştır. Bu özelliklerin insan ve canlı yaşamına etkisi incelenmiştir. Yeraltı suları, doğal kaynaklar arasında en büyük tatlı su kaynağıdır ve insanlar tarafından birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılır. Yeraltı suyu, dünya nüfusunun çoğunluğu için birincil su kaynağı olarak kabul edilir. Bu çalışma, Tekirdağ Su ve Kanalizasyon İdaresi'nin (TESKİ) kontrolündeki Çerkezköy içme suyu kuyularını kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Jeolojik yapı, yeraltı suyu seviyeleri ve kimyasal analizler incelenmiştir. Yapılan analizlerde bazı kuyularda arsenik konsantrasyonları 10 µg/L üst sınır değerini aşmaktadır. Tarımsal kirliliğin bir belirtisi olarak ÇRK 2, ÇRK 8 ve ÇRK 24 kuyularında amonyum konsantrasyonu limit üst sınır (0.5 mg/l) değerlerini aşmaktadır. Bulgular, yeraltı su seviyelerinin sürekli düştüğünü, bazı kuyularda kirlenme belirtileri olduğunu ve mevcut su kaynaklarının uzun vadede içme suyu açısından yetersiz kalacağını göstermektedir. Bu durum, enerji tüketimi ve yeni su kaynakları yaratma gerekliliği açısından önemli ekonomik ve çevresel sonuçlar doğuracaktır.

Anahtar Kelimeler *Yeraltı Suyu; Fiziksel ve Kimyasal Özellikler; İçme Suyu Kalitesi; Kirlilik*

Abstract

In this study, the physical and chemical properties of groundwater in Çerkezköy district of Tekirdağ province were investigated. The effects of these features on human and living life have been examined. Groundwater is the largest freshwater source among natural resources and is widely used by people in many areas. Groundwater is considered as the primary water source for the majority of the world's population. This study comprehensively evaluated Çerkezköy drinking water wells under the control of Tekirdağ Water and Sewerage Administration (TESKİ). Geological structure, groundwater levels and chemical analyses were examined. In the analyses, arsenic concentrations in some wells exceeded the upper limit value of 10 µg/L. As an indication of agricultural pollution, ammonium concentration exceeded the upper limit (0.5 mg/l) values in ÇRK 2, ÇRK 8 and ÇRK 24 wells. The findings show that groundwater levels are continuously decreasing, there are signs of pollution in some wells and that the existing water resources will be insufficient for drinking water in the long term. This will have significant economic and environmental consequences in terms of energy consumption and the need to create new water resources.

Keywords *Groundwater; Physical and Chemical Properties; Drinking Water Quality; Pollution.*

1. Giriş

Yeraltı suyu kirliliği, endüstriyel atıkların deşarjı, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan kirleticiler, kentsel gelişim ve fosil yakıtların kullanımı gibi insan etkileriyle giderek artmaktadır. Bu durum, yeraltı suyu kaynaklarının sürdürülebilirliğini ve içme suyu kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Çerkezköy gibi yerlerde içme suyu kaynaklarının yönetimi, özellikle sanayileşme ve nüfus artışı gibi baskılar altında zorlu bir süreçtir. Bu tür yerlerde, yeraltı suyu kaynaklarının sürdürülebilirliğini sağlamak için bölgesel özellikler ve su kaynaklarının durumu dikkate alınmalıdır. Bu çerçevede, yeraltı suyu kaynaklarının izlenmesi ve yönetimi için entegre bir yaklaşım benimsenmelidir. Dünya genelinde yeraltı suyu kirliliğini belirlemeye yönelik çalışmalar giderek hız kazanmaktadır. Pakistan'ın Bhimber, Azad Jammuve Kashmir bölgelerinde 12 adet yeraltı su kuyusundan numune alınarak yaptıkları çalışmalarında, pH, bulanıklık gibi çeşitli fizikokimyasal ve biyolojik parametreler için analiz edilmiştir. Değerler büyük ölçüde patojenik sularla kontamine olduğunu ve bazı fizikokimyasal değerler Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) tavsiye ettiği sınırlarından sapmış olduğu tespit edildiği için devletin tüm bölgelere filtre tesisi sağlaması gerektiği belirtilmiştir (Alsalme vd., 2021). Gujarat eyaletindeki Satlasana Taluka'nın kırsal çevresinin yeraltı suyu kalitesini incelemişlerdir. Ağırlıklı Aritmetik Su Kalitesi Endeksi (WAWQI) ve Kanada Su Kalitesi Endeksi uygulanarak 9

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author: İbrahim Feda ARAL* *e-posta/e-mail: iaral@nku.edu.tr*

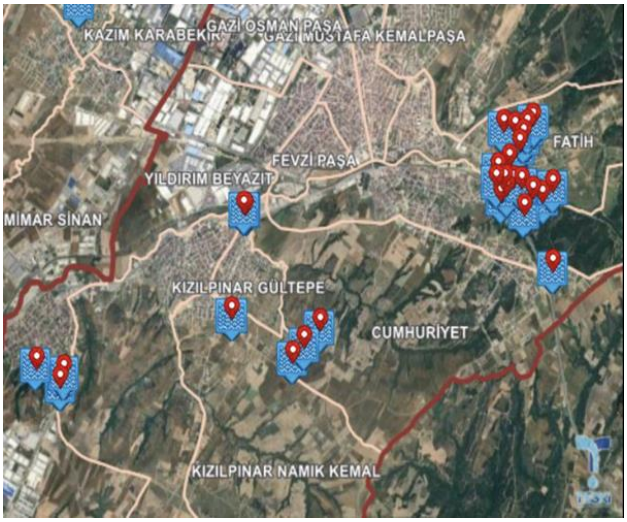
köyden alınan su numuneleri 6 ay boyunca değerlendirilmiştir. Kaynakların % 46'sı iyi su kalitesinde bulunurken, CCMEWQI (Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index) kullanılarak kaynakların %54'ünün iyi su kalitesinde olduğu tespit edilmiştir (Khatri vd., 2020). Bu parametrelerin uygun geleneksel stratejilerle arıtılması, yeraltı suyunu içme amaçlı güvenli, bölgedeki yeraltı suyu kalitesinin bozulmamış durumuna ışık tutmaktadırlar (Kamboj vd., 2020).

Harran civarında ve genel olarak Harran Havzası'nın güney kesiminde derin akiferden beslenen çok sayıda kuyunun yeraltı suyu kalitesinin kötüleştiğini, kirlenmiş yeraltı suyu kuyularının birçoğunun uygunsuz sulama uygulamaları sonucu kullanılamaz hale geldiğini tespit etmişlerdir (Yeşilnacar vd., 2011). Harran ovası genelinde EC ve NO_3^- değerleri 2005 (maks. 8235 µS/cm, 720 mg/L) ile 2015 (maks. 2510 µS/cm, 327 mg/L) yılları arasında azalmıştır (Yetiş vd., 2021). Yeşilnacar ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada: Güneydoğu Anadolu bölgesinde dört köyün yeraltı sularındaki florür konsantrasyonlarının 1,20 mg/L'den fazla olduğu ve bu köylerdeki çocuklarda diş florozuna neden olduğu belirlendi (Yeşilnacar vd. 2016). Arkoç (2005), çalışmasında, Ergene Havzası, Çorlu – Çerkezköy kesiminin jeolojisi, hidrojeolojisi, bölgedeki akiferin jeohidrolik özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Akiferi geometrisi, akifere ait karakteristik özellikler ve sayısal değerleri, hidrokimyasal fasiyesi ve yeraltı suyunun kirlilik durumu ortaya koymaya çalışmıştır. Sonuçta Ergene Formasyonunun araştırma alanındaki ana akifer olduğu, yarı geçirimsiz ve geçirimli ortamlardan oluştuğu belirtilmektedir. Yeraltı suyu, yer altındaki geçirimli jeolojik ortamın doygun bölgesinde bulunan kuyuları, kaynakları ve akarsu, göl, deniz gibi kütlelerini besleyen sudur, bütün yeraltı sularının kaynağı yağıştır, yüzeye düşen yağış zemini ıslatarak yerçekimi etkisi ile doymamış bölgeden geçerek aşağıya doğru hareket eder, su seviyesi olarak adlandırılan doymuş bölgenin üst sınırına ulaşarak akifer dediğimiz su taşıyan tabakalarda depolanmış olan yeraltı sularını besler, yüzey ve yeraltı sularının kaynağı yağışlar olmasına rağmen, yeraltı suları yüzey sularından daha fazla miktarda mineral madde içerir, yağmurun yere düşmesi, süzülmenin başlaması ve suyun toprak ve kayaçların boşluklarından geçmesiyle su temas ettiği bazı maddeleri eritir, böylece, yerçekimine bağlı olarak aşağıya doğru süzülen suya mineraller eklenir, yeraltı sularının kimyasal bileşimi; temas ettiği maddelerin fiziksel özelliklerine, bileşimlerine ve temas süresine bağlı olarak tayin edilir, suyun söz konusu maddelerle temas süresi uzadıkça suda daha fazla miktarda mineral çözünmektedir (Sargın, 2010). Kırşehir'in Kaman bölgesindeki yeraltı suyu kalitesini etkileyen faktörlerin belirlenmesi ve sudaki kirliliğin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin anlaşılması üzerine yapılan arazi çalışmaları ve ArcGIS programında işlenen veriler sonucu, yeraltı suyu kalitesini en çok etkileyen faktörlerin kaya litolojisi, maden yatakları oluşumları ve tarım arazilerinde kullanılan gübreler olduğu tespit edilmiştir. Bu faktörlerin su kirliliği ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, bölgedeki su yönetimi ve çevre koruma stratejileri açısından büyük önem taşımaktadır (Salman, 2019).

Bu çalışma kapsamında Tekirdağ Su Kanalizasyon İdaresi'nin kontrolündeki 26 adet Çerkezköy içme suyu kuyuları ile ilgili bilgiler dahilinde ve 11. Bölge Müdürlüğü'nün bölgeye ait çalışmaları ve teknik elemanlar ile yapılan sözlü görüşmeler çerçevesinde, genel bir çalışma yapılarak gerek kuyuların kimyasal içeriği ve kirlilik değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada Çerkezköy içme suyu temininin sağlandığı sondaj kuyularının verimleri ile yeraltı sularının fiziksel ve kimyasal özellikleri değerlendirilerek (içme suyu kalite standartları açısından) sağlık etkileri ve riskleri incelenmiştir. İlçe sınırları içerisinde kalan Tekirdağ Büyükşehir Belediyesi Su Kanalizasyon Genel Müdürlüğü (TESKİ) sorumluluğu içerisindeki toplam 26 kuyunun verileri değerlendirilmiştir. 26 adet sondaj kuyusundan 5 adeti Kızılpınar mahallesinde, 3 adeti Veliköy mahallesinde olmak üzere 18 adeti Çerkezköy merkezde bulunmaktadır (Şekil 1). Şekil 1'de kuyu lokasyonları verilmiştir. Kuyu derinlikleri ve statik su seviyeleri birbirinden farklıdır. Çalışma alanı Türkiye'nin kuzeybatısında, 27° 55' 7' - 28 04'15'' D boylamları ile 41 13' 15'' – 41 22' 8'' K enlemleri içerisinde yer almaktadır.



Şekil 1. İçme suyu temin edilen sondaj kuyularının yerleşim yerlerindeki konumları.

Bu çalışma kapsamında, Çerkezköy ilçesine içme suyu sağlayan 26 adet sondaj kuyusuna ait yeraltı sularında 19 adet fiziksel ve kimyasal kirletici analizi yapılmış ve Sağlık Bakanlığı'na ait "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (URL 1, 2005)" başta olmak üzere birçok farklı yönetmelik doğrultusunda içme suyu kalitesi irdelenmiştir. Ayrıca, kirletici parametrelerin muhtemel insan sağlığına etkileri de tartışılmıştır. Fiziksel özellikler olarak sıcaklık (T, C°), pH ve elektriksel iletkenlik (EC) parametreleri yerinde ölçülmüştür. Su örnekleri asitle temizlenmiş polietilen numune kaplarında toplanmıştır. Su analizleri Çevre Bakanlığı tarafından akredite olan laboratuvarda (AEM Laboratuvarı) gerçekleştirilmiştir. Katyonlar Atomik Absorpsiyon Spektrometrisi (AAS) ile anyonlar yüksek verimli sıvı kromatografisi ile belirlenmiştir. Ölçüm yöntemleri standartlara (APHA, Standard Methods, 1989) uygun olarak yapılmıştır. Sulardaki temel anyon ve katyonlar meq/L kullanılarak piper diyagramı oluşturulmuştur.

Çizelge 1. Kuyulardan alınan su örneklerinin kimyasal analiz sonuçları ve yüzde miliekivalen değerleri

Kuyu No	Ca^{+2}		Mg^{+2}	Na^{+}	Cl^{-}	SO_4^{-2}	HCO_3^{-}	% rCa	% rK	% rMg	% rNa	% rCl	% rSO_4	% $rHCO_3$	Toplam Sertlik (F°)
ÇRK-1	41,8	2	13,5	37,85	109	13	40	42,48	1,02	22,96	33,54	76,75	6,75	16,5	16,1-Tatlı Su
ÇRK-2	46,8	2	12,5	63,8	56	29	48	37,74	0,81	16,77	44,67	53,20	20,20	26,60	64,6-Çok Fazla Sert Su
ÇRK-3	22	2	4,79	100	32	25	52	18,64	0,85	6,78	73,73	39,65	22,91	33,44	7,5-Memba Suyu
ÇRK-4	27,9	2	8,96	79,2	44	20	46	24,82	0,89	13,30	60,99	51,45	17,43	31,12	10,75-Tatlı Su
ÇRK-5	4,62	1	1	127	22	24	16	3,92	0,51	1,36	94,20	44,93	36,23	18,84	1,55-Memba Suyu
ÇRK-6	44,90	3	13,70	52,10	60	18	50	39,20	1,39	19,86	39,54	58,48	12,98	28,37	16,95-Tatlı Su
ÇRK-7	44,8	3	12,2	55,4	53	20	48	45,62	1,63	3,67	49,08	55,19	15,55	29,26	12,1-Tatlı Su
ÇRK-8	32	3	16,6	31,1	106	28	40	36,28	1,81	31,29	30,61	70,68	13,71	15,60	14,9-Tatlı Su
ÇRK-9	20,7	2	5,81	86,5	33	20	34	19,51	0,94	9,01	70,54	48,69	21,99	29,32	7,6-Memba Suyu
ÇRK-10	34,70	3	19,20	34,20	76	19	28	35,40	1,56	32,64	30,40	71,33	13,33	15,33	16,7-Tatlı Su
ÇRK-11	7,84	1	1,42	116	29	21	14	6,99	0,54	2,15	90,32	55,03	29,53	15,44	2,55-Memba Suyu
ÇRK-12	48	2	12,9	53,2	65	17	36	41,10	0,86	18,49	39,55	66,06	12,64	21,30	17,4-Tatlı Su
ÇRK-13	8,77	2	2	107	37	19	20	8,29	0,94	3,20	87,57	58,76	22,60	18,64	3,05-Memba Suyu
ÇRK-14	48,5	2	14	46,9	62	20	44	42,71	0,88	20,56	35,85	60,55	14,53	24,91	18-Tatlı Su
ÇRK-15	28,7	2	12,3	30,4	78	24	30	37,5	1,30	26,82	34,38	68,97	15,67	15,36	12,35-Tatlı Su
ÇRK-16	29	2	17,4	38,2	74	22	60	31,44	1,11	31,45	36	59,03	13,07	27,88	14,5-Tatlı Su
ÇRK-17	45,8	2	16,7	35,9	10,1	30	44	43,29	0,96	26,26	29,49	17,17	38,65	44,17	18,4-Tatlı Su
ÇRK-18	41,6	2	9,77	52,5	42	18	38	39,85	0,96	15,52	43,68	54,13	17,43	28,44	14,45-Tatlı Su
ÇRK-19	48,4	3	17,7	42,8	164	25	36	48,4	1,6	12,8	37,2	80,62	9,08	10,30	15,3-Tatlı Su
ÇRK-20	44,7	2	17,3	33,7	106	16	46	43,08	0,96	27,69	28,27	73,46	8,11	18,43	18,4-Tatlı Su
ÇRK-21	47	2	17,6	36,8	118	17	44	42,96	0,91	26,87	29,25	75,63	7,97	16,40	19,1-Tatlı Su
ÇRK-22	40,3	2	13,2	33,2	103	12	38	43,82	1,08	23,86	31,23	76,92	6,63	16,45	15,6-Tatlı Su
ÇRK-23	42,6	2	10,4	61,6	66	23	40	37,17	0,87	15,18	46,77	62	16	22	15-Tatlı Su
ÇRK-24	25,7	2	9,23	30,7	61	11	26	37,5	1,45	22,38	38,66	72,27	9,66	18,07	10,3-Memba Suyu
ÇRK-25	45,7	2	16,4	33,8	119	17	44	44,21	0,96	26,44	28,38	75,79	7,92	16,29	18,3-Tatlı Su
ÇRK-26	7,61	2	2,06	108	46	20	24	7,17	0,94	3,21	88,68	61,32	19,81	18,87	2,75-Memba Suyu

3. Bulgular

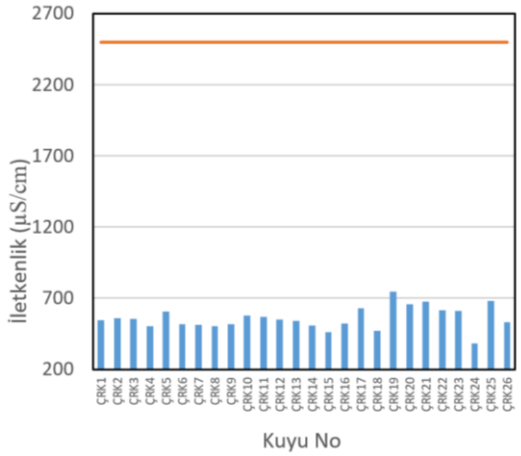
3.1.Hidrojeolojik Değerlendirme

İnceleme alanındaki DSİ 11. Bölge Müdürlüğü tarafından 1960'lı yıllarda açılan sondaj kuyularının derinlikleri genellikle 200-250 m'dir. Ancak sonraki yıllarda açılan kuyularda bu derinlikler giderek artmıştır ve günümüzde derinliklerin 600-650 m seviyelerine ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu kuyulardan elde edilen DSİ 11. Bölge Müdürlüğü verilerine göre, kuyuların beslenme miktarı, iklimsel değişikliklerden kaynaklanan nedenlerden dolayı azalmıştır ve aşırı çekim nedeniyle su seviyesinde önemli miktarlarda düşüşler yaşanmıştır. Bu değişimin 1976 yılından sonra başladığı DSİ yetkilileri tarafından belirtilmektedir. Farklı kuyularda zaman zaman farklı seviye düşüşleri gözlenmiştir (100-150 m), bu durum yağış ve yüzey suyunun akifere ulaşma şekline veya akım yönüne bağlı olarak değişebilir. Tekirdağ Su ve Kanalizasyon İdaresi (TESKİ)nin ve DSİ'nin kuyularına ait tüm kuyu loglarına erişilemediği için jeolojik bir profil oluşturulamamıştır. Ancak, mevcut raporlar ve ilgili literatürlerle bölgenin jeolojisi yorumlanmaya çalışılmıştır. Bölgesel hidrojeolojik değerlendirmede, derinlikleri 200 m üzerinde olan sondaj kuyularının litolojisinin genellikle üstte Ergene formasyonu ile başlayıp altta Danişmen formasyonu ile son bulduğu

gözlemlenmektedir. Ergene formasyonunun ortalama olarak 300 m kalınlık gösterdiği ve altında Danişmen formasyonunun killi birimlerle geçirimsiz bir taban oluşturduğu bilinmektedir. Ergene formasyonunun Danişmen formasyonu killi seviyesine ulaşmadan önce çakıllı ve kumlu seviyeleri bulunmaktadır. Mevcut açılan kuyuların genel profili, Ergene formasyonu ile başlayıp altında Danişmen Formasyonunun killi seviyeleri ile son bulmaktadır. Kuzey kesimlerde Ergene formasyonunun kalınlığının 300-350 m civarında olduğu, doğuda 320m, batıda ise 370 m civarında olduğu DSİ belgelerinde belirtilmektedir (URL 2, 2024).

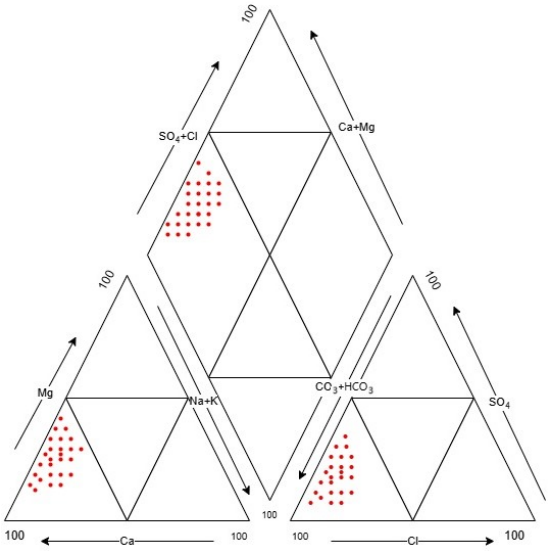
3.2.Hidrojeokimyasal Değerlendirme

Çerkezköy ilçesine içme suyu sağlayan yaklaşık 26 adet kuyuda 19 adet fiziksel, kimyasal ve kirletici analizleri (Çizelge 1) yapılarak Sağlık Bakanlığı'na ait "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (URL 1, 2005)" ve farklı yönetmelikler doğrultusunda içme suyu kalitesi irdelenmiştir. Uluslararası standartlar dikkate alınarak grafiklerde sınır değerler turuncu yatay çizgi ile gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında bu kirletici parametrelerin muhtemel insan sağlığına etkileri de tartışılmıştır. Fransız sertliğine göre sular genel olarak *"tatlı su"* olarak sınıflandırılmıştır. Ancak 7 adet. su kuyusu "memba suyu" 1 adet su kuyusu "çok fazla sert su" olarak nitelendirilmiştir (Çizelge 1).



Şekil 2. Çerkezköy ilçesi su örneklerinin elektriksel iletkenlik değişimi

Şekil 2'de çalışma alanındaki su örneklerinin elektriksel iletkenlik (EC-µS/cm) değerlerinin dağılım grafiği görülmektedir. Elektirksel iletkenlik, suyun elektriği iletme kabiliyetini ölçerek bir su kütlesindeki iyonik içeriktir (klorür, nitrat, sülfat, sodyum, magnezyum, kalsiyum veya demir gibi) (referans). Sağlık Bakanlığı insani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelik ve Avrupa Birliği içme suyu direktifleri yönetmeliklerine (URL 1, 2005; URL 3, 2023) göre elektriksel iletkenlik üst sınır değeri 2500 µS/cm (20 °C'de) dir. Suyun iletkenliği, su kalitesini ölçmek için çok önemli bir indekstir ve sudaki dielektrik derecesini yansıtabilir. Su inorganik asit, alkali veya tuz içerdiğinde iletkenliği artar. İyon konsantrasyonu, belirli bir matematiksel ilişki yoluyla iletkenliğe eşdeğerdir (Aral, B., 2024). Su örneklerindeki toplam çözünmüş katı madde (TDS) içeriği ile elektriksel iletkenliği arasında bir ilişki vardır. 26 adet kuyuda tespit edilen elektriksel iletkenlik değerleri mevcut yönetmeliklerde belirtilen sınır değerin altında ölçülmüştür. En yüksek elektriksel iletkenlik değeri ÇRK 19 nolu kuyuda 747 µS/cm, en düşük elektriksel iletkenlik değeri ÇRK 24 nolu kuyuda 382 µS/cm bulunmuştur. Diğer kuyularda elektriksel iletkenlik değerleri 400-600 µS/cm aralığında değişmektedir. Tüm değerler dikkate alındığında mevcut kuyu sularında çözünmüş madde ve iyon konsantrasyonlarının düşük olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak ifade etmek gerekirse iletkenlik distile sularda 0.5-3 µS/cm, çeşme sularında 50-800 µS/cm, taze su akıntılarında 100-1000 µS/cm, endüstriyel atık sularda 10.000 µS/cm, deniz suyunda 55000 µS/cm'dir (Lang vd., 2006). Lang vd.'nin yapmış olduğu bir çalışmada, yeraltı suyunun kış ve yaz aylarındaki ortalama TDS değerleri sırasıyla 614 ve 564 mg/L olarak bulundu. Bu da yeraltı suyunun TDS değerlerinin yağışlardan dolayı kış aylarında daha yüksek olduğunu göstermektedir (Lang vd., 2006) .

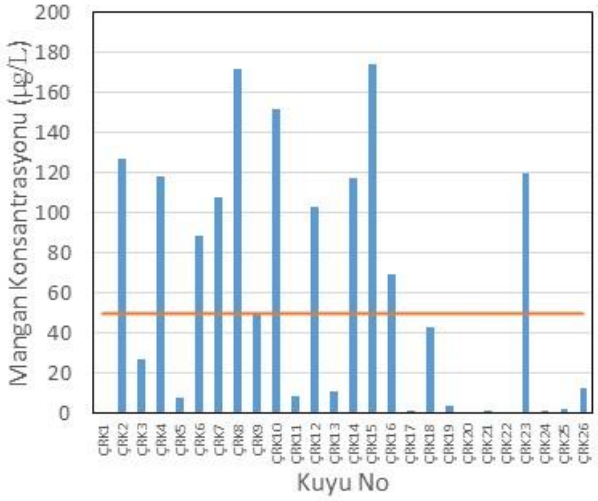


Şekil 3. Kuyu sularının kimyasal analizlerine ait Piper diyagramı (26 adet kuyunun kimyasal verilerine göre numaralandırılmadan kırmızı noktalar şeklinde verilmiştir.

Alınan su örneklerinde toplam anyon, katyon analizleri yapılmıştır. Piper (1944) diyagramına göre tüm su örnekleri kimyasal açıdan değerlendirilmiştir. Piper diyagramında; katyon oranlarına göre sular, sodyum (Na^+), potasyum (K^+) ve kalsiyum (Ca) iyonları açısından zengindir. Anyon oranlarına göre ise bikarbonat (HCO_3^-) ve yer yer klor (Cl^-) açısından zengin sular olarak tanımlanmıştır (Şekil 3). Anyonlar; $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{-2}$ ve

Katyonlar; $Na^{+}>Ca^{+2}>K^{+}>Mg^{+2}$ şeklinde dizildiği belirlenmiştir.

Ağır metaller, temel ve temel olmayan ağır metaller olmak üzere iki gruba ayrılır. Temel ağır metallere örnek olarak manganez (Mn), demir (Fe), bakır (Cu) ve çinko (Zn) verilebilirken temel olmayan ağır metallere örnek olarak kadmiyum (Cd), kurşun (Pb) ve cıva (Hg) verilebilir (Hazrat vd., 2019). Manganez (Mn), yerkabuğunda en çok bulunan metallerden biridir ve genellikle demir ile birlikte bulunur. Mangan konsantrasyonlarının kuyu lokasyonlarına bağlı olmadan arttığı ve azaldığı görülmektedir (Şekil 4).

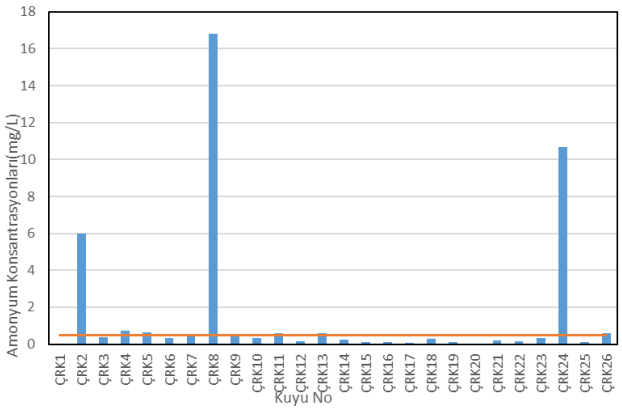


Şekil 4. Çerkezköy ilçesi su örneklerinin mangan konsantrasyonu değişimi

Kuyu lokasyonlarına yakın mesafede sanayi bulunmamaktadır. Bazı kuyu lokasyonlarına yakın mesafeden dere akıntısı mevcuttur. Kuyulardan alınan su örneklerindeki mangan konsantrasyon değerleri 1.0-174 µg/L arasında değişmektedir (Çizelge 1). Sağlık Bakanlığı insani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelik ve Avrupa Birliği içme suyu direktifleri yönetmeliklerine (URL 1, 2005; URL 3, 2023) göre içme sularında mangan konsantrasyonunun sınır değeri 50 µg/L dir. ÇRK 2, ÇRK 4, ÇRK 6, ÇRK 7, ÇRK 8, ÇRK 10, ÇRK 12, ÇRK 14, ÇRK 15, ÇRK 16, ÇRK 23 nolu kuyularda mangan konsantrasyonları sınır değerleri aşmaktadır. ÇRK 1, ÇRK 5, ÇRK 11, ÇRK 13, ÇRK 17, ÇRK 19, ÇRK 20, ÇRK 21, ÇRK 22, ÇRK 24, ÇRK 25, ÇRK 26 kuyularında çok düşük mangan konsantrasyonları ölçülmüştür. 20 µg/L kadar düşük konsantrasyonlarda, manganez su boruları üzerinde daha sonra siyah bir çökelti olarak dökülebilecek kaplamalar oluşturabilir.

Manganez için 0,05 mg/L (50µg/L) limit değeri standartlarda (URL 1, 2005; URL 3, 2023) belirlemiştir. Bu değerin üzerindeki konsantrasyonlarda sularda renk bozulması sorunları meydana gelebilir. Manganez, esas olarak demir ve çelik alaşımlarının ve manganez bileşiklerinin imalatında ve çeşitli ürünlerde bir bileşen olarak kullanılır. Manganez dioksit ve diğer manganez bileşikleri pil, cam ve havai fişek gibi ürünlerde kullanılmaktadır (IPCS, 2004). 20 µg/L'lik ortalama içme suyu seviyesinde, günlük 2 litre su alımı varsayıldığında, bir yetişkin için manganez alımı 40 µg/gün olacaktır. Oksijen konsantrasyonu düşük yeraltı suyu genellikle yüksek seviyelerde çözünmüş manganez içerir. Divalent form (Mn^{+2}) pH 4-7'de çoğu suda baskındır, ancak daha yüksek oranda oksitlenmiş formlar daha yüksek pH değerlerinde meydana gelebilir veya mikrobiyal oksidasyondan kaynaklanabilir (ATSDR, 2000).

Son yıllarda, içme suyu kaynağı olarak hizmet veren bazı yüzey sularındaki amonyum konsantrasyonu, büyük miktarda endüstriyel ve evsel atık suların mevcut su kaynaklarına deşarj edildiğinden, izin verilen standarttan çok daha yüksektir (0.5 mg/L). Şekil 5'de Çerkezköy yerleşim merkezi mevcut içme suyu kuyularında amonyum iyonu konsantrasyonları gösterilmiştir. Amonyum konsantrasyonları genel olarak 0.5 mg/L'nin altında ölçülmüştür. ÇRK 2, ÇRK 8, ÇRK2 4 kuyularında çok yüksek amonyum konsantrasyonları ölçülmüştür (Şekil 5).



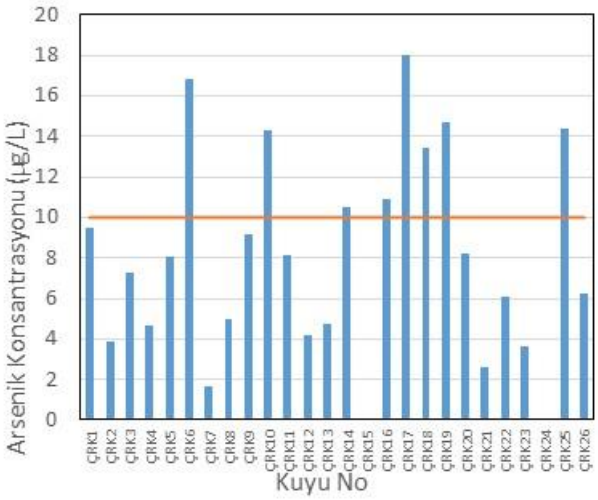
Şekil 5. Çerkezköy ilçesi su örneklerinin amonyum konsantrasyon değişimi (mg/l, ÇRK 2, ÇRK 8, ÇRK 24 örneklerinin konsantrasyonları 100 kat küçültülmüştür.)

ÇRK 2, ÇRK 8 ve ÇRK 24 kuyularına ait su örneklerinin amonyum konsantrasyonları sırasıyla $5.98x10^{2}$ mg/L, $16.82x10^{2}$ mg/L ve $10.67x10^{2}$ mg/L olarak ölçülmüştür. Kuyu lokasyonları dikkate alındığında sistematik bir azalma ya da artış tespit edilememiştir. Kuyu çevrelerinde fabrika bulunmamaktadır. Bölgenin tarım alanı olması kuyularda benzer sonuçların ölçülmesini gerektirirdi. Kuyuların paralelinde kirli bir akarsuyun mevcudiyeti kontaminasyon ihtimalini akla getirmektedir. Amonyum iyonu genel olarak taze kirlenmenin bir belirteci olarak kullanılmaktadır. Azotlu bileşikler öncelikle amonyum/amonyak, nitrit ve nitrat sıralamasında bir dönüşüme uğramaktadır. "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te (URL 1, 2005)" amonyum sınır konsantrasyonu 0.5 mg/L olarak verilmiştir. Avrupa birliği içme suyu standartlarına (URL 3, 2023) göre de amonyum

üst sınır değeri 0.5 mg/L'dir. 0,5 mg/L'ye kadar olan amonyum konsantrasyonları, su şebekelerinde dağıtım sisteminde amonyum nitrite dönüşmüyorsa kabul edilir (Schullehner vd., 2018). Çalışma alanındaki su örneklerinin amonyum konsantrasyon miktarları: ÇRK 2 (598 mg/L), ÇRK 4 (0.721 mg/L), ÇRK 5 (0.622 mg/L), ÇRK 8 (1682 mg/L), ÇRK 11 (0.612 mg/L), ÇRK 13 (0.599 mg/L), ÇRK 24 (1067 mg/L), ÇRK 26 (0.577 mg/L) 0.5 mg/L sınır değerinden yüksektir. Kuyularda ölçülen yüksek amonyum konsantrasyonlarının tarımsal kökenli (gübre kullanımı) olduğu düşünülmektedir. Amonyum formundaki nitrojenin jeojenik seviyelerinden daha yüksek seviyelerde bulunması, son zamanlarda kanalizasyondan kaynaklanan kirliliğin önemli bir göstergesidir ve halk sağlığına ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu, amonyumun gübrelerden de kaynaklanabileceği gerçeğine atfedilebilir, ancak bu durumda amonyum toprakta nispeten kolaylıkla nitritlere ve son olarak nitratlara oksitlenir (Karavoltsos vd, 2008).

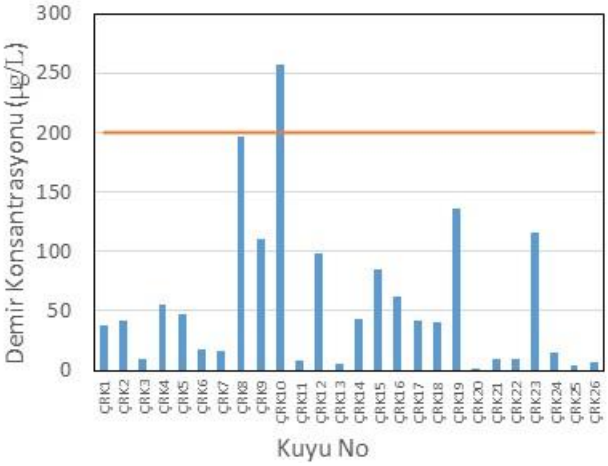
Arsenik doğada inorganik ve organik formda oluşan bir elementtir. Yeraltı ve yerüstü sularda bulunan arseniğin inorganik formları en toksik olanıdır. Son zamanlarda yapılan izleme çalışmaları, yüzey ve yeraltı sularında arsenik konsantrasyonunda < 0,1 µg/L ile 21.000 µg/L arasında değişen bir artış olduğunu ortaya koydu (Haldar vd., 2020; Aral, 2024). Arsenik cilt kanseri, kalp ve damar hastalıkları, nörolojik rahatsızlıklar oluşturduğu bilinmektedir. Doğal birikintilerin erozyonu, meyve bahçelerinden akış, cam ve elektronik üretim atıklarından meydana gelen akışlar, içme suyunda arsenik açısından kirletici kaynağı olabilir (Haldar vd., 2020).

Şekil 6'da Çerkezköy belediyesi su kuyularında arsenik konsantrasyonlarının değişimi verilmiştir. Grafiğe göre yedi kuyuda arsenik konsantrasyonlarının pik değere ulaştığı görülmektedir. ÇRK 6 (16.8 µg/L), ÇRK 14 (10.5 µg/L), ÇRK 16 (10.9 µg/L), ÇRK 18 (13.4 µg/L), ÇRK 19 (14.7 µg/L) ve ÇRK 25 (14.4 µg/L) kuyularında Sağlık Bakanlığı insani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelik (URL 1, 2005) ve Avrupa Birliği içme suyu direktifleri yönetmelikleri (URL 3, 2023) üst sınır değerlerini (10 µg/L) aşmaktadır. Harita üzerinde kuyu lokasyonları incelendiğinde ÇRK 15 ve ÇRK 19 lokasyonlarında arsenik konsantrasyonunun arttığı görülmektedir. Arsenik genel olarak maden yatakları, cevher alanlarında noktasal olarak ortaya çıkmaktadır. Bu kuyu loglarının olduğu alanlar dikkatlice incelenmelidir. Gerekirse kuyular kapatılarak yeni noktalarda kuyular açılmalıdır. Diğer 20 kuyuda arsenik konsantrasyonları limit değerlerin altında ölçülmüştür. 1999 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde içme suyunda arsenik için mevcut maksimum kirletici madde seviyesi 50 µg/l olarak ayarlanmıştır. İlgili kanser riskleri nedeniyle, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (URL 4,2024), arsenik üst sınır değerini önemli ölçüde düşürmek amacıyla arsenik için izin verilen mevcut seviyeyi 10 µg/L'ye düşürmüştür.



Şekil 6. Çerkezköy ilçesi su örneklerinin arsenik konsantrasyonu

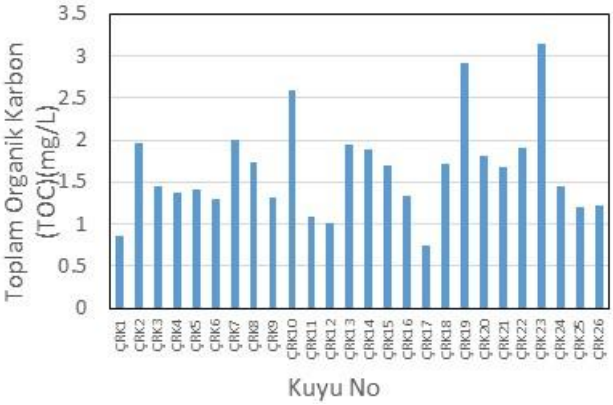
Sağlık Bakanlığı insani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelik (URL 1, 2005) ve Avrupa Birliği içme suyu direktifleri yönetmeliklerine (URL 3, 2023) göre, demir konsantrasyonunun üst sınır değeri 200 µg/L dir. ÇRK 1-ÇRK 7 kuyu sularında demir konsantrasyonları 10 µg/L-55.7 µg/L arasında değişmektedir (Şekil 7). ÇRK 8, ÇRK 9 ve ÇRK 10 kuyularında demir konsantrasyonları diğer kuyulara göre çok yüksektir. ÇRK 8, ÇRK 9 ve ÇRK 10 kuyularında demir konsantrasyonları sırasıyla 196 µg/L, 110 µg/L ve 257 µg/L ölçülmüştür. ÇRK 12 (97.8 µg/L), ÇRK 15 (84.6 µg/L), ÇRK 19 (136 µg/L) ve ÇRK 23 (116 µg/L) kuyularında demir konsantrasyonları yüksek olduğu tespit edilmiştir. Diğer kuyularda demir konsantrasyonları 10 µg/L-62 µg/L arasında bulunmuştur. ÇRK 3, ÇRK 20, ÇRK 21, ÇRK 22, ÇRK 24, ÇRK 25 ve ÇRK 26 kuyuları demir konsantrasyonları 10 µg/L civarında ölçülmüştür.



Şekil 7 . Çerkezköy ilçesi su örneklerinin demir konsantrasyonu değişimi

Demir konsantrasyonu sadece ÇRK 10 nolu kuyu suyunda sınır değeri aşmaktadır. Diğer kuyularda içme suları açısından bir problem mevcut değildir. Demir, yer kabuğunda en bol bulunan ikinci element olarak kabul edilir ve bu aynı zamanda dünyadaki mevcut elementler arasında dördüncü sırada yer alır. Çözünmüş demir, görünür kırmızımsı renk görünümü ve nahoş metalik tat ile su kalitesini düşürdüğünden, suda demirin varlığı kritik bir endişe kaynağıdır (Kamboj vd., 2020). Öncelikle sulu ortamda bulunan demir, çözünür formlar (Fe (II)) ve çözünmeyen formlar (Fe (III)) olarak sınıflandırılır. Sonuç olarak, ortamın pH'ı, doğal suda demir oluşumu için çok önemli bir rol oynar. Demir hidroksitin ($Fe(OH)_2(aq)$) pH 6'nın altında var olduğu ve bunun ötesinde ferrik hidroksite ($Fe(OH)_3(aq)$) oksitlendiği bilinmektedir (Aral, 2024). Madencilik, demir ve çelik endüstrilerinden üretilen kontamine atıkların oluşumu da dahil olmak üzere çeşitli antropojenik kirleticiler, su kütlelerinde yüksek konsantrasyonda demirin salınmasına yol açar. Yağmurun toprak, kayalar ve minerallerden süzülerek geçmesi gibi doğal süreçler de yüzey sularında potansiyel doğal demir kirliliği kaynakları olarak kabul edilmektedir (Haldar vd., 2020). Kuyu sularında demir konsantrasyonuna bağlı olarak sanayi kirliliği ilişkisi tespit edilememiştir.

Toplam organik karbon analizi, sudaki partikül organik kirleticilerin çevresel etkisini değerlendirmek (şebeke içerisinde bakteriyolojik büyümeyi kontrol etmek) ve karbon döngüsü kütle dengesini hesaplamak için kritik öneme sahiptir. TOC değişiminin kuyu lokasyonlarına bağlı olmadan çok farklı değerler aldığı tespit edilmiştir. Sağlık Bakanlığı insani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelik ve Avrupa Birliği içme suyu direktifleri yönetmelikleri (URL 1, 2005; URL 3, 2023) kapsamında günde 10.000 m^3'ten az su verilmesinde bu parametrenin ölçülmesine gerek olmadığı belirtilmiştir. Çerkezköy ilçesinde nüfusa bağlı su tüketimi günlük bu değerin çok üzerinde olduğundan TOC ölçümü gereklidir. Sudaki karbon içeren bileşiklerin miktarı, suda bulunan doğal organik maddenin bir göstergesi olan toplam organik karbon (TOC) olarak ifade edilir. Hem doğal olarak bulunan organik maddeleri hem de insan yapımı organik kimyasalları içerir TOC mevcudiyetinde içme suyu sistemlerindeki büyüme, örneğin mikrobiyal kaynaklı korozyon veya aşırı biyofilm, tortu veya omurgasızlar nedeniyle su hatlarının veya su sayaçlarının tıkanması gibi teknik şikayetlere neden olabilir. Bir içme suyu sisteminin biyolojik stabilitesini belirleyen en önemli faktör, içme suyu sistemindeki besin konsantrasyonudur, çünkü diğer faktörlerin mikrobiyal büyüme için uygun olup olmadığına bakılmaksızın, besin konsantrasyonları yeterince düşük olduğunda mikrobiyal büyüme sınırlı olacaktır (Van der Kooij & Van der Wielen, 2014). İçme sularında TOC'nin sıfıra yakın bir değer olması istenen bir durumdur. Mevcut yönetmeliklerde TOC parametresi üst sınır değeri belirtilmemiştir. En yüksek TOC konsantrasyonları ÇRK 10 (2.598 mg/L), ÇRK 19 (2.923 mg/L) ve ÇRK 23 (3.133 mg/L) kuyularında ölçülmüştür. Mevcut mevzuat incelendiğinde tüm kuyularda su kalitesi A1 grubuna girmektedir. En düşük TOC konsantrasyonu ÇRK 17 (0.754 mg/L) kuyusunda ölçülmüştür. Koley vd. (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, ham sudaki ortalama TOC seviyesi 3,80 ile 3,90 mg/L arasında değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Çerkezköy ilçesi su örneklerinde toplam organik karbon konsantrasyonu (TOC) değişimi

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışması kapsamında, Tekirdağ Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi'nin (TESKİ) kontrolündeki 26 adet Çerkezköy içme suyu kuyusu hakkında bilgiler ile DSİ Edirne 11. Bölge Müdürlüğü'nün bölgedeki çalışmaları ve ilgili kişiler ile 2024 yılında yapılan sözlü görüşmeler çerçevesinde kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır.

Çalışmalarımız sonucu aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. İnceleme alanı jeolojik yapı ve yeraltı suyu açısından değerlendirildiğinde, yeraltı suyunun batı-kuzeybatı yönünde hareket ettiği tespit edilmiştir. Ergene Formasyonu, bölgenin en önemli akiferi olarak belirlenmiş ve Danişmen Formasyonu ise akiferi tabandan sınırlayan geçirimsiz bir birim olarak tespit edilmiştir. İlk verilerin alındığı 1969 yılında, statik su seviyesinin 32 m olduğu, 1982'de 44 m, 1992'de 50 m, 2002'de 80 m ve 2023'te 150 m olduğu belirlenmiştir. Sürekli düşen su seviyeleri, ileriki yıllarda kuyulardaki pompaların güncellenmesi ve daha derine indirilmesini gerektirecektir. Bu, enerji tüketimini artırarak ekonomik yük oluşturacaktır. Ayrıca, sanayi sektörünün uzun vadede yeni su kaynakları yaratması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Çünkü mevcut yeraltı suyu bu ihtiyacı karşılayacak yeterlilikte değildir.

26 kuyuda tespit edilen elektriksel iletkenlik değerleri mevcut yönetmeliklerde belirtilen üst sınır değerinin altında ölçülmüştür. Kuyularda genellikle iletkenlik değerleri 700 µS/cm'nin altındadır. En yüksek elektriksel iletkenlik değeri ÇRK 19 kuyusunda 747 µS/cm, en düşük elektriksel iletkenlik değeri ÇRK 24 kuyusunda 382 µS/cm bulunmuştur.

ÇRK 6 (16.8 µg/L), ÇRK 14 (10.5 µg/L), ÇRK 16 (10.9 µg/L), ÇRK 18 (13.4 µg/L), ÇRK 19 (14.7 µg/L) ve ÇRK 25 (14.4 µg/L) kuyularında arsenik konsantrasyonları Sağlık Bakanlığı insani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelik ve Avrupa Birliği İçme Suyu Direktifleri yönetmelikleri üst sınır değerlerini (10 µg/L) aşmaktadır. Diğer kuyularda içme suyu açısından bir problem bulunmamaktadır.

Piper diyagramına göre bu sular sodyum, potasyum, kalsiyum, bikarbonat ve klorür açısından zengin sulardır. Sular Fransız sertlik derecesine göre genel olarak *"tatlı su"* sınıfındadır.

İçme sularında TOC'nin sıfıra yakın olması istenmektedir. Mevcut yönetmeliklerde TOC parametresi için üst sınır değeri belirtilmemiştir. Kuyuların çoğunda toplam organik karbon konsantrasyonunun 0,5 mg/l'nin üstünde ölçülmesi, su dağıtım şebekelerinde bakteriyolojik büyüme riskini taşımaktadır. En yüksek TOC konsantrasyonları ÇRK 10, ÇRK 19 ve ÇRK 23 kuyularında ölçülmüştür.

Genel olarak 0.5 mg/L'nin altındadır. ÇRK 2, ÇRK 8 ve ÇRK2 4 kuyularında yüksek amonyum konsantrasyonları bulunmuştur. Kirli bir akarsu varlığı kontaminasyon olasılığını düşündürmektedir. Amonyum iyonu genellikle taze kirlenmenin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Amonyum konsantrasyonları ÇRK 2, ÇRK 8 ve ÇRK 24 kuyuları dışında limit değerin altında ölçülmüştür.

Demir konsantrasyonu ÇRK 10 kuyusunda sınır değeri aşmaktadır. ÇRK 8 kuyusunda demir konsantrasyonu sınır değere yakın bulunmuştur. Demir konsantrasyonları ile sanayi kirliliği arasında bir ilişki tespit edilmemiştir.

Toplam 11 adet kuyuda mangan konsantrasyonları sınır değerin üstünde ölçülmüştür. Bu durum içme su şebekelerinde renk oluşumuna neden olacaktır. ÇRK 2, ÇRK 4, ÇRK 6, ÇRK 7, ÇRK 8, ÇRK 10, ÇRK 12, ÇRK 14, ÇRK 15, ÇRK 16 ve ÇRK 23 kuyularında mangan konsantrasyonları sınır değerleri (50 µg/L) aşmaktadır. Mangan sularda renk ve bulanıklığa sebep olur. Kuyu lokasyonları ve sanayi tesisleri yerleşimleri dikkate alındığında, kuyularda sanayiden kaynaklanan kirlilik ilişkisi bulunamamıştır.

Arsenik konsantrasyonları toplam 26 kuyunun 8'inde 10 µg/L sınır değerinin üstünde bulunmuştur. Arsenik kirliliği, genellikle maden yataklarına yakın alanlarda ortaya çıkmaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Bu çalışma Prof. Dr. Ali Rıza DİNÇER danışmanlığında Beyza ARAL tarafından 2024 tarihinde tamamlanan "Çerkezköy ilçesi Yeraltı Suları Potansiyeli ve Evsel Su Kullanım Kalitesi" başlıklı yüksek lisans (Tez no: 881598) tezinden türetilmiştir.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deneyleme, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak,

Yazar 3: Araştırma, Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Proje Yöneticisi, Görselleştirme, Yazma –orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Bu makale Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir. Tezin üretilmesi esnasında gerekli desteklerini sözlü ya da belge olarak almış olduğumuz Tekirdağ Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresine (TESKİ), DSİ. Edirne 11. Bölge Müdürlüğü'ne teşekkürü bir borç biliriz.

5. Kaynaklar

Alsalme, A., Al-Zaqri, N., Ullah, R., & Yaqub, S. (2021). Approximation of ground water for microbial and chemical. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28,1757-1762. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.017

Aral, B., 2024, Çerkezköy ilçesi Yeraltı Suları Potansiyeli ve Evsel Su Kullanım Kalitesi, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorlu, 68 s.

APHA (1989) Standart Methods for Examination of Water and Wastewater. 17.th Edition, American Public Healt Association, Washington DC.

Arkoç, O., 2005, Ergene Havzası Çorlu-Çerkezköy arasındaki kesiminin hidrojeolojisi. İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Doktora Tezi, 144 s. (yayınlanmamış).

ATSDR. (2000). *Toxicological profile for manganese.* Atlanta: US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry Atalanta, Georgia 30333.

Haldar, D., Duarah, P., & Purkait, M. (2020). *MOFs for the treatment of arsenic, flüoride and iron contaminated drinking water.Chemosphere, 251, 126388.*

https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126388

Hazrat,A., Khan, E., Ilahi,I.(2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation, J. Chem., 2019, 6730305. https://doi.org/10.1155/2019/6730305.

IPCS. (2004). Manganese and its compounds Geneva, World Health Organization, International Programme on Chemical Safety. *Concise International Chemical Assessment document 63, Geneva 2004*.

Karavoltsos, S., Sakellari, A., Mihopoulos, N., & Dassenaki, M. (2008). *Evaluation of the quality of drinking water in regions of Greece.* Desalination, 224,317-329. http://dx. doi.org/10.1016/j.desal.2007.06.013.

Khatri, N., Tyagi, S., Rawtani, D., Tharmavaram, M.,Kamboj, R.D.(2020). Analysis and assessment of ground water quality in Satlasana Taluka, Mehsana district, Gujarat, India through application of water quality indices.Groundwater for Sustainable Development, 10,100321. https://doi.org/10.1080/21553769.2014.933716

Koley, S., Rao, K.B., Khwirakpam, M., Kalamdhad, A.S., (2024). Identification and assesment of critical parameters affecting drinking water quality: A case study of water treatment plants of India. Graundwater for Sustainable Development, 26, 101221. http://dx.doi.org/10.1016/j.gds.2024. 101221

Lang, Y-C., Liu, C-Q., Zhao, Z-Q., Li, S-L., Han, G-L., (2006), Geochemistry of surface and graund water inGuiyang, Chine: Water/Rock interaction and pollution in a karst hydrological system. Applied Geochemistry, 21, 887-903. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.03.005

Piper, A. M., (1944), A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Transactions American Geophysical Union, 25 (6), pp: 914-928

Salman, G. İ. (2019). *Kaman (Kırşehir) bölgesi yeraltı suyu kalitesinin coğrafi bilgi sistemi (CBS) kullanılarak değerlendirilmesi.* Kırşehir: Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı,57s.

Sargın, A.H (2010). Yeraltı Suları. *Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltı suları Dairesi Başkanlığı.* (s. 200), Ankara.

Schullehner, J., Hansen, B., Thygesen, M., Pedersen, C., & Sigsgaard, T. (2018). *Nitrate in drinking water and colorectal cancer risk: A nationwide population-based cohort study.* International Journal of Cancer, 143, 73-79. https://doi.org/10.1002/ijc.31306

Van der Kooij.D., Van der Wielen, P.W.J.J.(2014). Microbial Growth in Drinking Water Supplies, IWA Publishing Alliance House London, UK.

Yeşilnacar, M.İ., Yenigün, İ., (2011), Effect of irrigation on a deep aquifer: a case study from the semi arid Harran plain, GAP Project, Turkey. Bull Eng. Geol. Environ. 70,213-221.

Yeşilnacar, M.İ., et all, (2016), Geomedical assesment of an area having high-flooride groundwater in southeastern Turkey, Environ Earth Sci. 75, 162.

Yetiş, A.D., Kahraman, N., Yeşilnacar, M.İ., Kara, H., (2021), Groundwater Qality Assesment Using GIS Based on some Pollition Indicators over the past 10 years (2005-2015): A Case Study from Semi Arid Harran Plain, Turkey, Water Air Soil Pollution, 232, 1-17, https://doi.org/10.1007/s11270-020-04963-7

İnternet Kaynakları

1. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2005/02/20050217-3.htm, Erişim Tarihi: 17.02.2005,

2. https://bolge11.dsi.gov.tr, Erişim Tarihi:20.02.2024,

3.https://www.irishstatutebook.ie, Erişim Tarihi:17.12.2023

4. www.epa.gov/graundwater-and-drinkingwater, Erişim Tarihi: 14.03.2024.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1601148
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035802 (676-685)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035802 (676-685)

Nif (Olympos) Dağı, İzmir'de Dağkızılca Gömülü Oda Mezarının Manyetik Veriler ile Görüntülenmesi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 13.12.2024
Kabul/Accepted: 15.01.2025
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Imaging Dağkızılca Buried Chamber Grave Using Magnetic Data in Nif (Olympos) Mountain, İzmir

Oya TARHAN BAL*

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Büyükçekmece, İstanbul, Türkiye

Öz

Nif Dağı, Batı Türkiye'de, İzmir'in doğusunda, yaklaşık olarak Torbalı ve Buca ilçelerinin sınırlarında yer almaktadır. Çalışma alanı, Helenistik döneme ait Dağkızılca'daki manastır kompleksinin çevresini kapsamaktadır. Dağkızılca bölgesindeki yüzey kalıntıları ve bulunan kaçak kazı alanları ışığında hala gömü alanlarının (Tümülüs, oda mezarlar, vb.) bulunduğu düşünülmektedir. Bu amaçla Dağkızılca bölgesinde manyetik yöntem kullanılarak arkeojeofizik araştırma yapılmıştır. Gömülü yapıların ve mezarların yerini belirleyebilmek için 0.5 m aralıkla ölçü alınmıştır. Manyetik haritalarda, anomalilere sebep olan yapıya ait sınırların saptanabilmesi için, potansiyel alanın yatay ve düşey türevine dayalı birçok yöntem kullanılır. Bu çalışmada, gömülü oda mezarın sınırlarının belirlenmesi için üç farklı sınır analiz yöntemi kullanılmıştır. Bunlar Toplam Yatay Türev, Analitik Sinyal ve Tilt Açısı yöntemleridir. Yöntemler, sentetik modeller üzerinde karşılaştırılmış ve Nif Dağı arkeolojik arazi verisine uygulanarak yorumlanmıştır. Ayrıca hem sentetik hem de arazi verilerinin 3B ters çözümü gerçekleştirilerek yorumlamaya katkısı tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Arkeojeofizik; Manyetik; Ters Çözüm*

Abstract

Nif mountain is located in western Turkey, approximately at the border between Torbali and Buca towns in the east of Izmir city. The study area resides in the vicinity of a Hellenistic era monastery complex in Dağkızılca. In Dağkızılca area, existence of numerous buried areas (e.g. tumuli, chamber graves) are assumed based on surfaced remnants and found illegal digging sites. To reveal these, archaeological exploration using magnetic measurements was realized. The data were collected with 0.5 m intervals to determine the graves and other buried structures. Several methods based on horizontal and vertical derivatives are applied for boundary detection of anomalous structures from magnetic maps. In this study, three different analysis methods were applied to detect a buried chamber grave, which are Total Horizontal Derivative, Analytic Signal and Tilt angle methods. These methods were initially compared using synthetic models thereafter applied and interpreted on mount Nif archaeological data. Additionally, both synthetic and field datasets are inverted in 3D and its contribution to interpretation was argued.

Keywords: *Archaeogeophysics; Magnetics; Inversion*

1. Giriş

2006 yılından beri devam etmekte olan Nif Dağı (Olimpos) arkeolojik çalışmaları, İzmir doğusunda, Karamattepe, Ballıcaoluk, Başpınar ve Dağkızılca çalışma alanlarında dört farklı kazı alanı üzerinde yer almaktadır (Baykan 2016, Tuncalı Yaman 2022). Bölgede tarım ve madencilik ve metalurjiye ilişkin kalıntı ve mezar odaları keşfedilmiştir (Baykan 2016, Tezel ve Alp 2021, Tuncalı Yaman 2022). Çalışma alanı olan, Helenistik döneme ait kalıntıların yer aldığı Dağkızılca'da kaçak kazılar sonucu açılmış çok sayıda mezar odası bulunmakta, bunların bazısı bütünlüğünü korumaktadır. Bu alanda yer radarı (Tulunay 2004), elektrik özdirenç tomografisi (Tulunay 2004, Tezel ve Alp 2021) ve manyetik ölçümler gerçekleştirilmiş, bu çalışmalar sayesinde birçok mezar odası jeofizik tekniklerle görüntülenmiştir.

Manyetik alan ölçümleri, akeojeofizikte 1950' lerden beri kullanılmaktadır (Belshé 1957, Aitken 1958, 1959). Günümüzde arkeolojik kazılar öncesinde jeofizik yöntemlerle kazı öncesi görüntüleme, hem alanın mevcut durumunun tespit edilmesi hem de kazıların hasarsız gerçekleştirilmesi için yaygın uygulanan bir prosedürdür. Arkeolojide manyetik yöntem uygulamalarında karşılaşılan pozitif manyetik anomaliler genelde bir yere toprak doldurulduğunu işaret ederken, negatif manyetik anomaliler pişmiş toprak veya duvar gibi zayıf manyetik özellik gösteren materyalleri işaret eder (Fassbinder 2023).

Farklı manyetizasyon şiddetine sahip yapı sınırları, potansiyel alan anomali haritalarında çizgisellikler olarak görünürler. Bu nedenle, manyetik alan ölçümlerinin yorumunda sınır analizi yöntemlerine sıklıkla başvurulur.

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Oya Tarhan Bal* *e-posta/e-mail: tarhan@iuc.edu.tr*

Aşağı ve yukarı analitik uzanım, filtre, yatay ve düşey türevler, ters çözüm anomalilerin yorumlanması için en çok başvurulan yöntemlerdendir. Manyetik veri haritalarının yorumlanması amacıyla, Modestino ve Fries (1977), Keating ve Pilkington (1990), Pilkington (2006) türev tabanlı yöntemler kullanmıştır. Toplam yatay türev ve analitik sinyal, gömülü yapı kenarlarını tespit etmek için sıklıkla kullanılır (Pilkington ve Keating 2004, Cooper ve Cowan 2008, Cooper 2009). Anomali haritalarından elde edilen yatay türevlerin maksimum değerleri anomaliye sebep olan kaynak kütlelerin sınırlarına karşılık gelmektedir. Manyetik verilerin 2B ve 3B ters çözümü 1980'lerden beri yer altındaki yapıların modellenmesi için kullanılmaktadır (ör. Guillen ve Menichetti 1984). Ters çözüm yöntemlerinin yaygın kullanımıyla birlikte arkeojeofizik uygulamaları da artmıştır (ör. Argote vd. 2009, Aykroyd vd. 2014, Cheyney vd. 2015). Potansiyel alanların (gravite, manyetik) ters çözümünde en çok uygulanan yaklaşımsa Li ve Oldenburg (1996) tarafından tanımlanan yuvarlatıcı düzgünleştiricili ters çözüm yaklaşımıdır. Düzgünleştiriciler, kötü koşullanmış ve eksik tanımlı problemlerin ters çözümü için ilk olarak Tikhonov ve Arsenin (1977) tarafından tanımlanmıştır ve hemen hemen bütün jeofizik yöntemler için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, Toplam Yatay Türev (TYT), Analitik Sinyal (AS), Tilt Açısı (TA) yöntemleri ve 3B ters çözümle arkeojeofizik yorumlamaya gerçekleştirilebilecek katkıların tartışılabilmesi için önce sentetik veriler üzerinde sınanmış, daha sonra çalışma alanında yer almakta olan ve bütünlüğünü önemli ölçüde korumakta olan bir mezar odasının tanımlanması için uygulanmış ve yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Toplam Yatay Türev (TYT), Analitik Sinyal (AS) ve Tilt Açısı (TA)

Gömülü yapıların kenar saptamasında yaygın olarak kullanılan toplam yatay türev (TYT) yöntemi (Cordell ve Grauch 1985) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$TYT = \sqrt{(\frac{\partial M}{\partial x})^2 + (\frac{\partial M}{\partial y})^2} \quad (1)$$

Burada M Manyetik alan olup, $\frac{\partial M}{\partial x}$ ve $\frac{\partial M}{\partial y}$ sırasıyla manyetik alanın x ve y yönündeki türevleridir.

3D yapılar için analitik sinyalin (AS) genliğinin ifadesi Roest v.d. (1992) tarafından tanımlanan türev tabanlı bir sınır belirleme yöntemidir ve aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$AS = \sqrt{(\frac{\partial M}{\partial x})^2 + (\frac{\partial M}{\partial y})^2 + (\frac{\partial M}{\partial z})^2} \quad (2)$$

Bu eşitlikte, $\frac{\partial M}{\partial x}$, $\frac{\partial M}{\partial y}$ ve , $\frac{\partial M}{\partial z}$ potansiyel alanının sırasıyla x, y, z yönündeki türevlerini gösterir.

Tilt açısı (TIA) yöntemi Miller ve Singh (1994) tarafından geliştirilmiştir. Anomaliye neden olan jeolojik veya arkeolojik yapıların yerini belirlemek için kullanılmaktadır. Tilt açısı uygulanmış anomali, yapının merkezinde maksimum ve pozitif değerlere sahiptir, yapının sınırlarında ise sıfıra yakınsamaktadır. Yapının dışındaki kısımlarda ise anomali değerleri negatif olur. Genellikle sığ yapıların görüntülenmesinde kullanılır. Tilt açısının matematiksel bağıntısı aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$TA = \tan^{-1}\left[\frac{\frac{\partial M}{\partial z}}{\sqrt{(\frac{\partial M}{\partial x})^2 + (\frac{\partial M}{\partial y})^2}}\right] \quad (3)$$

Bu eşitlikte, $\frac{\partial M}{\partial x}$, $\frac{\partial M}{\partial y}$ ve , $\frac{\partial M}{\partial z}$ potansiyel alanının sırasıyla x, y, z yönündeki türevlerini gösterir

2.2 3B Ters çözüm

Bu çalışmada 3B manyetik ters çözüm için, bir Python kütüphanesi olan pyGIMLi (Rücker ve Günther 2016) bünyesindeki algoritma kullanılmıştır. Algoritma yer altını, dörtgen prizmalarla ayrıklaştırarak Holstein vd. (2007)'ye göre düz çözüm gerçekleştirir. Ters çözüm algoritması aşağıdaki fonksiyonu en küçüklemeye çalışır,

$$\varphi(m) = \|W_d(F(m) - d_{obs})\|^2 + \mu\left\|W_m(m - m_{ref})\right\|^2 \quad (4)$$

Eşitlikte, $\varphi(m)$ en küçüklenmek istenen amaç fonksiyonu, W_d verilerin varyanslarını içeren köşegenel veri ağırlığı matrisi, d_{obs} gözlenen veriler, m model parametreleri, m_{ref} referans modeli, $F(m)$ model parametreleri için düz çözüm sonucu (hesaplanan veri), μ Lagrange çarpanı, W_m model ağırlık matrisidir. Potansiyel alan verilerinde gerçek manada derinlik çözünürlüğü olmadığı için duyarlılık derinliğe bağlı olarak logaritmik azalmaktadır. Bu nedenle ters çözüm yapıları yüzeye yakın yerleştirmektedir. Yöntem bunun önüne geçmek için aşağıdaki eşitlikle tanımlanan derinlik ağırlıklandırmasını kullanır (Li ve Oldenburg 1996).

$$w_z = \frac{1}{(z + z_0)^\beta} \quad (5)$$

Eşitlikte, w_z ağırlıklandırma matrisinin köşegenel değerleri, z model ağında tanımlanan blokların derinlikleri, z_0 ağırlıklandırma değerlerini model katsayıları ile uyumlu hale getirmek için kullanılan ayar parametresi, β yağıların daha derine ya da daha sığa yerleştirilmesini sağlayan üstel parametredir.

3. Bulgular

3.1 Sentetik veri çalışmaları

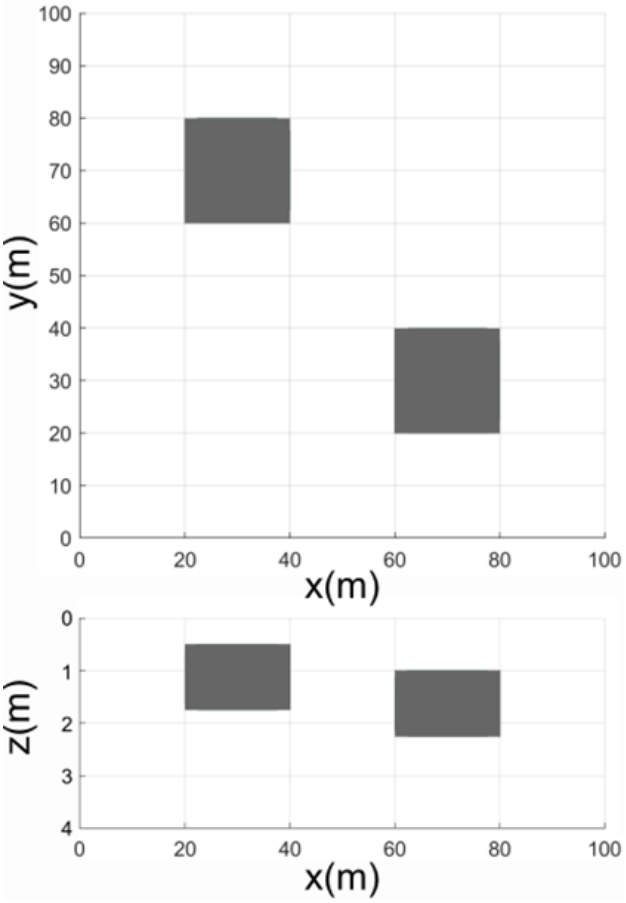
Bu çalışma kapsamında, öncelikle bir sentetik veri kümesi oluşturularak arkeolojik yapılardan kaynaklı belirtilerin sınırlarının belirlenmesi için önceki bölümde detayları verilen yöntemler uygulanmıştır.

Önerilen algoritmaları test etmek amacı ile 100x100 m boyutlu bir alanda, manyetik geçirgenliği 0.075 A/m olan x, y ve z yönünde boyutları 20x20x1 m olan iki prizmatik kütle tanımlanmıştır (Şekil 1) ve elde edilen sentetik anomalileri 5 m'de bir örneklenmiştir. Prizmatik kütlelere ait sentetik anomali Şekil 2a' da görülmektedir. Sınır analizi yöntemlerinin uygulanması sonucu elde edilen çıktılar Şekil 2b, c ve d' de gösterilmektedir. Şekilde, yöntemlerin başarılı sonuçlar sağladığı görülmektedir. Aynı sentetik veri çalışması, arazi koşullarını daha iyi yansıtmak için verilere Gauss dağılımlı rastgele değerler kullanılarak %10 gürültü eklenerek tekrarlanmıştır. Gürültü eklenmiş sentetik manyetik anomali ise Şekil 3a' da görülmektedir. Yöntemlerin uygulanması sonucu elde edilen çıkış görüntüleri Şekil 3b, c ve d' de gösterilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında, yatay türev yönteminin diğer iki yönteme göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

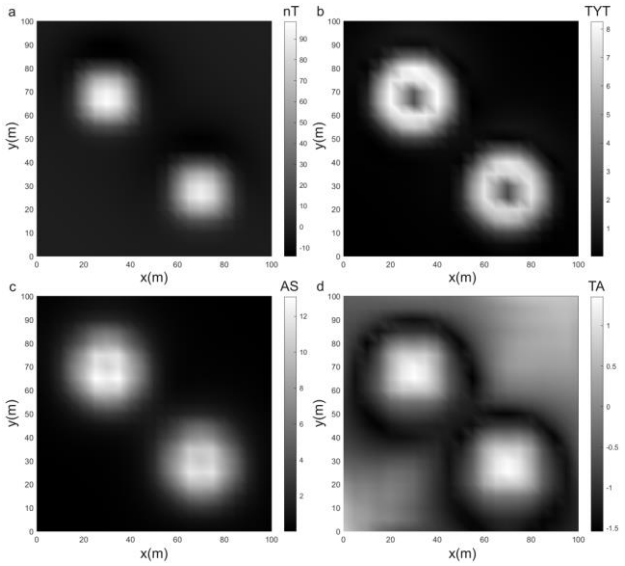
Kullanılan ters çözüm algoritması ile (Rücker ve Günther, 2016), %10 Gaussian gürültü eklenmiş (Şekil 3a) verilere otomatik trend giderme uyguladıktan sonra ters çözümü gerçekleştirilmiş ve Şekil 4' de verilen model elde edilmiştir. Trend giderilmiş veriler ve ters çözüm sonucu elde edilen modele ait gözlenen veriler, hesaplanan veriler ve veri çakışma hatası (misfit) Şekil 5'de verilmiştir.

Her noktadaki çakışma hatası, hesaplanan ve gözlenen veriler arasındaki farkın veri noktasına atanan hataya (eklenen Gaussian gürültüye uygun olarak veri genliğinin %10'u) oranı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan verilerin gözlenen verilerden büyük veya küçük olduğunun görülebilmesi için mutlak değer kullanılmamıştır.

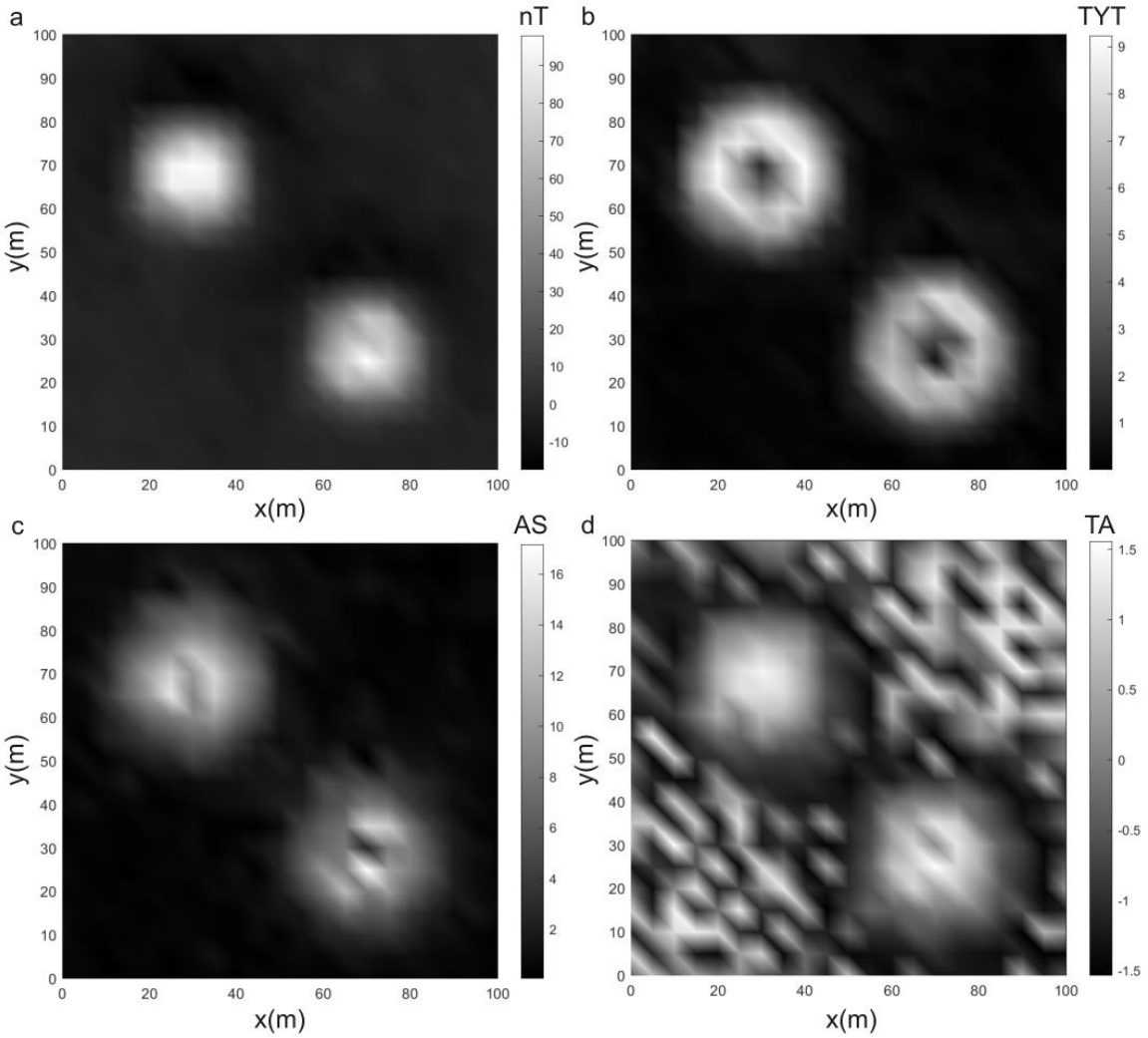
Ters çözüm sonucu elde edilen modele (Şekil 4) bakıldığında, prizmaların konum ve üst derinliklerinin doğru şekilde elde edildiği, kalınlıklarınınsa derinlik ekseninde uzadığı gözlenmektedir. Bunun sonucu olarak manyetizasyon şiddetleri gerçek değerlerinden oldukça düşük olarak belirlenebilmiştir. Sonuçlar, ters çözümün arkeolojik kalıntıların yanal sınırlarının ve üst derinliklerinin ters çözümle doğru şekilde belirlenebildiğini; alt derinliklerinin ise manyetik verilerin derinlik çözünürlüğünün olmaması, kullanılan yuvarlatıcı düzgünleştirici ve çok çözümlülük yüzünden düşey yönde uzamış belirlenebildiğini göstermektedir.



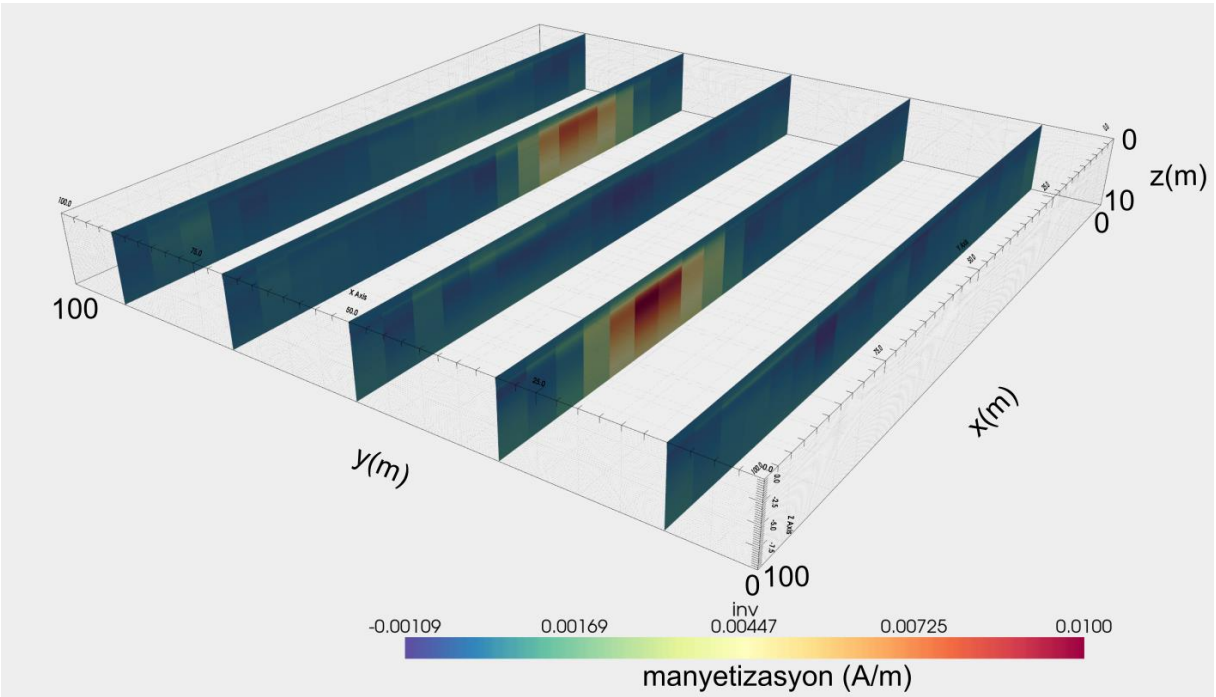
Şekil 1. Sentetik çalışmalar için kullanılan model. Model farklı derinliklere yerleştirilmiş manyetik geçirgenliği 0.075 A/m olan iki prizmatik yapıdan ibarettir.



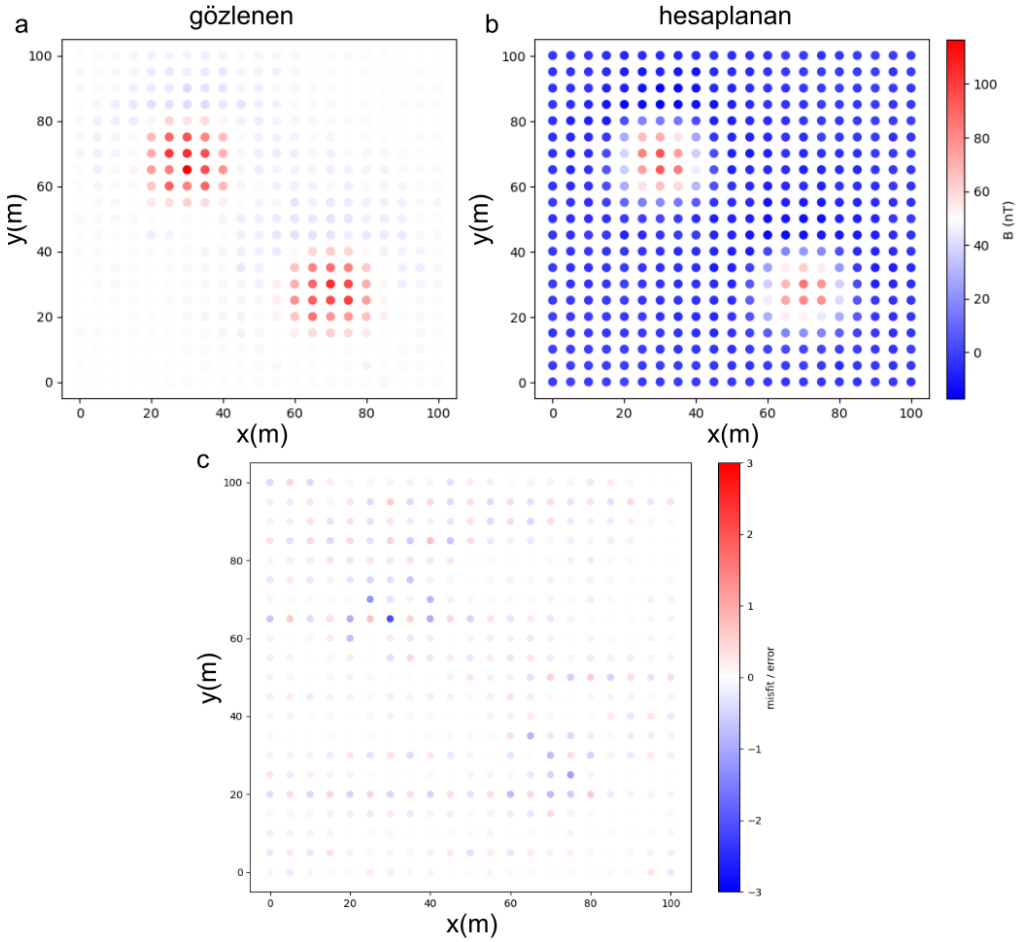
Şekil 2. a) Sentetik manyetik anomali haritası. b) Yatay Türev (TYT) haritası. c) Analitik sinyal haritası. d) Tilt açısı hartası.



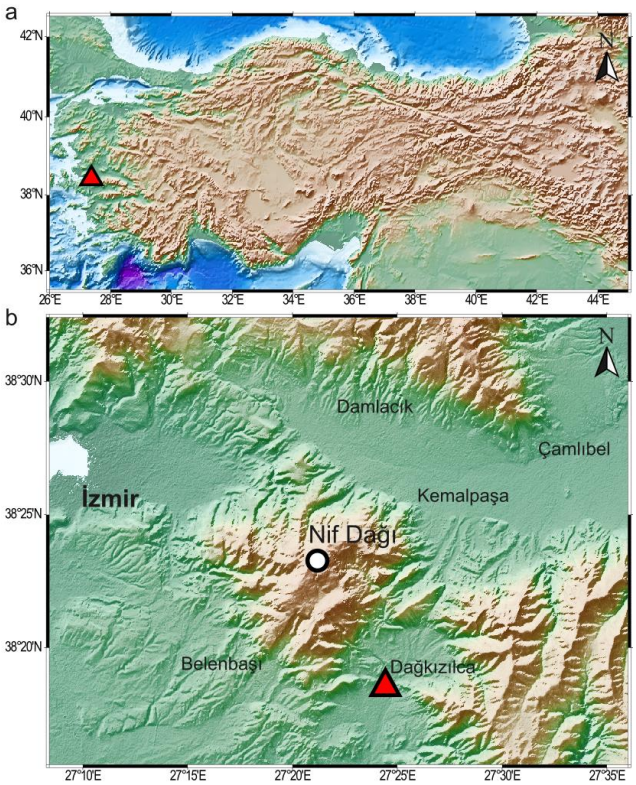
Şekil 3. a) %10 Gaussian gürültü eklenmiş sentetik manyetik anomali haritası. b) Gürültü eklenmiş Yatay türev (TYT) haritası. c) Gürültü eklenmiş Analitik sinyal haritası. d) Gürültü eklenmiş Tilt açısı hartası.



Şekil 4. %10 Gaussian gürültü eklenmiş sentetik verilerin Li ve Oldenburg (1996) ters çözümü sonucu elde edilen modelin 3B görünümü.



Şekil 5. Sentetik verilere ait otomatik trend giderme sonrası gözlenen veriler (a) ve 3B ters çözüm sonucu hesaplanan modele ait veriler (b).



Şekil 6. İzmir, Dağkızılca çalışma bölgesinin Türkiye'deki konumu (a), çalışma bölgesi ve çevresinin rölyef haritası (b).

3.2. Arazi çalışması

Nif (Olympos) Dağı, Batı Anadolu/Türkiye'de İzmir'in doğusunda yer almaktadır (Şekil 6) ve bölgedeki arkeolojik çalışmalar 2006 yılından bu yana devam etmektedir (Baykan 2016). Nif Dağı Araştırma ve Kazı Projesi kapsamında Dağkızılca'da çeşitli mezar tiplerine sahip bir nekropol ortaya çıkarılmıştır. Özellikle Helenistik mezarlar, lahit, oda ve sikkeler gibi tarihi kalıntılardan oluşan Nif (Olimpos) civarındaki alanı araştırmak oldukça önemlidir. Daha sonraki dönemlerde (Erken Helenistik dönem) inşa edilen mezarlar, seramik ve sikke verilerine göre M.Ö. dördüncü yüzyılın son çeyreği ile Geç Geometrik ve Arkaik dönemlere tarihlenen alanlarda tanımlanmıştır (Tulunay 2002).

Çalışma alanında ve çevresinde, bugüne kadar yapılan kazılarda hem inhumasyon hem de kremasyon geleneklerini yansıtan 14 mezar tespit edilmiştir (Tulunay 2011). Nif arkeolojik bölgesinde yapılan kaçak kazılar, arkeolojik mirasa büyük zarar vermiştir, bazı mezar odaları ise bütünlüğünü korumaktadır. Bu nedenle, arkeolojik kalıntıların tahribatsız belirlenmesi ve sağlıklı bir kazı ile güvenlik altına alınması önem arz etmektedir. Arkeojeofizik ön çalışmalarla arkeolojik kazıların maliyeti, süresi ve kazı sırasında antik yapı kalıntılarına gelebilecek olası hasar azaltılabilir. Jeofizik ölçümler, kalıntıların konumu, şekli, boyutu ve derinliği gibi özellikleri almanın en etkili yoludur. Bu alanda daha önce, Drahor vd. (2004), Karamattepe ve Başpınar bölgesinde manyetik veriler toplamış ve bölgede önemli bulgular ortaya çıkarmıştır. 2005 ve 2007 yılları arasında, bölgedeki jeofizik görüntüleme çalışmaları GPR ve manyetik teknikler kullanan çeşitli projelerde devam etmiştir (Yüksel 2007, 2008).

Bu çalışmada, Nif Dağı arkeolojik alanında yapılan, her iki yönde 0.5 m aralıkla toplanmış manyetik alan ölçümleri değerlendirilmiştir (Şekil 7a). Bu verilere üç farklı sınır analiz yöntemi uygulanılarak (Şekil 7 b, c ve d) kazı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlerin etkinliği gürültüsüz ve %10 Gaussian gürültülü sentetik verilerle gerçekleştirilen deneylerle (Şekil 3 ve 4) kıyaslanarak yorumlanmıştır. Uygulanan yöntemlerden, TYT ve AS mezar odasının doğu odacığının hem dış hem de iç duvar sınırlarını belirleyebilmiştir, buna karşın TA yorumlanması güç bir anomali sağlamıştır. TYT ve AS anomalileri karşılaştırıldığında ise, TYT'nin mezar odasının duvarlarının sürekliliğini daha iyi belirlediği gözlenmiştir.

Daha sonra ters çözümle yer altındaki manyetizasyon şiddeti dağılımının belirlenmesi ve yapıların derinlikleri hakkında yorumlarda bulunabilmek için pyGIMLi (Rücker ve Günther 2016) kütüphanesiyle Li ve Oldenburg (1996) ters çözümü gerçekleştirilmiştir. Ters çözüm için yeraltı her iki yanal yönde 5 m ve derinlik yönünde 0.2 m boyutlarındaki dörtgen prizma şekilli bloklardan oluşan bir ağ ile temsil edilmiştir ve her bir blok için 1e-3 A/m başlangıç değeri atanmıştır. Ters çözüm sonucu elde edilen model Şekil 8'de, elde edilen modele ait, gözlenen ve hesaplanan veriler ile çakışma hatası (hesaplanan ve gözlenen veriler arasındaki farkın veri noktasına atanan hataya oranı) Şekil 9' da gösterilmiştir.

Verilere uygulanan yuvarlatıcı düzgünleştiricili ters çözüm sonucu elde edilen modelin ise mezar odasının kuzeydoğusunda belirlenen toprak yığınından büyük ölçüde etkilendiği gözlenmektedir (Şekil 8). Alanın Batı-Güneybatı bölgesindeyse mezar duvarlarının etkisiyle düşük manyetizasyon değerleri elde edilmiştir. Bu alanda mezar duvarlarının yüzeye daha yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Düşük manyetizasyonlu bu anomalininse yaklaşık 1.5 m derinlikte sönümlendiği ve başlangıç modelinin değerlerine (1e-4 A/m) yakınsadığı gözlenmiştir. Sentetik model çalışmalarında da görüldüğü üzere (Şekil 6), manyetik verilerin ters çözümü sonucu elde edilen modellerde yapılar düşey yönde uzamış olarak elde edilebilmektedir. Buradan hareketle duvarların alt sınırlarının en fazla 1.5 m derinliğe indiği yorumu yapılabilir.

Kazılar sonucu açılan mezar odasının (Şekil 10) duvarlarının üst derinliğinin [0, 0.25] m aralığında, alt derinliğinin de yaklaşık 1.5 m olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bulgular, dikkatli biçimde kullanıldığı takdirde ters çözümle yapıların derinlikleri hakkında önemli bilgilere ulaşılabildiğini bir kere daha göstermiştir. Buna karşın, ters çözüm sonucunda (Şekil 8) mezar odasının duvarları yan sınırları tespit edilememektedir. Bunun sebebi, kullanılan yuvarlatıcı düzgünleştiricinin aşırı yuvarlatılmış (oversmoothed) modeller vermesi olarak yorumlanmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç

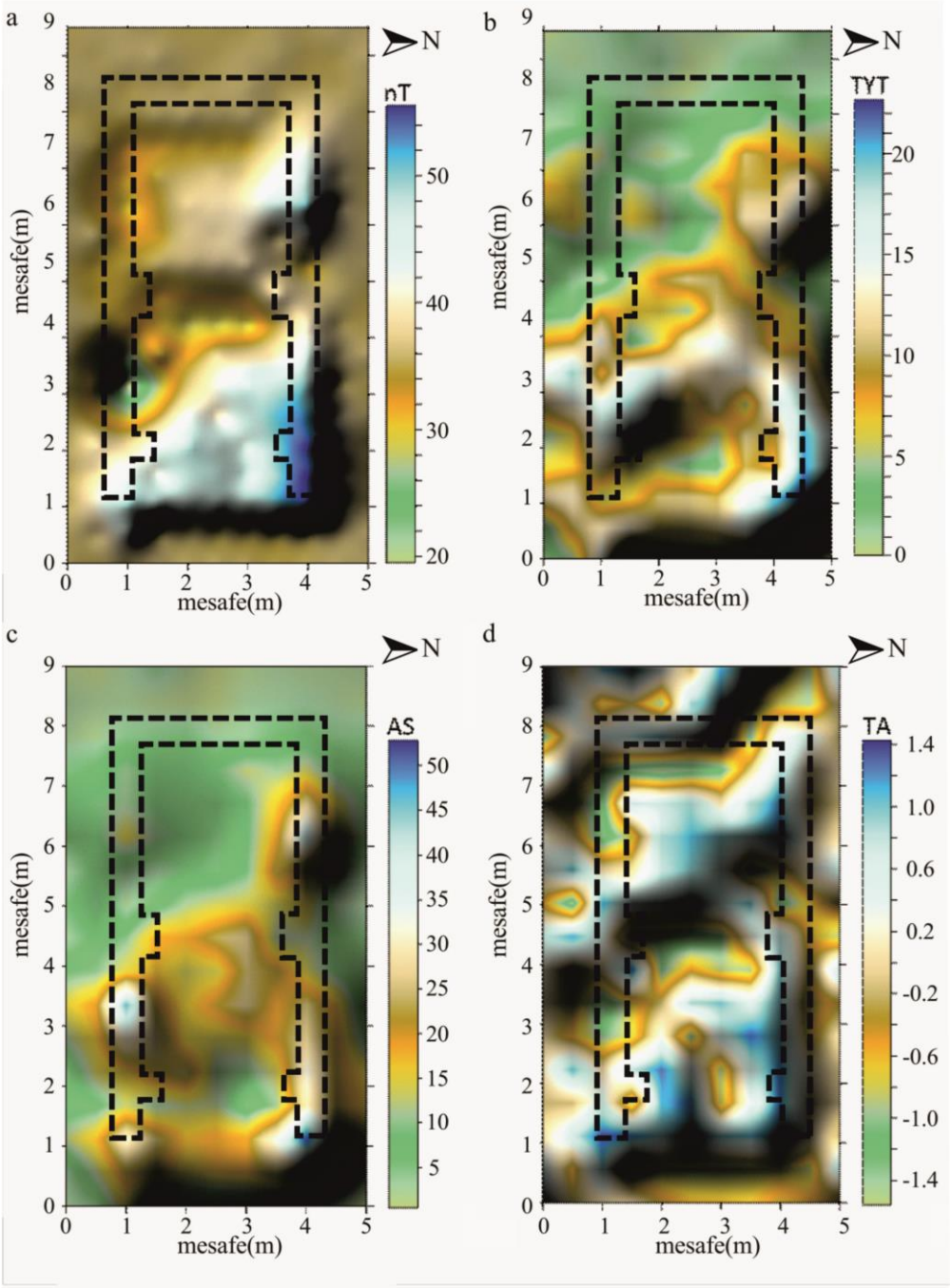
TYT, AS ve TA yöntemleri, doğal potansiyel kaynaklı verilerin yorumlanması için sıklıkla uygulanmaktadır. Bu yöntemler önce gürültüsüz sentetik model üzerine daha sonra %10 Gaussian gürültü eklenmiş sentetik model üzerine uygulanmıştır. Daha sonra bu yöntemler arazi verisine uygulanmıştır.

Şekil 1' de görülen çalışma alanına ait manyetik verilerdeki (Şekil 7a), ince ayrıntıları geliştirmek ve sığ ve derin yapıların kenarlarını belirlemek amacı ile TYT, AS, TA yöntemleri uygulanmıştır (Şekil 7 b, c ve d). Bu sonuçları bakıldığında, yatay türev ve analitik sinyal yönteminin oda mezar (Şekil 10) ile daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.

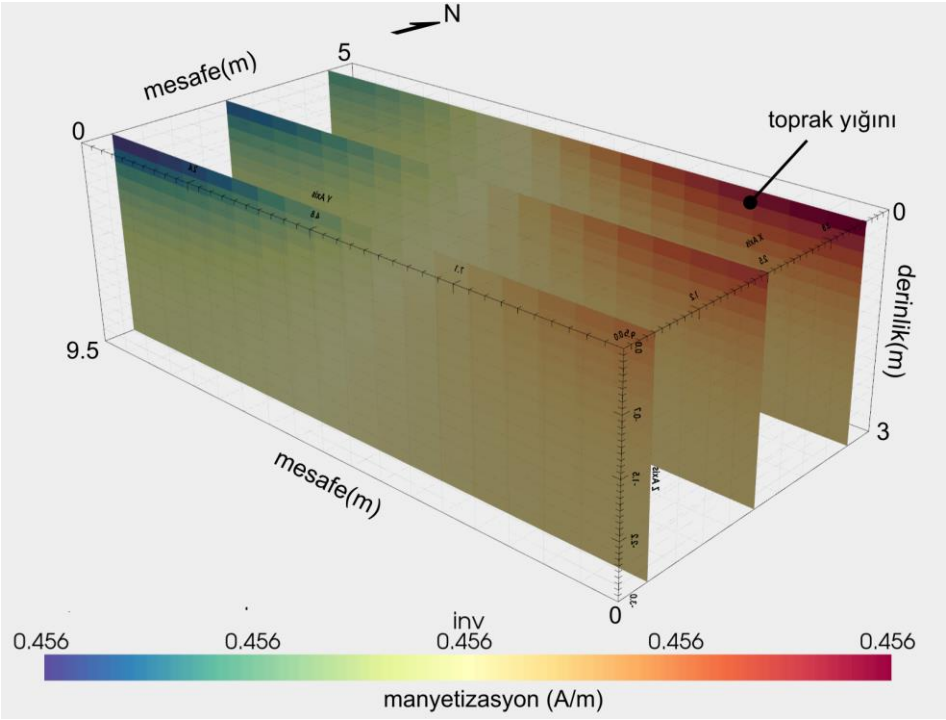
Mezarın kuzeydoğu sınırındaki yüksek anomali (Şekil 7a) ise buraya toprak yığıldığını işaret etmektedir. Uygulanan düzgünleştiricili ters çözüm yöntemi ise mezar odasının güneydoğu ucundaki toprak yığınını belirleyebilmiştir (Şekil 9), buna karşın kullanılan yuvarlatıcı düzgünleştirici nedeniyle yanal yöndeki yapı sınırlarını belirlemekte

yetersiz kalmıştır. Bu nedenle, küçük sahalarda ters çözüm yöntemleri uygulanırken keskin sınırlar verebilen ters çözüm yöntemleri tercih edilebilir. Ters çözüm sonucunda elde edilen modelde, modelin Batı-Güneybatı bölgesinde gözlenen düşük manyetik geçirgenliğe sahip bölge, burada mezar odası duvarlarının yeryüzüne yakın olduğunu işaret etmektedir. Bu düşük manyetizasyonlu bölgenin alt sınırının yaklaşık 1.5 m derinliğe indiği gözlenmiştir, bu derinlik mezar odasının açılmasından sonra belirlenen duvarların alt derinliği ile uyumludur.

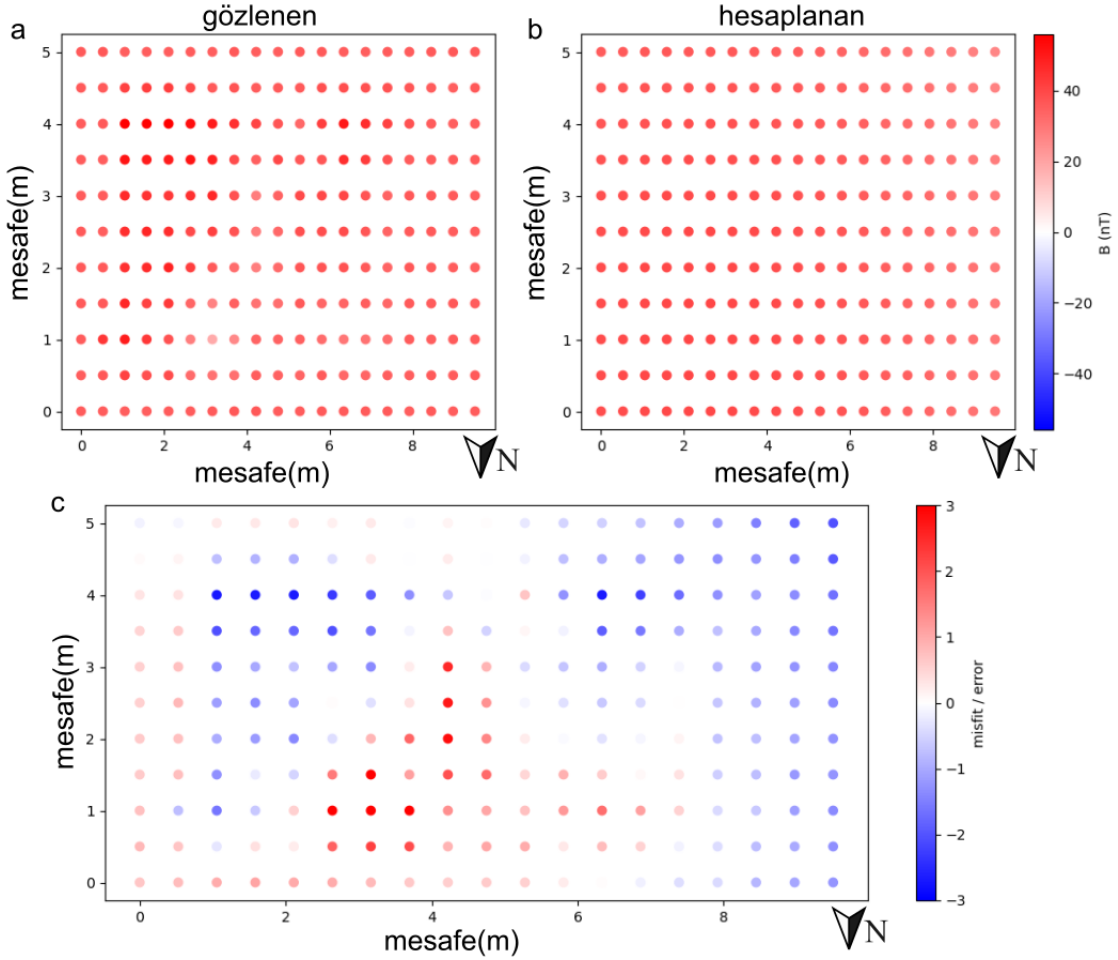
Arkeolojik alanlarda gerçekleştirilen çalışmalarda, sığ derinlikte gömülü yapıların sınırlarının tespitinde türev tabanlı analiz yöntemlerinin etkinliği gösterilmiş, sonuçların hızlı bir yorumlama olanağı sağladığı görülmüştür. Manyetik verilerin 3B ters çözümü ise, kullanılan yuvarlatıcı fonksiyondan, çok çözümlülükten ve yöntemin derinlik çözünürlülüğü bulunmamasından kaynaklı zorluklara sahip olsa da dikkatli kullanıldığı zaman yapıların gerçek derinliklerine ilişkin bilgi sağlayabilmektedir.



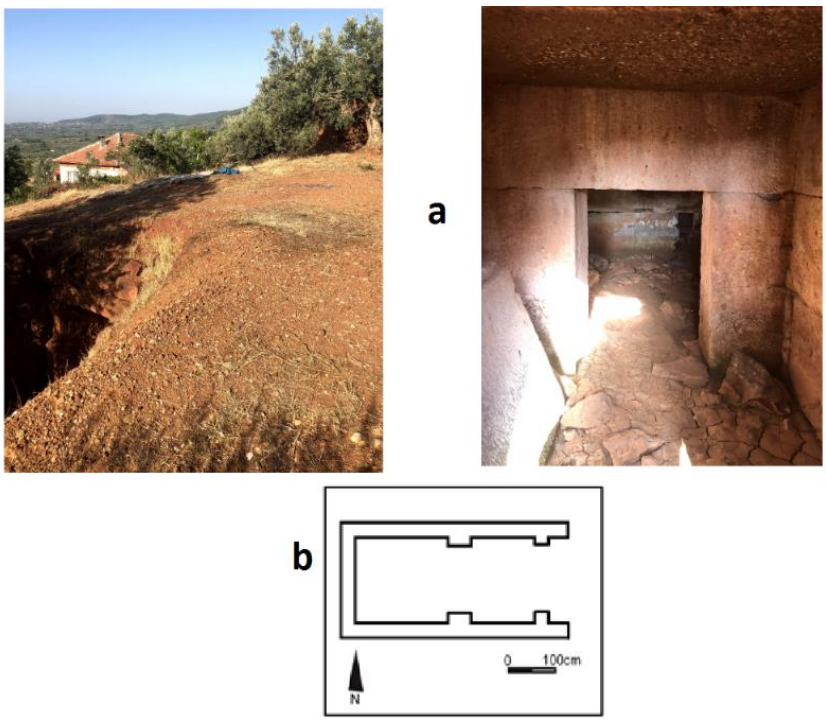
Şekil 7. a) Dağkızılca bölgesinde bulunan oda mezarda alınan manyetik anomali haritası. b) Yatay Türev (TYT) haritası. c) Analitik sinyal haritası. d) Tilt açısı hartası. Şekilde kazı sonucu belirlenen yapı sınırları siyah kesik çizgiyle gösterilmiştir.



Şekil 8. Li ve Oldenburg (1996) ters çözümü sonucu elde edilen modele ait manyetizasyon modeli.



Şekil 9. Gözlenen veriler (a), Li ve Oldenburg (1996) ters çözümü sonucu elde edilen modele ait hesaplanan veriler (b), gözlenen ve hesaplanan veriler arasındaki çakışma hatası (c).



Şekil 10. Dağkızılca bölgesinde bulunan oda mezar alanına ait fotoğraflar (a) ve oda mezarın şematik görüntüsü (b).

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazar, bu çalışmada bütün etik standartlara uyduğunu beyan eder.

Çıkar Çatışması Beyanı
Yazarın bu makale içeriğiyle ilgili beyan edeceği hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği
Bu makale kapsamında kullanılan veri kümesi istek üzerine paylaşılacaktır.

Teşekkür

Bu makalenin iyileştirilmesi için öneri ve görüşlerini sunan editör ve hakemlere teşekkür ederim. Kazı projesi başkanı Prof.Dr. Elif Tül Tulunay'a teşekkür ederim.

5. Kaynaklar

Aitken M. J., 1958. Magnetic prospecting I. Archaeometry **1(1)**, 16–20.

Aitken, M. J., 1959. Magnetic prospecting: An interim assessment. Antiquity, **33(131)**, 205-208. https://doi.org/10.1017/S0003598X00027502

Argote, D. L., Tejero, A., Chávez, R. E., López, P. A., & Bravo, R., 2009. 3D modelling of magnetic data from an archaeological site in north-western Tlaxcala state, Mexico. Journal of Archaeological Science, **36(8)**, 1661-1671. https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.03.004

Aykroyd, R. G., & Al-Gezeri, S. M., 2014. 3D modelling and depth estimation in archaeological geophysics. Chilean Journal of Statistics, **5(1)**, 19-35.

Baykan, D., 2016. Antik Madencilik Çerçevesinde Nif Dağı Kazıları. MT Bilimsel, **9**, 25-33.

Belshé, J. C., 1957. Recent magnetic investigations at Cambridge University. Adv Phys, **6(22)**, 192–193. https://doi.org/10.1080/00018739700101561

Cheyney, S., Fishwick, S., Hill, I. A., & Linford, N. T., 2015. Successful adaptation of three-dimensional inversion methodologies for archaeological-scale, total-field magnetic data sets. Geophysical Journal International, **202(2)**, 1271-1288. https://doi.org/10.1093/gji/ggv177

Cooper, G. R. J. & Cowan, D. R., 2008. Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics. Geophysics, **73(3)**, H1-H4. https://doi.org/10.1190/1.2837309

Cooper, G. R. J., 2009. Balancing images of potential-field data. Geophysics, **74(3)**, L17-L20. https://doi.org/10.1190/1.3096615

Cordell, L., & Grauch, V. J. S., 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin, New Mexico, in W. J. Hinze, ed., The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps: SEG, 181-197. https://doi.org/10.1190/1.0931830346.ch16

Drahor, M. G., Berge, M. A., Kurtulmuş, Ö., 2004. Nif (Olympos) Dağı Araştırma Projesi: Yüzey Araştırması, Türk Eskiçağ Bilimleri Enstitüsü, Haberler, **20**, 33–35.

Fassbinder, J. W., 2023. Magnetometry for archaeology. In Encyclopedia of geoarchaeology (pp. 1-16). Cham: Springer International Publishing.

Guillen, A., & Menichetti, V., 1984. Gravity and magnetic inversion with minimization of a specific functional. Geophysics, **49(8)**, 1354-1360.

https://doi.org/10.1190/1.1441761

Holstein, H., Sherratt, E. M., Reid, A. B., 2007. Gravimagnetic field tensor gradiometry formulas for uniform polyhedra, SEG Ext. Abstr.

Keating, P. B. & Pilkington, M., 1990. An automated method for the interpretation of magnetic vertical-gradient anomalies, Geophysics, **55**, 336-343. https://doi.org/10.1190/1.1442841

Li, Y., & Oldenburg, D. W., 1996. 3-D inversion of magnetic data. Geophysics, **61(2)**, 394-408. https://doi.org/10.1190/1.1443968

Miller, H. G., Singh, V., 1994. Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources. Journal of Applied Geophysics, **32(2-3)**, 213-217,1994. https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1

Modestino, J. W., and Fries, R. W., 1977. Edge detection in noisy images using recursive digital filter, Comput. Graphics Image Process, PAMI-1, 409–433. https://doi.org/10.1016/S0146-664X(77)80020-8

Pilkington, M., and Keating, P., 2004. Contact mapping from gridded magnetic data – a comparison of techniques, Exploration Geophysics, **35**, 206-311. https://doi.org/10.1071/EG04306

Pilkington, G. R. J., 2006. Obtaining dip and susceptibility information from Euler deconvolution using the Hough transform, Computers & Geosciences, 3292–1599. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.02.019

Roest, W. R., Verhoef, J., & Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. Geophysics, **57(1)**, 116-125. https://doi.org/10.1190/1.1443174

Rücker, C., & Günther, T., 2016. Geophysical modeling and inversion library GIMLi—A C++/Python library for geophysical data analysis.

Tezel, O., & Alp, H., 2021. High-resolution electrical resistivity imaging of buried grave in Nif (Olympos) Mountain/Izmir. Arabian Journal of Geosciences, **14(22)**, 2357. https://doi.org/10.1007/s12517-021-08741-5

Tikhonov, A. N., 1977. Solutions of Ill-Posed Problems. VH Winston and Sons.

Tite, M. S., & Mullins, C., 1971. Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites. Archaeometry, **13(2)**, 209-219.

Tulunay E. T., 2002. Nif (Olympos) Dağı Araştırma Projesi Önİnceleme Gezileri 1999–2001, Haberler, **14**, 18 – 19.

Tulunay, E. T., 2004. Nif (Olympos) Dağı Araştırma Projesi: 2004 Yılı Yüzey Araştırması, 23. Araştırma Sonuçları Toplantısı 2.Cilt.

Tulunay E. T, 2011. Nif (Olympos) Dağı Kazı ve Araştırma Projesi: 2009 Yılı Kazısı, KST, **32–3**, 405–423.

Yaman, T. T., 2022. Rough Sets Based Spatial Analysis for Metal Production Area at Mount Nif. Türk Arkeoloji ve Etnografya Dergisi, **84**, 65-81.

Yiğit, A., Kırmızıoğlu, P. G., & Yavuz, A. Y., 2007. Nif (Olympos) Dağ Kazısı. Arkeometri Sonuçları Toplantısı, 111.

Yüksel, F. A., 2007. Nif (Olympos) Dağı Kazı ve Araştırma Projesi. Türk Eskiçağ Bilimleri Enstitüsü, Haberler, **23**, 32–34.

Yüksel, F. A., 2008. Nif (Olympos) Dağı Kazı Çalışmaları. Türk Eskiçağ Bilimleri Enstitüsü, Haberler, **25**, 30–32.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1510101
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 035901 (686-694)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 035901 (686-694)

Investigation of Centrifugal Pump Used in Irrigation by Numerical (CFD Analysis) and Experimental Methods

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 06.07.2024
Kabul/Accepted: 03.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Sulamada Kullanılan Santrifüj Pompanın Sayısal (HAD Analizi) ve Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi

Mehmet KURT[1*], Kazım ÇARMAN[2]

[1]*Selçuk University, Cihanbeyli Vocational School, Department of Management and Organization, Konya, Türkiye*
[2] *Selçuk University, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Machineries and Tecnologies Engineering, Konya, Türkiye*

Abstract

The goal in centrifugal pump designs is to achieve maximum efficiency. Even small percentage increases in pump efficiency provide high overall energy savings in pumps that operate for long periods of time, especially those that use high-power motors. While fan and casing structures are designed in line with this goal, many structural features affect the efficiency of the pumps. In the study, pump performance values of the 5" horizontal shaft centrifugal pump at different flow rates were measured in the laboratory. Depending on the change in pump flow rates, it was determined that the pump power consumption varied between 15-42kWh and the efficiency values varied between 32.63-55.57%. Considering the statistical compatibility of the measured pump performance values with the values obtained by CFD, it was determined that the coefficient of determination of the measured and predicted values varied between 0.870 and 0.936, which is quite high. The mean absolute percentage error was determined to be well below the acceptable value of 10%.

Keywords: *Centrifugal pump, power consumption, manometric height, efficiency, CFD*

Öz

Santrifüj pompa tasarımlarında amaç maksimum verime ulaşmaktır. Pompa verimliliğindeki küçük yüzdesel artışlar bile, özellikle yüksek güçlü motorlar kullanan, uzun süre çalışan pompalarda yüksek toplam enerji tasarrufu sağlar. Fan ve gövde yapıları bu amaç doğrultusunda tasarlanırken birçok yapısal özellik pompaların verimini etkilemektedir. Çalışmada 5"'lik yatay milli santrifüj pompanın farklı debilerdeki pompa performans değerleri ölçülmüştür. Pompa debilerindeki değişime bağlı olarak pompa güç tüketiminin 15-42kWh arasında değiştiği, verim değerlerinin ise %32,63-55,57 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ölçülen pompa performans değerlerinin CFD ile elde edilen değerlerle istatistiksel uyumu göz önüne alındığında, ölçülen ve tahmin edilen değerlerin determinasyon katsayısının oldukça yüksek bir değer olan 0,870 ile 0,936 arasında değiştiği saptanmıştır. Ortalama mutlak yüzde hatasının ise kabul edilebilir sınır değer olan %10'un oldukça altında olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Santrifüj pompa, güç tüketimi, manometrik yükseklik, verim, HAD*

1. Introduction

Irrigation in agriculture is the delivery of water needed by the plant, which cannot be met by rainfall, to the root zone of the plant in the soil, at the required place and time. It has been determined that 57 billion m3 of our country's total water potential is used for various purposes, 44 billion m3 (77%) of which is used as irrigation water and 13 billion m3 (23%) is used as drinking-use and industrial water. Our country has 24 million hectares of arable agricultural land, and the economically irrigable amount of this is determined as 8.5 million hectares. In our country, approximately 81.9% of the 8.5 million hectares of economically irrigable agricultural area can currently be irrigated. Turkey's population is announced as 84,680,273 people by TURKSTAT as of 2022. While the annual amount of water per capita in our country was 1 652 m3 in 2000, it decreased to 1 322 m3 in 2022. Considering the usable water potential per capita, Turkey is among the countries experiencing water stress. Therefore, it is important to use water economically and optimally.

Design parameters such as number of blades, blade exit angle, blade width and impeller exit diameter affect pump performance and energy consumption. Impellers with intermediate blades are used to eliminate the low efficiency, which is one of the biggest problems of low specific speed pumps, and to ensure more efficient use of energy. By adding intermediate vanes at rates of 40, 55,

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Mehmet KURT* *e-posta/e-mail: mehmet.kurt@selcuk.edu.tr*

70 and 85% of the main vane length to submersible pump impellers with different blade numbers and blade exit angles, the effects of the intermediate vane length on the submersible pump performance were examined. The optimum number of blades was found to be z=6, the optimum blade exit angle 25° and the optimum intermediate blade length was 0.70·L ~ 0.85·L (Korkmaz, 2015).

The effect of impeller design variables on efficiency and cavitation performance in centrifugal pumps with different specific speeds is important. In this study conducted by Demirel (2021), impeller design was made with CFTurbo software for centrifugal pumps with four different specific speeds, and efficiency and cavitation performances were determined by performing Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis of the designed impellers.

Calisir et al. (2003) calculated the performance values of centrifugal pumps in their study with the help of statistical prediction equations and Artificial Neural Network. In training ANNs, the extended delta-bar-delta learning algorithm with a multilayer perceptron structure was used as data for the experimental results and measured structural parameters of 21 different pumps in the training and testing process. They stated that the results obtained from the neural model were closer to the experimental data than the results obtained from the statistical prediction equations.

Taner (2007) designed centrifugal pumps using ANN techniques. For this purpose, the pump speed, flow rate and manometric height parameters were used as input data, and the impeller inlet diameter, impeller outlet diameter, number of impeller blades, pump inlet pipe diameter and pump outlet pipe diameter parameters were used as output data. The mean error in prediction to the measurement values of the pump design parameters, impeller inlet diameter, impeller outlet diameter, number of impeller blades, pump inlet pipe diameter and pump outlet pipe diameter, was 2.43%, 3.37%, 2.11%, 3.29% and 5.11%, respectively. The degree of agreement was obtained as 0.0009, 0.0008, 0.0007, 0.0012 and 0.0019, respectively.

The effect of impeller design variables on efficiency and cavitation performance in centrifugal pumps with different specific speeds is important. In this study conducted by Demirel (2021), impeller design was made with CFTurbo software for centrifugal pumps with four different specific speeds, and efficiency and cavitation performances were determined by performing Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis of the designed impellers. The flow in a centrifugal pump generally displays a turbulent appearance due to reasons such as three-dimensional, turbulent, boundary layer separations, inlet/outlet circulations and cavitation. The design of the pump depends on many parameters, and the impeller and body geometry has a complex structure. The flow in a centrifugal pump generally displays a turbulent appearance due to reasons such as three-dimensional, turbulent, boundary layer separations, inlet/outlet circulations and cavitation. The design of the pump depends on many parameters, and the impeller and body geometry has a complex structure. In study, numerical analyzes of a pump from three different perspectives (Modal, Flow and Structural) were made under ANSYS Workbench commercial software. In the modal analysis, the natural frequencies of the pump corresponding to three different support situations were determined. The determined natural frequencies were compared with the rotation frequency of the pump and the blade passing frequencies (Tural, 2013).

Toprak (2007) tested vertical shaft deep well pumps with three different nominal diameters (4”, 5” and 6”) at optimum speed and 6 different number of stages and investigated the effect of the number of stages on pump efficiency and efficiency components. According to the research results, increasing the number of stages increased the overall efficiency of the pump. The increase in efficiency is caused by the fact that the increase in the power absorbed by the pump due to the increase in the number of stages is smaller than the increase in the flow rate and pressure values produced by the pump.

The use of computational fluid dynamics in pump designs provides advantages in terms of time and cost by reducing repetitive prototyping and testing processes, and makes it possible to obtain data on the flow in the pump even at points that are impossible to observe experimentally. Thus, if flow characteristics that may cause a decrease in efficiency are observed, corrections can be made to the pump geometry. In the study, the pump performance curve obtained from the analysis for five flow rates was compared with the pump performance curve obtained from the tests. When these five points were compared with the tests, it was seen that the error rate did not exceed 10% (Uçar, 2017). The 3-stage centrifugal pump, whose design parameters are 2850 rpm, 12.5m3h-1 flow rate and 40 meters head, has been tested at 1900 rpm operating conditions as well as the design cycle. The flow structure between the two blades within the pump impeller was determined experimentally in the middle of the impeller exit width using the Particle Imaging Velocimetry (PIV) method. The relative difference

between the PIV-CFD results obtained with 16 different points created within the pump impeller was found to be between 5.7-21.2% (Aksoy, 2018).

In this study, the operating characteristics (manometric height, power consumption and efficiency) of a locally made, single-inlet, stepless, horizontal shaft centrifugal pump with a nominal diameter of 5", which is widely used in irrigation, were determined at 10 different openings of the discharge line control valve. The performance output of the pump obtained through CFD analysis was compared with experimental results.

2. Materials and Methods

Centrifugal pump, S.Ü. It was tested in the Pump Test Unit of the Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Machinery and Technologies Engineering. The general view of the pump test unit is given in Figure 1. The water tank (1), which has a volume of approximately 50 m3, does not contain solids, is cold and clean, and is 4 m deep. The suction line is equipped with a foot valve and strainer (2), a suction pipe (3), a 90 mm suction line elbow (4), a suction line adjustment (control) valve (5) and a vacuum meter (6). The discharge line is equipped with a vertical outlet pipe (7), a 90 mm elbow (8), a horizontal discharge line pipe (9), a pressure gauge (10) and a discharge line adjustment (control) valve (11). Movement to the pump (12) is transmitted from the mechanical variator (14) coupled to the electric motor (13) with the help of a jointed shaft (15). There is a control panel with electrical indicators in section 16. Some technical specifications of the tested pump are given in Table 1. The dimensions of the physical dimensions of the pump given in Table 1 are given in Figure 2.

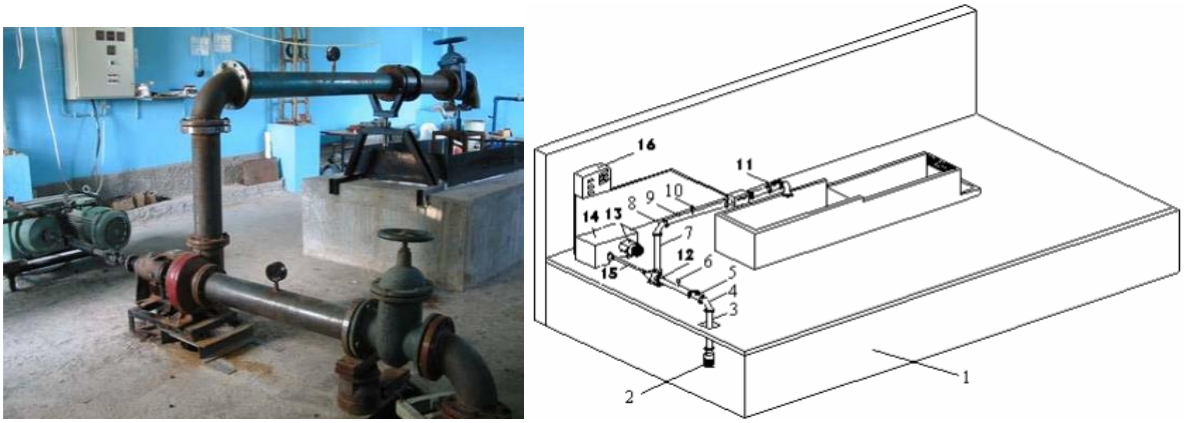


Figure 1. Experimental unit where pump trials were carried out

Table 1. Some technical specifications of the pumps used in the trial.

Pump (")	D_1 (mm)	D_2 (mm)	b_2 (mm)	z (adet)	D_e (mm)	D_b (m)
5	140	260	27	8	125	120

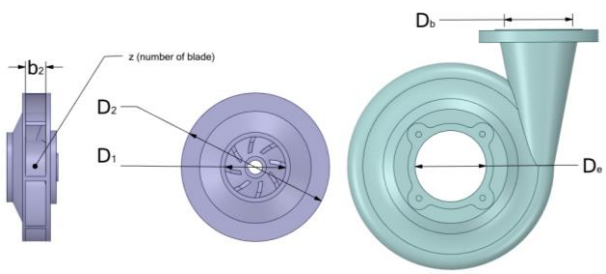


Figure 2. Schematic view of pump dimensions

The symbols in the pump dimensions De indicates the pump suction diameter, Db indicates the discharge diameter, D1 indicates the pump impeller suction diameter, D2 indicates the pump impeller outer diameter. The discharge width of the impeller is expressed by b_2 and the number of vanes is expressed by z. First, a manometer with a measurement range of 0-25 $kgcm^{-2}$ was connected to the discharge line. Then, the suction line control valve was fully opened and the discharge line control valve was fully closed. The output speed setting of the mechanical variator was minimized and the engine was given initial start. The variator speed was increased to the prescribed number of revolutions and the highest manometer pressure was read. The flow rate, positive and negative pressures, the electrical power drawn by the system from the network and the data of the experimental unit at 10 valve openings, starting from the fully closed position of the suction line control valve at the set speed, until the discharge line control valve is fully open. Static suction height, diving depth and vertical height values between manometer and vacuum meter were recorded.

In centrifugal pump trials, output flow values were measured volumetrically with an electromagnetic flowmeter. Electromagnetic flowmeters with flanged digital displays, resistant to 16 bar pressure, were used in accordance with the column pipe diameter of the pump. The outlet pressure was in the 0-10 bar pressure range,

and the pressure values were determined with the help of a manometer. Pressure values were used to obtain manometric height. In the pump, manometric height (Hm) was calculated with the following equation (Baysal 1975, Tezer 1978).

$$Hm = 10.2Pb + 0.0136Pe + Hk + Hv + \Delta z \quad (1)$$

Here; Hk is the pipeline friction losses (m), Hv is the velocity energy height of the pumped water (m), Δz is the vertical distance between the monometer-vacuummeter axes (m).

The measurement of the power drawn from the speed was made with a power analyzer. Suitable operating conditions were ensured by setting the pump operating speed to 2350 min^{-1} with the help of the electronic panel. Electric power was measured as the power drawn from the mains (N_s) with the help of the panel.

The following links are given for pump properties and performance indicators to be obtained from experimental and numerical results (Babayiğit et al. 2015).

$$N_h = \frac{\rho g Q H_m}{1000} \quad (2)$$

$$N_m = \frac{T_S.\omega}{1000} \quad (3)$$

Among the symbols in the equations, N_h indicates hydraulic power, ρ indicates fluid density, g indicates gravitational acceleration, Q indicates volumetric flow rate, and Hm indicates head. All units comply with the SI unit system and basic units are used. The reason for dividing the power by 1000 is to show the power in kWh. On the other hand, N_m indicates shaft power, T_s indicates the torque in numerical analysis, and ω indicates angular speed. Pump efficiency is calculated by considering the ratio of pump hydraulic power to shaft power.

The predictive ability of the CFD was examined according to the statistical methods. In order to determine the performances of the results, ε, RMSE, R^2 and D values that are considered to be the principal accuracy measures and that are based on the concept of the mean error and are commonly used were calculated using the following equations (Willmott et al. 1985; Kashaninejad et al., 2009; Çarman and Taner, 2012):

$$\bar{\varepsilon} = MAPE = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - \tilde{y}_i}{y_i}\right| \quad (4)$$

$$\mathrm{RMSE} = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \tilde{y}_i)^2\right)^{1/2} \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - (\sum_{i=1}^{n}(y_i - \tilde{y}_i)^2)/(\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2) \quad (6)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{n}(y_i - \tilde{y}_i)^2 / \sum_{i=1}^{n}[|y_i - \bar{y}| + |\tilde{y}_i - \bar{y}|]^2 \quad (7)$$

Where RMSE is the root-mean-square error, R^2 is the coefficient of determination, ε is the mean absolute percentage error, D is the agreement index of the system, n is the number of data, y_i is the measured value, $\tilde{y}$ is the predicted value, and $\bar{y}$ is the mean value.

With the developments in today's technologies, some programs and software have been developed to determine pump performance. ANSYS FLUENT numerical analysis program is one of these software. "SpaceClaim", one of the modules in the program, was used to create pump stage models. The pump used in the experiments was designed according to the size parameters and the flow volume was created according to the pump geometry and its flow was defined as water. The flow volume was divided into finite volumes with the help of ANSYS Mesh to make the created pump model ready for analysis. Figure 3 shows the pump flow volume and the structure of the mesh.

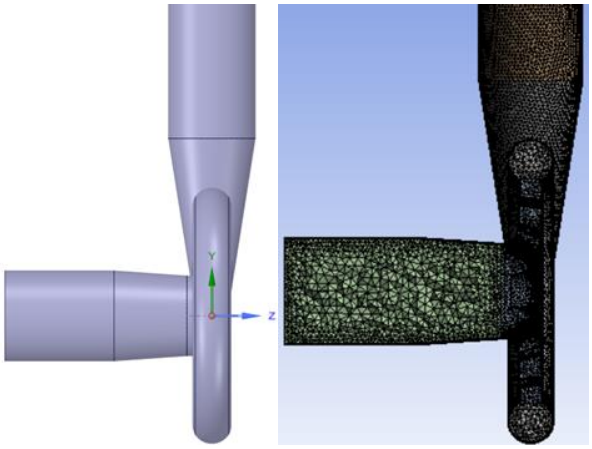


Figure 3. Pump flow volume and mesh structure

In the finite volume method, experiments were carried out assuming that the results did not change up to a certain mesh number, and were considered independent of the mesh. Numerical results were obtained by changing the geometric and operating parameters in the analysis after the mesh structure remained unchanged. Figure 4 shows the variation of mesh number with pump outlet pressure. As a result of the analysis, it was determined that the number of mesh was sufficient at the points where constant outlet pressure values were obtained (Xiong et. al, 2023).

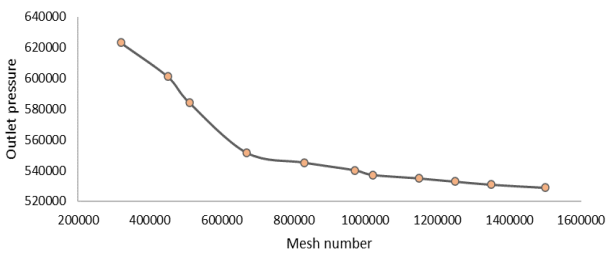


Figure 4. Suitability of mesh structure

FLUENT software is included in the program modules as computational fluid dynamics (CFD) analysis software that works according to the finite volume method. Analyzes were carried out with this module, depending on the geometry, for the nodes located in the solution area divided into finite volumes. Analyzes can be made with multiple turbulence models in the FLUENT module. The most commonly used method for pump solution in these models is the k-ϵ turbulence model, which was used for numerical analysis (Ding et al.2019; Wang et. al, 2023). Establishing the necessary boundary conditions is an important parameter for the suitability of the solution. In the study, analyzes were carried out by accepting pressure at the inlet and mass flow at the outlet as the boundary conditions in the pump CFD analyses.

In determining the pump performance, Caridad et al. (2004) determined the CFD inlet and outlet conditions as pressure inlet and mass flow outlet. In another study, researchers set boundary conditions for pump numerical analyses. These conditions were total pressure for inlet and mass flow rate for outlet (Khoeini et al. 2019). Wang et al. (2023) defined the inlet and outlet conditions for the pump performance as total inlet pressure and mass flow rate for the outlet in numerical studies. They also preferred the k-ε model for the turbulence model.

In CFD analyses, previous studies were used for the suitability of inlet and outlet conditions. Different inlet and outlet conditions can be defined in the literature. When determining the boundary conditions, the boundaries of the gauge pressure for the inlet and mass flow output for the outlet were determined considering the previous studies. The boundary conditions obtained for the CFD analysis of the tested pump are given in Table 2.

Table 2. Pump geometry and inlet-outlet boundary conditions for CFD analysis

Analysis Conditions	Values
Fluid type/Solution model	Water / k-ε Realizable
Number of Elements	1400000-1500000
Element conformity value (Skewness)	0.89
Number of Transfer	2350 min^{-1}
Inlet condition (Pressure inlet)	0 Pa
Output condition (Mass flow outlet)	(8.33/13.89/19.44/22.22/25/27.78/30.55/33.33/38.89/44.44) kg s^{-1}

3. Results and Discussions

During the trials, the ambient temperature varied between 15-29°C, the relative humidity varied between 51-72%, and the pumped water temperature varied between 15-17°C. The test results of the pump at different valve openings in the discharge line are given in Table 3. The manometric height values of the pump varied between 50-60.5 m and the power requirement varied between 15-42 kWh. An approximately 4-fold increase in pump flow rate increased the power requirement by 1.8 times.

Depending on the change in flow rate, pump efficiency values varied between 32.63-55.57%. Depending on the increasing flow rate, it is seen that the power values increase while the manometric height values decrease. When the relationship between flow rate values and efficiency is examined, it is observed that while efficiency increases with increasing flow rate values, efficiency decreases after a certain flow rate value. This can be attributed to the increase in turbulence losses as a result of operating outside the design flow rate and the inability to achieve Reynolds similarity. (Baysal 1975, Tezer 1978, Karassik ve ark. 1986, Stepanoff 1993, Yazıcı 1996).

The experimental results obtained from these studies are given in Table 3. The optimum efficiency was determined as a result of the pump performance values. At the determined efficiency point, the head was 54 m and the power drawn was 37 kWh. Experimental and numerical analysis results of the pump used in the study were compared. In this comparison, the changes in pump pressure, power and efficiency at different flow rates were examined. It is seen that the structural properties and behavior of the fluid in the pump, which is simulated with the numerical analysis method, changes.

Table 3. Performance values obtained at 10 different openings of the discharge line valve.

Q ($m^3 h^{-1}$)	Hm (m)	Np (kWh)	η (%)
30	60	15	32.63
50	60.5	17,5	47.01
70	60	23	49.66
80	59	25	51.35
90	58.5	29	49.37
100	58	31	50.88
110	57	33	51.67
120	56	35	52.22
140	54	37	55.57
160	50	42	51.80

When the pump numerical results are analysed the pressure changes are given in figure 5. When the pressure contours obtained in the pump pressure line were examined, it was found that the pressure values were not equally distributed at all flow rates except for the

separation zones where the velocity changed significantly.

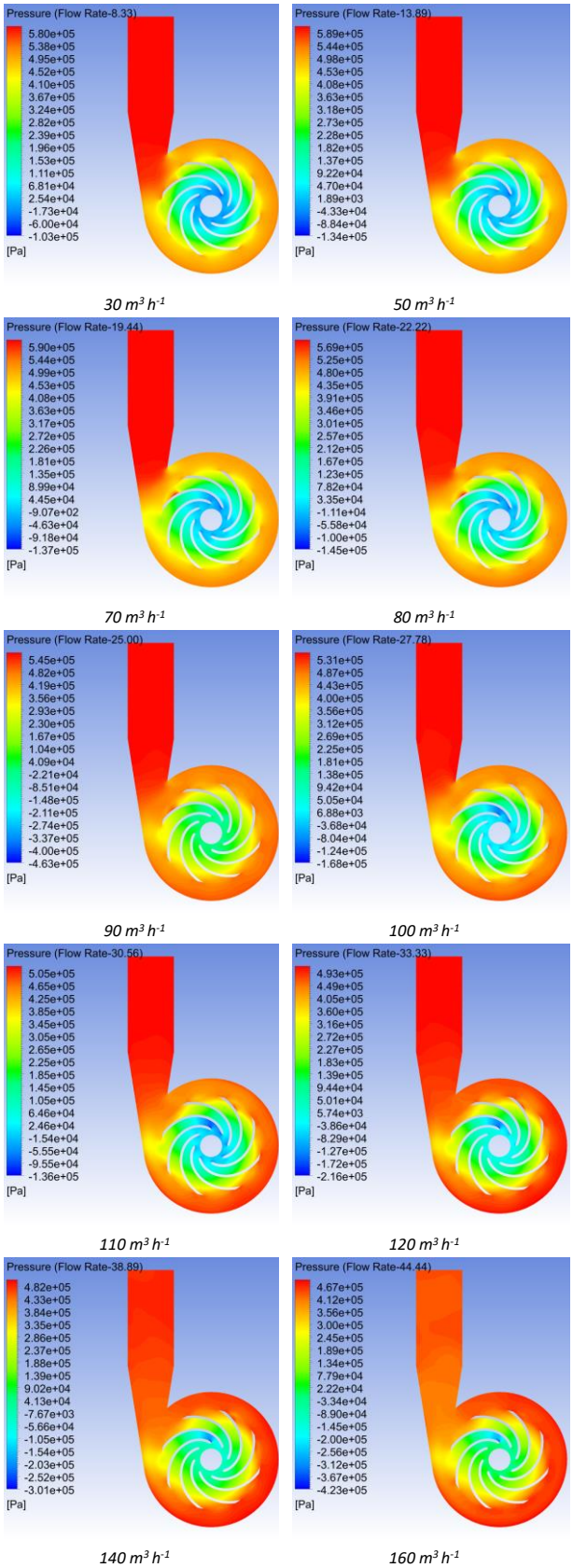


Figure 5. Pressure distributions of the centrifugal pump at different flow rates.

The lowest point of the pressure values was realised at the suction line for each flow rate value. here the pressure corresponds to negative values. in general, at the points where the fluid leaves the pump vanes, it is seen that the pressure values are at a low level due to the centrifugal body structure, while it is determined that the pressure rises even more at the walls. When the pump and experimental results are compared, the pump outlet pressure is found to be approximately 590000 Pa at a flow rate of 70 m^3h^{-1}. At the best efficiency point; the maximum pressure value at 140 m^3h^{-1} (38.89 kgs^{-1}) is approximately 482000 Pa.

As a result of the numerical analysis of the pump, it is observed that the pressure and velocity contour changes from low flow rate to high flow rate (Figure 6). When the velocity distribution at low flow rates is analysed, the distribution of the contours shows that there is backflow with the fluid in the pump. Due to this backflow, higher velocity contours are formed in and around the impeller. Considering the point where the efficiency is the highest, it can be said that the velocity contours move towards the pump outlet, thus reducing the backflow in the pump. It is also observed that the pressure decreases with increasing speed in the pump in both experiments. When we consider the pump speeds, it is seen that the speeds may change at some points locally. in general, the changes in the speeds formed in and around the pump impeller differed at each flow rate value. this can be explained by the turbulence and backflow in the region where the pump leaves the impeller. When the results are examined, it is seen that the highest speed is approximately 45.20 ms^{-1} at maximum flow rate. at the point where the efficiency is the highest, the speed is 39. 99 $ms^{-1.}$ The predictive ability of CFD is investigated according to mathematical and statistical methods. Table 4 shows the mean values of RMSE, R^2, D and Ɛ of the CFD to predict each of the three output parameters.

Table 4. Goodness-of-fit statistics of pump characteristic values predicted by CFD.

	ε(%)	R^2	RMSE	D
H_m(m)	4.575	0.870	2.894	0.851
N(kWh)	3.229	0.935	2.084	0.983
η(%)	1.163	0.936	1.492	0.986

The mean absolute percentage error ranged from 1.163 to 4.575 %. The smallest error value of 1.163 % was obtained in predicting the pump efficiency. The mean absolute percentage error was found to be well below the acceptable value of 10 % (Taner, 2007). The statistical values RMSE was found as 2.894 for Hm, 2.084 for Np, and 1.492 for η. It has been calculated that the coefficient of determination used in the prediction of pump performance characteristics varies between 0.870 and 0.936, and the agreement index varies between 0.851 and 0.986.

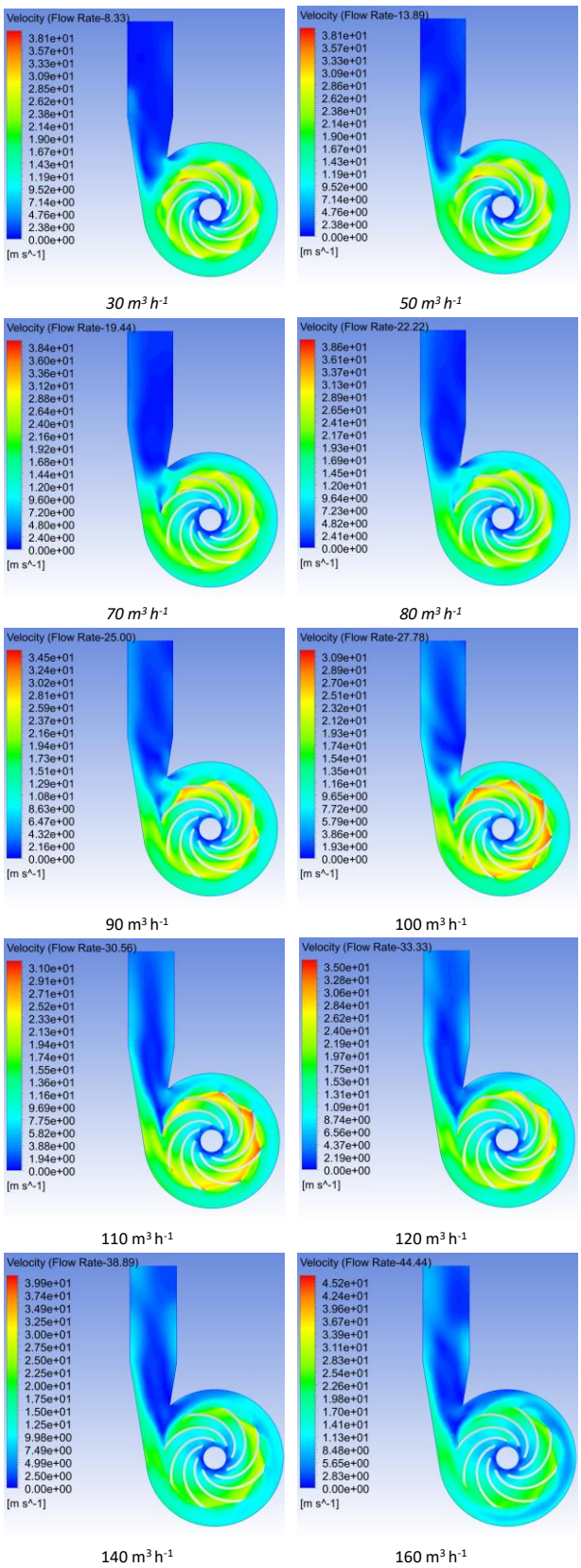


Figure 6. Pressure distributions of the centrifugal pump at different flow rates.

The fact that the value of both criteria is close to one is an indicator of the success of the CFD prediction results. Mercan (2018) developed an prediction method for calculating the performance of a centrifugal pump using loss correlations. When compared to experimental and CFD results of centrifugal pumps, the average absolute error of manometric height values was found to be 26.9 %. Uçar (2017) analyzed the flow in the impeller and volute of a centrifugal pump with the Ansys CFX program. Resercher compared the manometric height values obtained at 5 different flow rates ranging from 4 to 12 m^3h^{-1} with the values obtained by CFD.

According to the test results of CFD results, the error rates were below 10 % at all five points. The flow structure obtained by Computational Fluid Dynamics was compared with the experimental PIV results. The difference between the pump characteristic values obtained in CFD and experimental studies was found to be in the range of 1-9% (Aksoy, 2018).

The correlation coefficient (R) of the linear relationship between the experimental data and the predicted values obtained from CFD was found to be 0.956, 0.998 and 0.993 for H_m (m), N_p (kWh) and η(%), respectively (Figures 7, 8 and 9).

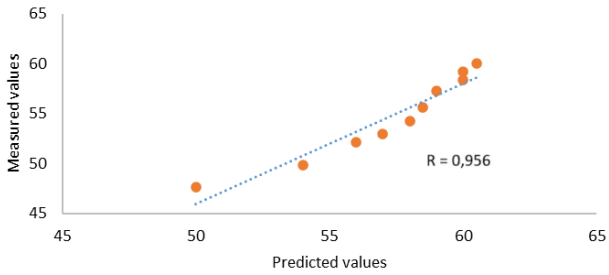


Figure 7. The relationship between measured and predicted values of manometric height.

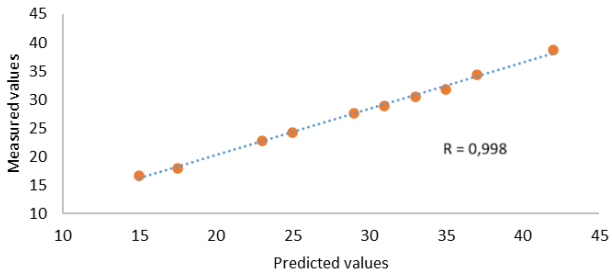


Figure 8. The relationship between measured and predicted values of pump shaft power requirement.

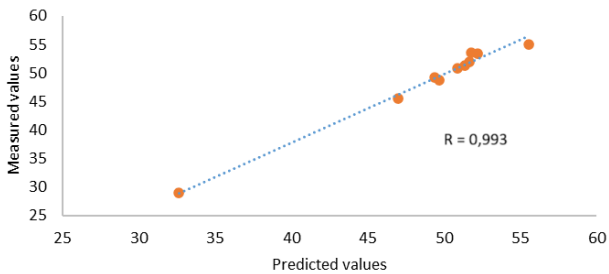


Figure 9. Relationship between measured and predicted values of pump efficiency.

4.Conclusions

In the study, performance values were obtained at 10 different openings of the discharge line valve at a constant speed of the pump shaft. Depending on the change in flow rate, pump efficiency values varied between 32.63-55.57 %. A parabolic relationship was observed between pump flow rate and efficiency values.

When the velocity distribution at low flow rates is examined in CFD analysis, the distribution of the contours shows that there is backflow with the fluid in the pump. Due to this backflow, higher velocity contours have formed in and around the impeller. Considering the point where the efficiency is highest, it can be said that the speed curves move towards the pump outlet, therefore the backflow in the pump decreases.

Also in the study, CFD was analyzed for the prediction of the performance parameters of centrifugal pump. The overall results show that the CFD can be used as an alternative method to find the performance parameters in these systems. The difference between the average of the measured and predicted values of the pump was determined as 4.5% for manometric height, 4.9% for power consumption and 0.7% for efficiency. In addition to its numerical accuracy, the CFD analises is much faster and easier to use, which makes it suitable for generating the performance parameters of pump. Such analyzes can be used as a reference for future pump studies.

Declaration of Ethical Standards
The authors declare that they comply with all ethical standards

Credit Authorship Contribution Statement
Author 1: Investigation, Methodology, Experimental study, Writing, Study design
Author 2: Investigation, Methodology, Experimental study, Writing, Statistical analysis

Declaration of Competing Interest
The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability Statement
All data generated or analyzed during this study are included in this published paper.

5. References

Aksoy, M.H., 2018. Santrifüj Pompa Çarkındaki Akış Karakteristiklerinin Had ve Piv Yöntemi ile İncelenmesi, Doktora Tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 160.

Babayigit, O., Kocaaslan, O., Aksoy, M. H., Guleren, K. M., & Ozgoren, M., 2015. Numerical identification of blade exit angle effect on the performance for a multistage centrifugal pump impeller. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. **92**, p. 02003). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/epjconf/20159202003

Baysal, K. (1979). *Tam santrifüj pompalar: hesap, çizim ve konstrüksiyon özellikleri*. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Caridad, J. & Kenyery, F., 2004. CFD analysis of electric submersible pumps (ESP) handling two-phase mixtures, Journal of Energy Resources Technology, 126, 99-104. https://doi.org/10.1115/1.1725156

Çalışır, S., Gültekin, S. S., & Çarman, Ç., 2003. Santrifüj Pompaların Performans Değerlerinin Yapay Sinir Ağlarıyla Hesaplanması. Tarımsal Mekanizasyon, 21, 3-5.

Çarman, K., & Taner, A., 2012. Prediction of tire tractive performance by using artificial neural networks. *Mathematical and Computational applications*, ***17***(3),182-192. *https://doi.org/10.3390/mca17030182*

Demirel, E., 2021. Santrifüj Pompaların Verim ve Kavitasyon Açısından Çok Amaçlı Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 99.

Ding, H., Li, Z., Gong, X., & Li, M., 2019. The influence of blade outlet angle on the performance of centrifugal pump with high specific speed. *Vacuum*, ***159***, 239-246. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.10.049

Karassik, I. J., Krutzsch, W. C., Fraser, W. H., & Messina, J. P. Pump Handbook, 1986. *McGraw-Hill Book Company, New York*, ***2***(2), 2-215.

Khoeini, D., Shirani, E., & Joghataei, M., 2019. Improvement of centrifugal pump performance by using different impeller diffuser angles with and without vanes. Journal of Mechanics, 35(4), 577-589. https://doi.org/10.1017/jmech.2018.39

Korkmaz, E., 2015. Tek Kademeli Bir Derin Kuyu Pompasının Karakteristiklerinin Belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, ***19***(1), 1-8.

Stepanoff, A. J., 1993. Centrifugal and Axial Flow Pumps. 2nd ed. Krieger Publishing, Malabar, Florida.

Taner, A., 2007. Radyal Santrifüj Pompaların Yapay Sinir Ağları İle Tasarımı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Konya, 168.

Tezer, E. 1978. Sulamada Pompaj Tesisleri (Proje, Seçim ve İşletme yöntemleri). Cilt I-II-III. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Adana.

Toprak, S., 2007. Düşey Milli Derin Kuyu Sulama Pompalarında Kademe Sayısının Pompa İşletme Karakteristiklerine Etkisi, Yüksek Lisans tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makineleri Anabilim Dalı*, Konya, 80.

Tural H.N., 2013. Pompaların Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 103.

Uçar, A.N., 2017. Santrifüj Pompadaki Akışın Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, 62.

Wang, C., Chen, X., Ge, J., Cao, W., Zhang, Q., Zhu, Y., & Chang, H., 2023. Internal flow characteristics of high-specific-speed centrifugal pumps with different number of impeller blades under large flow conditions. *Machines*, ***11***(2),138. https://doi.org/10.3390/machines11020138

Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., ... & Rowe, C. M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, ***90***(C5), 8995-9005.

Xiong, J., Tang, J., Guo, P., & Li, J., 2023. Flow Capacity Optimization of a Squirrel Cage Fan with a New Rounded Rectangle Volute under Size Limitation. *Machines*, ***11***(2),283. https://doi.org/10.3390/machines11020283

Yazıcı, H. F. 1996. Santrifüj pompaların performans testleri II*. 2. Pompa kongresi:115.* İstanbul.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1555642
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 037201 (695-703)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 037201 (695-703)

Makine Öğrenmesi Modelleri ile Kanser Hücre Hattı–İlaç Etkileşim Tahmini

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 26.09.2024
Kabul/Accepted: 04.12.2024
Yayımlandı/Published: 10.06.2025

Cancer Cell Line–Drug Interaction Prediction with Machine Learning Models

Berfu MERGEN[1], Gıyasettin ÖZCAN[1,2*]

[1] *Bursa Uludağ Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Translasyonel Tıp Anabilim Dalı, Bursa, Türkiye*
[2] *Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye*

Öz

Bu çalışmada, küçük hücreli akciğer karsinomunda farmakogenomik etkileşimler analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda ilaçların mutasyon yüküne bağlı olarak duyarlılığını makine öğrenmesi yöntemleri ile tahmin edilmesini sağlayacak veri toplama, manipülasyon ve model geliştirme süreçleri yapılmıştır. İlk veri kaynağı hücre hatları ve bunların mutasyon bilgilerini içermektedir. İkinci veri kaynağı hücre hatlarına ait detaylı bilgileri içermektedir. Üçüncü veri kaynağı ise ilaç-hücre etkileşimlerini ve hücre hatlarına karşı ilaç duyarlılığını içermektedir. Birleştirilen verilerden farklı mutasyon yük bilgilerinin sayılarak ilaç bileşikleri, hücre hatları, mutasyon yükleri, doku ve IC50 özellikleri tek bir veri kümesinde toplanmıştır. Çalışmanın bundan sonraki aşamasında türetilen ilaç hassasiyeti-mutasyon yükü ilişkisini sunabilecek yeni veri kümesi, mutasyon yüküne göre ilaç direnci etkisi tahmin edilmek üzere makine öğrenmesinde kullanılmıştır. Bu amaçla tahmin için üç farklı makine öğrenmesi algoritması test edilmiştir. Makine öğrenmesi performans analizi için *RMSE*, R^2 ve *MAE* sonuçları bulunmuş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre geliştirdiğimiz XGBoost makine öğrenmesi modeli hücre-ilaç arasındaki *IC50* skorunu anlamlı oranda tahmin etmiştir. Bu sayede ilaçların mutasyonlara direncine ve etkisine dair ön bilgi sunulmaktadır. Bunun yanı sıra çalışmada hangi mutasyon türlerinin nicel sayısının ilaç direncinde daha fazla etki gösterdiğini makine öğrenmesi analizleri ile sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler *İlaç Duyarlılığı Tahmini; Mutasyon Yükü; Makine Öğrenme; Kişiselleştirilmiş Tıp; XGBoost*

Abstract

In this study, we addressed pharmacogenomic interactions in lung small cell carcinoma. For this purpose, data collection, data manipulation and machine learning algorithms were utilized. By combining three open-source datasets, a new dataset is generated. The first data source contains cell lines and their mutation information. The second data source contains detailed information about the cell lines. The third dataset contains drug-cell interactions and drug sensitivity of cell lines. By combining the utilized data sources, a new dataset was obtained by counting different mutation load information. Thus, chemical compounds, cell lines, mutation loads, tissue and IC50 characteristics were collected in a single dataset**.** In the next stage of the study, the new dataset that could present the derived drug sensitivity-mutation load relationship was used in machine learning to predict the drug resistance effect according to mutation load. For this purpose, three different machine learning algorithms were tested for prediction. For machine learning performance analysis, RMSE, R^2 and MAE results were found and compared. According to the results, the XGBoost machine learning model we developed significantly predicts the IC50 score between cell-drug. In this way, it provides preliminary information on the extent to drug resistance and drug effect. In addition, the study presents which mutation types have a greater effect on the quantitative number of drug resistance through machine learning analysis.

Keywords *Drug Sensitivity Prediction; Mutational Burden; Machine Learning; Personalized Medicine; XGBoost*

1. Giriş

Son yıllarda, hassas tıbba artan ilgi ve büyük ölçekli farmakogenomik veri kümelerinin mevcudiyeti nedeniyle ilaç duyarlılığının tahmin edilmesine ilgiyi artırmıştır ve ilaç duyarlılığının test edilmesi rutin bir prosedüre dönüşmeye başlamıştır (Vis *vd.* 2016). Farmakogenomik, hassas tıpta ortaya çıkan, ilaç seçimini ve dozajı hastanın genetik özelliklerine uygun hale getiren yaklaşımlardan biridir. Son yıllarda, uluslararası bilimsel konsorsiyumlar tarafından çeşitli farmakogenetik kılavuzlar yayınlanmıştır, ancak klinik uygulamada kabulü hala zayıftır (Cecchin *ve* Stocco 2020). Farmakogenomik alanı genetik mekanizmaları tanımlayarak ilacın etkinliğini artırmak ve toksisiteyi azaltmak için genetik testlerin uygulanmasını araştırır. Farmakogenomik, değişken ilaç yanıtının genetik temelinin anlaşılması için bir araç olarak kullanılabilir. Mevcut ilaçların kullanımını yeni endikasyonlara genişletmek ve yeni ilaçlar geliştirmek için de nispeten yeni bir araştırma alanıdır (Roden *vd.* 2019). Bu amaçla gen mutasyonlarına ait veriler kullanılarak belirli bir ilacın etkinliğinin anlaşılması hedeflenmektedir. Böylece beşinci yüzyıldan beri var olduğu bilinen

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Adı Soyadı* *e-posta/e-mail: yazaradı@aku.edu.tr*

kişiselleştirilmiş tıp konusunda yeni bir aşamaya erişilmiştir (Steele 2009). Kişiselleştirilmiş tıp hasta için öngörülen tedavi yanıtına veya hastalık riskine göre tıbbi kararların alındığı, bu strateji ile hastalığı değil, hasta bireyleri farklı gruplara ayıran bir tıbbi modeldir. En kısa tanımı ile tıbbi tedavinin her hastanın bireysel özelliklerine göre uyarlanmasıdır. İlaç duyarlılığı modellemesinin doğruluğu ve hassasiyeti büyük ölçüde veri türleri, özellik seçimi, model seçimi ve model doğrulama gibi ilişkili faktörlere bağlıdır (Matlock *vd.* 2018).

Makine öğrenmesi, çeşitli öğrenme teknikleri ve bu tekniklerin oluşturduğu algoritmaları kullanarak bilgisayarların mantıklı sonuçlar üretmesini sağlar. Diğer yapay zeka uygulamalarından farklı olarak, makine öğrenmesi, bilgisayara belirli kurallar vererek çıktıyı değiştirmek yerine, kuralların istatistik kullanarak kendisi tarafından oluşturulması gerektiği anlamına gelir (Hastie *vd.* 2009). Bu seviyeye ulaşabilmesi için bilgisayara çeşitli veri girdileri verilir ve daha sonra en uygun öğrenme algoritmalarıyla çıktı oluşturulur. Yapay zeka, bilgisayarların insan aklını taklit ederek sorunları çözmesine olanak veren uygulamaların genel ismidir.

Klinikte kanser tedavisinde kullanılacak ilaç seçiminde, hastanın kanser hücresi özelliklerinin belirlenmesiyle elde edilen bilgi; tümör alt popülasyonları için en uygun tedavinin seçilmesine ve potansiyel olarak etkisiz tedavilerden kaçınılmasına olanak tanıyabilmektedir. Genetik özellikler ve ilaç yanıtı arasındaki ilişkiler, ilaç etki mekanizmaları hakkında değerli yeni bilgiler sağlayabilir. Literatürdeki kanser hücre hattı verilerinin yeni bilgisayar teknolojileri yardımıyla taranması gelecekteki çalışmalara yön verebilecektir. Onkoloji ilaç kombinasyonları terapötik yanıtları iyileştirebilir ve hastalar için tedavi seçeneklerini artırabilir. Olası kombinasyonların sayısı çok fazladır. Sistematik taramalar, tanımlanmış hasta alt tiplerinde klinik açıdan anlamlı, eyleme dönüştürülebilir ve klinikte kullanılabilir kombinasyonları belirleyebilir (Bashi 2024).

Kanser biyolojisini incelemek ve çeşitli kanser tedavilerini test etmek için en popüler yöntem hücre hatlarının kullanılmasıdır. Kanser hücre hatlarının türetildikleri orijinal kanser türünün özelliklerini (gen ifadesi, ilaç duyarlılığı, genotipik ve fenotipik özellikler ve mutasyon durumu) sergilemesi beklenmektedir (Langdon 2004, Masters 2000). Bununla birlikte, laboratuvar ortamı ve hücre hattında diğer normal hücre tiplerinin bulunmaması, bir hücre hattının in vivo kanser büyümesini taklit etme yeteneğini ve anti-kanser ilaçlarının etkinliğini kısıtlar (Gillet *vd*. 2011).

İnsan DNA'sındaki gen varyantları son yirmi yılda yoğun bir şekilde incelenmiş ve hastalıklara karşı tedavi stratejileri araştırılmıştır. Bu amaçla tedaviye verilen klinik yanıtlar ve ilaçlara verilen yanıtları sunan biyobelirteçler araştırılmaktadır. Bu bağlamda açık kaynaklı Genomics of Drug Sensitivity in Cancer Database (GDSC) araştırmacıların kullanımına sunulmuştur (Yang *vd*. 2013).

GDCS, kanser hücreleri hakkında ilaç duyarlılığı ve ilaç yanıtları konusunda açık kaynaklı verilerden oluşmaktadır. Bu deneysel veriler, araştırmacıların ilaç-kanser etkileşimlerini silico veriler aracılığıyla incelemesine olanak sunmaktadır. GDSC veritabanı incelendiğinde ilaçlar, hedef gen, hücre hatları, dokular, kanser özellikleri ve yarı maksimal inhibitör konsantrasyon (IC50) arasındaki ilişki araştırılabilir. Ayrıca ilaçlar ve bileşikler gen ile etkileşime girdiğinde gen ürünlerini artırabilirler veya inhibe edebilirler. Gen ürünü bir genin ifadesi sonucu elde edilen biyokimyasal (DNA ya da protein) maddedir. Elde edilen gen ürünü miktarı zaman zaman ilgili genin niteliğini anlamak için de kullanılmaktadır. Aşırı miktardaki gen ürünü kansere yol açan onkogen etkinliği gibi hastalık yapıcı alellerle ilişkilendirilmektedir (Fearon *ve* Vogelstein, 1990).

Literatürde ilaç hassasiyet ölçüsü olarak hücre yanıt eğrisinin tamamını kullanmak yerine, hassasiyeti temsil etmek için eğrinin IC50 (hücre canlılığını ilk yanıtın %50'sine düşürmek için gereken ilaç konsantrasyonu) gibi belirli bir özelliği kullanılır. IC50'ler genellikle logaritmik bir eşleme fonksiyonu kullanılarak sıfır ile bir arasındaki hassasiyet değerlerine dönüştürülür (Berlow *vd*. 2014). Yakın literatürde farmakogenomik konusunda yapay zeka çalışmaları hızla artmaktadır. (Wang *vd.* 2020) farmakogenomik verilerden ilaç ve hücre hattı özelliklerini ortaklaşa öğrenmek için sadece grafik modeli değil, aynı zamanda tahmin sonuçlarının korelasyonunu güçlendirmek için ilaç ve hücre hattı benzerlik ağı modelini de içeren çift katmanlı güçlendirilmiş işbirlikçi konu regresyonu (DS-CTR) kullanılarak doğru ilaç duyarlılığı tahmini üzerine bir yenilik modeli tanıtmıştır.

İlaç direnci veri tabanlarını analiz ederek ilaç direnci mutasyonlara bağlı olarak öngörüsü yapan makine öğrenmesi modelleri geliştirmek yakın zamanda literatürde yaygınlaşmaktadır (Sharma *ve* Rani 2020, Gao *vd.* 2021, Singh *ve* Kaushik 2023). Zira bazı mutasyonlar iyi huylu katkılar sağlarken, diğer bazı mutasyonlar patojenik olabilir ve kanser gelişimine katkıda bulunabilir.

Farmakogenomik veri tabanları son zamanlarda tahmin modelleri için eğitim verisi olarak kullanılmaktadır. (Barretina *vd.* 2012, Yang *vd*. 2013). İlaç yanıtı tahmin

modellerini kategorize etmek için iki yaklaşım kategorisi kullanılabilir:

(i) tek veya çoklu-omik tabanlı yaklaşımlar (Bomane *vd.* 2019, Chiu *vd.* 2019, Costello *vd.* 2014, Wei *vd*. 2019)

(ii) ilacın kimyasal özellikleriyle desteklenen yaklaşımlar (Park *vd*. 2022)

Daha önceki araştırmalara göre, bir derin öğrenme modelinin doğruluğu, içerdiği katman sayısı veya derinlik ile artmaktadır (Lecun *vd.* 1998, Vestias 2020).

Bir çalışmada, değişen veri kümesi boyutları ve omics tipi kullanımlar gibi çeşitli veri kümesi koşulları altında IC50 değerlerini tahmin etmede regresyon tabanlı ML ve DL modellerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmişlerdir. Çoğu durumda, DL modelleri çeşitli koşullarda ML modellerinden daha iyi performans göstermiştir (Park *vd.* 2022). Bir çalışmada, farklı ilaç kimyasal parmak izleri ve mutasyon durumları gibi 27.756 özellik kullanılarak üç ilaç yanıt sınıfını tahmin etmek için DeepIC50 adı verilen 1 boyutlu bir konvolüsyonel sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Sonuç olarak DeepIC50, pan-kanser hücre hatlarında hücre canlılığı ve IC50 tahmin doğruluğu açısından iki ayrı kanser hücre hattı veri kümesinden daha iyi performans göstermiştir. İlaç keşif sürecinde DeepIC50, yeni bileşiklerin çeşitli kanser hücre hatlarının duyarlılığını nasıl etkileyeceğini doğru bir şekilde tahmin edebilir (Joo *vd.* 2019).

Kanser Genom Atlası (TCGA) gibi çok büyük klinik kanser genomik veri setlerinde, atanan ilaç yanıtı çok önemlidir. Bu yöntem, kanser hücre hatlarının büyük panellerinde tedavi yanıtını gen ifadesine bağlayan istatistiksel modeller oluşturmayı ve ardından bu modelleri klinik veri setlerinden (TCGA gibi) tümör gen ifadesi verilerini analiz etmek için kullanmayı içerir. Bu, her hastanın ilacı için bir farmakolojik yanıt üretir. Daha sonra, bu ilaç yanıtı verileri ölçülen somatik genetik varyasyonlarla ilişkilendirilir (Geeleher *vd.* 2017).

İlaç direnci öngörüsü yapmak için kullanılan algoritmalar makine öğrenmesi temellidir. Makine öğrenmesinde amaç veriden öğrenme yapmaktır (Hastie *vd.* 2009). Literatürde birçok makine öğrenmesi algoritması mevcuttur. SVM (Support Vector Machine) algoritması verileri sınıflandırabilmek için uzayı çok boyutlu ayraç denklemleri ile ifade etmektedir (Boser *vd.* 1992). SVM doğru tahminleme ve hız açısından verimli bir sonuçlar sunmaktadır. Öte yandan aynı veri üzerinde birden fazla sınıflandırıcı tanımlamak bir başka alternatif olmuştur. Bu yöntemde üretilen sınıflandırıcıların hata performanslarından ders alınarak bir sonraki sınıflandırıcının hesaplanması amaçlanmaktadır. XGBoost ve CatBoost bu sınıflandırma yönteminin bilinen örnekleridir (Chen *ve* Guestrin 2016, Prokhorenkova vd. 2018).

Yarı Maksimal İnhibitör Konsantrasyon veya IC50, bir maddenin (ilaç, inhibitör veya diğer biyoaktif bileşenler gibi) belirli bir biyolojik veya biyokimyasal işlevi inhibe etme gücünü gösteren önemli bir ölçümdür. Bu, farmakoloji ve biyokimya alanında çok önemlidir. IC50, bir maddenin bir biyolojik süreci (örneğin enzim aktivitesi, reseptör bağlanması veya hücre büyümesi gibi) %50 oranında inhibe etmek için gereken konsantrasyonunu gösterir. Aynı inhibisyon seviyesine ulaşmak için daha az maddeye ihtiyaç duyulduğundan, daha düşük IC50 değeri bileşiğin daha güçlü olduğunu göstermektedir. IC50 potansiyel terapötik ajanların etkinliğini ve güvenlik profilini değerlendirmek, bunları diğerleriyle karşılaştırmak ve dozaj stratejilerini geliştirmek için önemli bir araçtır. Farmakolojide standart bir ölçüttür ve umut vadeden bileşiklerin laboratuvardan klinik testlere taşınmasına yardımcı olur (Berrouet *vd.* 2020).

Bu çalışmada akciğer küçük hücreli karsinomunda mutasyon yükü analizi yapılmıştır. Bu amaçla Sanger Enstitüsüne ait üç farklı veri kümesi toplanıp birleştirilerek mutasyon yük analizi için tek bir veri kümesi türetilmiştir. Türetilen veri kümesinde küçük hücreli akciğer karsinomu ile ilişkili olan veriler filtrelenerek analize uygun bir veri kümesi elde edilmiştir. Elde edilen veriler ile ilaçların hangi mutasyonlara karşı daha duyarlı olabileceğine dair analizler yapılmıştır. İlaç duyarlılığı ile mutasyonlar ve mutasyon yükleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için makine öğrenmesi modelleri geliştirilmiştir. Filtrelenerek elde edilen tüm veriler arasında Cell Model Password sitesinde yer alan All Mutations verisi indirilmiştir (İnt. Kyn. 1). Bunun yanı sıra hücre hatlarına dair veri ve hücre hatlarının bilgileri farklı kaynaklardan alınarak birleştirilmiştir (İnt. Kyn. 2, İnt. Kyn. 3). Geliştirilen SVM Boser *vd.* (1992), CatBoost Prokhorenkova *vd.* (2018) ve XGBoost Chen *ve* Guestrin (2016) modelleri ile ilaç etkileri tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen modeller arasında CatBoost modelinin mutasyonların ve toplam yükünün belirli bir ilaca hassasiyetini tahmin edebilme ve potansiyel ilaç adaylarını sunma konusunda destek sunma potansiyeli olduğunu göstermektedir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmanın ilk safhasında farklı veri kümelerinden veriler toplanarak ilaç hassasiyeti-mutasyon yükü ilişkisini sunabilecek veri hazırlanmıştır. Zira mutasyon yükünü gereksinim duyulan formatta doğrudan sunan hazır veri kaynağı bulunamamıştır. Bunun yerine farklı

kaynaklarından toplanan veriler kullanılarak mutasyon yükünü tanımlamak mümkün olmuştur.

2.1 Veri Toplama

Hücre ve mutasyon bilgilerinin ilaç direncine etkisi konusunda sunulan açık kaynaklardan GDSC' den Yang *vd.* (2013) veri seti kaynakları toplanmıştır. Elde edilen kaynaklar arasında hücre hatlarında yer alan mutasyonları tanımlayan tüm Mutasyonlar verisi Cell Model Passports üzerinden indirilmiştir (van der Meer *et al.* 2019). Bu kaynakta gene_id, Hücre_Model_id, mutasyonun driver-kodlayıcı olup olmadığı, etkisi, vaf skoru yer almaktadır. Öte yandan bu kaynakta ilgili hücre hattının hangi kanser türlerine maruz kaldığı yer almamaktadır.

Bunun yanı sıra, ilaçların belirli mutasyonlu hücrelere etkisini analiz etmek önemlidir. İlaçların ilgili mutasyonlara sahip hücrelere etki oranlarını hesaba katmak için ek kaynaklara gereksinim duyulmuştur.

GDSC veri tabanında yer alan IC50 verisi, çok sayıda ilacın hücre hatlarına verdiği ilaç tepkisini sunmaktadır. İlaçlar ve ilgili veriler GDSC açık kaynaklı veri tabanından elde edilmiştir. Bu veri sayesinde hücre hattı ile ilaç etkisi arasındaki ilişki daha iyi analiz edilebilecektir. Verinin toplandığı gün itibarı ile hücre hatlarının 265 ilaca veya aday ilaca karşı etkisi sunulmuştur.

GDSC veri tabanında yer alan hücre listesi verisi her bir hücre hattının özelliklerini ve maruz kaldığı kanser türlerini sunmaktadır. Bunun yanı sıra mutasyon verilerini sunan veri ile IC50 verisi arasında ortak anahtar barındırması nedeniyle önemi daha da çok artmaktadır.

Toplanan üç veri kaynağı Hücre Listesi verisi anahtar kullanılmak üzere birleştirilmiştir. Öte yandan birleşme sonucu ortaya çıkan verinin çok sayıda satır içermesi nedeniyle filtreleme yapılması elzem olmuştur. Çalışmada lung_small_cell_carcinoma verilerinin tercih edilmesinin nedeni açık kaynaklı veri olarak diğer kanser türlerine göre küçük hücreli akciğer kanseri verilerinin sayıca fazla olmasıdır.

2.2 Lung Small Cell Carcinoma verisi

GDSC, farklı kanser türlerine karşı ilaç hassasiyeti konusunda veri sunmaktadır. Bu çalışmada sadece lung_small_cell_carcinoma verilerine ve ilgili ilaç hassasiyetine odaklanılmıştır.

Filtreleme yapmak üzere subtype özelliği "lung_small_cell_carcinoma" olan veriler seçilmiştir. Filtreleme sayesinde veri boyutu küçülmüş ve hesaplanabilir boyuta indirgenebilmiştir. Filtreleme işlem sonucu elde edilen mutasyon verisi 512464 satırdan oluşmaktadır.

2.3 Makine Öğrenmesi için Veri Seti Oluşturma

Bir sonraki adımda makine öğrenmesinde kullanıma uygun verinin elde edilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla Lung Small Cell Carcinoma verisinde yer alan mutasyonlara dair bazı özellikler sayılarak toplanmıştır. GDSC veri kaynaklarından üretilen veri setinde her ilaç için ayrı ayrı olmak üzere aşağıdaki listede belirtilmiştir:

1. İlaç ismi,
2. Hücre isimleri,
3. Toplam mutasyon,
4. Toplam driver mutasyon,
5. Predisposition variant sayısı,
6. Mutasyon,
7. Toplam intronik mutasyon,
8. Toplam Frame Shift sayısı,
9. Start loss mutasyon sayısı,
10. Stop loss mutasyon sayısı,
11. Upstream mutasyon sayısı,
12. Nonsense mutasyon sayısı,
13. Coding mutasyon sayısı,
14. Vaf skoru,
15. İlaç direnci

2.4 Makine Öğrenmesi Uygulaması

Sanger Enstitüsü kaynakları kullanılarak beş farklı ilaç için yukarıda belirtilen tüm özellikler toplanmıştır. İlaç seçimi yapılırken ilaç-hücre etkileşiminde IC50 varyasyonunun geniş tutulabilmesi amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra ilgili hücrenin küçük hücreli akciğer karsinomu olmasına dikkat edilmiştir. Üretilen veride her bir ilaç için; ilaç-hücre-ilaç hassasiyeti skorları yer almaktadır. Her bir hücre için yukarıdaki listede sıralanan özelliklerin yer alması sağlanmıştır. Bu sayede her hücrede yer alan ve sayılan mutasyon yüklerine bağlı olarak ilaçların hücrelere olan etkileri değerlendirilmek amaçlanmıştır. Her bir satırda bu beş ilacın belli bir hücre için ilaç direnci yer almaktadır. Çalışmada lung_small_cell_carcinoma tanısı konulmuş hücreler için ilaç analizleri yapılmıştır. Beş ilacın verileri birleştirilerek bir dosyada toplanmıştır. 241 ilaç-hücre-ilaç hassasiyeti ilişkisini analiz edebilmek amacıyla 14 sütunlu veri oluşturulmuştur.

2.5 Makine Öğrenimi Uygulaması

Üretilen 241 satır ve 14 özellikten oluşan veri ile makine öğrenmesi uygulaması yapılmıştır. Bu özellikler arasında İlaç Direnci bağımlı değişken olarak tanımlanmış ve tahmin edilmiştir. Tahminleme sonucunda hedeflenen ilaç ve kanserli hücre bilgisine bağlı olarak ilaç direncinin tahminini yapmaktır. Çalışmayı özgün kılan nokta ise farklı mutasyon yüklerinin toplamının ilaç direncine etkisinin

incelenmesidir. Elde edilecek sonuçlar doğrultusunda mutasyon yüküne ve mutasyon yük özelliğine bağlı olarak ilaç direncinin önceden tahmin edilmesidir. SCLC için IC50 değeri 61 farklı hücrenin yaklaşık 500.000 olası mutasyonu dikkate alınarak analiz edilmiştir. Mutasyon verilerinin bir kısmı eğitim için kullanılmıştır. Eğitimden sonra IC50 değeri diğer bazı hücrelerin mutasyonlarına göre tahmin edilmeye çalışılmıştır. Analiz edilen ilaçlar için %60 R2 tahmin değerine ulaşılmıştır. Makine öğrenmesi sürecinde XGBoost, CatBoost ve SVM algoritmaları denenmiş veriye uyumlu en iyi modelleri elde etmek için yazılım tabanlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. XGBoost, Catboost ve SVM modellerinin geliştirilmesi sırasında üretilen verilerin %80'i eğitim, kalanı ise test amacıyla kullanılmıştır. Ayırma işlemi yapılırken hücre ismi özelliği dikkate alınmıştır. Böylece her hücre için yeteri kadar test verisinin ayrılmış olması emniyete alınmıştır. Bu doğrultuda elde edilen verilerin adil bir şekilde %80'i eğitim için ayrılmıştır.

2.6 İdeal Model Parametre Belirlenmesi

CatBoost algoritması için kullanılan parametreler Çizelge 1'de sunulmuştur. Bir diğer makine öğrenmesi modeli olan XG Boost algoritması ise benzer şekilde Çizelge 2'de belirtilen başlangıç parametreleri ile çalıştırılmıştır.

Çizelge 1. CatBoost algoritması için kullanılan parametreler

Parametre	Değer
Seed	13
İterasyon	300
Learning rate	0.1
Derinlik	6
Loss function	RMSE
eval metric	RMSE

Çizelge 2. XG Boost algoritması için kullanılan parametreler

Parametre	Değer
max depth	6
nrounds	300
verbose	0
Learning rate	0.1

Son olarak SVM algoritmasına ait model denemeleri uygulanmıştır. SVM modelinde potansiyel en iyi modeli bulabilmek için *C* ve *sigma* parametreleri denenmiştir Bunun yanı sıra 10-fold cross validation kullanılmıştır. SVM deneylerinde test edilen *C* ve *sigma* parametreleri aşağıdaki gibidir:

C = c(0.25, .5, 1),
sigma = c(0.1, 0.01, 0.001)

Elde edilen sonuçlar, her algoritma için farklı parametre deneylerinin performans açısından en iyisi araştırılarak elde edilmiştir. Tüm uygulama kodları R programı ile yazılmıştır. Program icrası için 7. nesil i7 işlemcili ve 16 GB belleğe sahip bilgisayar kullanılmıştır.

3. Bulgular

Deney kısmında ilk önce mutasyon yük verisi üretme ve sonuçları anlatılmaktadır. İkinci kısımda ise üretilen veriler ile ilaç direncinin mutasyon yükü bilgilerine bağlı olarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla makine öğrenmesi modelleri geliştirilmiş ve performansı RMSE, Rsquared ve MAE cinsinde ölçülerek kıyaslanmıştır.

3.1 Mutasyon Yük Veri Üretmenin Zorluğu

Hücrelerde yer alan tüm mutasyonları barındıran dosya 893 MB büyüklüğündedir. Hücrelere dair kapsamlı bilgileri içeren Hücre Listesi dosyası ise 128 KB boyutundadır. Bu iki dosyanın kartezyen çarpımı ile birleştirilmesinin bellek yetersizliğine neden olacağı aşikardır. Bu nedenle bu işlemden sonra sadece küçük hücreli akciğer karsinomu verileri filtrelenerek veri küçültülmüştür. İlaçlar ile hücreler arasındaki hassasiyet skorlarının saklandığı IC50 dosyası ise 3.160 KB boyutundadır. Daha sonra filtrelenmiş dosya ile ilaçların IC50 bilgilerinin olduğu dosyanın birleştirilmesi hedeflenmiştir. Birleştirilen dosyada hem seçilen ilaçlar için IC50 değerleri hem de hücre bilgileri yer almaktadır. Öte yandan ham verilerin 8GB RAM'a sahip bilgisayarda birleştirilip filtrelenmesinin RAM yetersizliği nedeniyle gerçekleşmediği görülmüştür. Yüksek RAM gereksinimi nedeniyle veri manipülasyonu esnasında filtreleme işlemin mümkün mertebe öncelikte tercih edilmesi gerekmiştir.

3.2 Makine Öğrenme Algoritma ile Tahminler

Kanserli hücre ve ilaç arasındaki IC50 değerini tahmin etmek için Makine Öğrenme algoritma performansları incelenmiş ve sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.
XGBoost, CatBoost ve SVM algoritmaları baz alınarak geliştirilen modeller aşağıdaki Çizelge 3'te sunulmuştur.

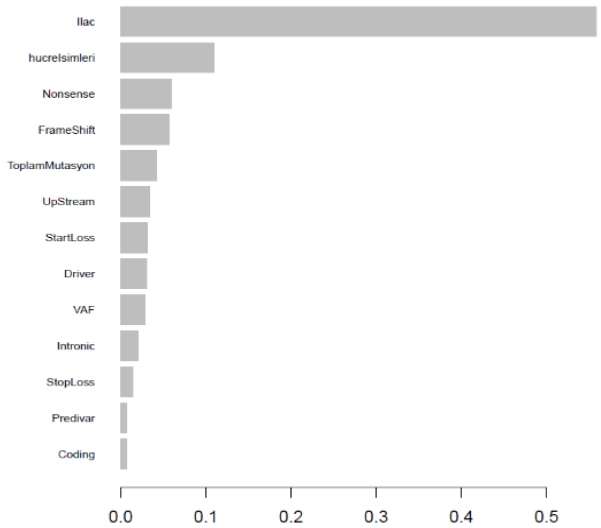
Çizelge 3. XGBoost, CatBoost ve SVM algoritmaları baz alınarak geliştirilen modeller

Model	RMSE	Rsquared	MAE
XGBoost	1.602683	0.6045291	1.231046
CatBoost	1.654969	0.5796071	1.314209
SVM	2.47293813	0.04089099	1.96588405

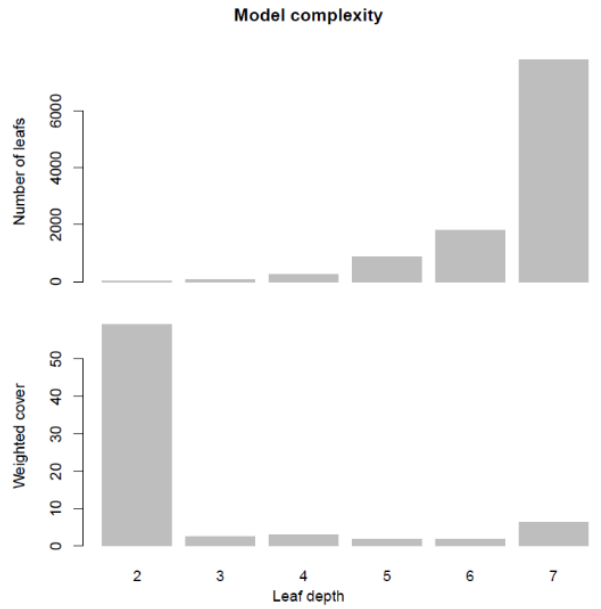
Tabloda görüldüğü üzere en başarılı RMSE, R2 ve MAE skorlarını XGBoost algoritması sunmuştur. Tabloda belirtilen sonuçlar doğrultusunda Gradient temelli boosting algoritmalarının ilaç hassasiyetini tahmin etme konusunda başarılı sonuçlar sunduğu görülmektedir.
Potansiyel tüm ilaçların kanserli hücre etkileşimini deney yapmadan 1.60 RMSE, 0.6 R^2 ve 1.23 MAE oranında doğru

tahmin edilmesi, mutasyon durumuna göre hangi ilaçların analiz yapılması gerektiği konusunda ön bilgi sunmaktadır. Bu başarım oranı bu nedenle önemlidir.

XGBoost modelinin tahmin başarımı yaparken hangi özellikleri dikkate alındığına dair bilgi Şekil 1'de sunulmuştur. Verilerin %80'inin eğitimde kullanılması nedeniyle tahmin esnasında ilaç ve hücre İsimlerinin yer alması beklenmektedir. Bunların ötesinde en etkili faktörlerin sırasıyla Nonsense, Frameshift, ToplamMutasyon, Upstream ve Start Loss mutasyon sayılarının Driver mutasyon sayısından daha önemli olduğuna ortaya koymaktadır. Bu nedenle bu mutasyonların niceliksel olarak fazla olması durumunda ilaç hassasiyetinin gelişme olasılığının artması ihtimali göz ardı edilmemelidir.



Şekil 1. XGBoost Model grafiği



Şekil 2. Yaprak derinliğine bağlı olarak XGBoost ağacında ağırlıklı kapsam ve yaprak sayısı grafikleri

3.3 Mutasyon Türlerinin Etkisi ve Model Karmaşıklık Analizi

XGBoost algoritmasının yapısına dair teknik özellikler:

Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında XGBoost Makine öğrenmesi modelinin yapısı hakkında daha fazla bilgi sunmak ta mümkündür. Tahmin performansını artırmak üzere XGBoost Model karmaşıklık grafiği Şekil 2'de sunulmuştur.

Şekilde yaprak derinliğine bağlı olarak XGBoost ağacında ağırlıklı kapsam ve yaprak sayısı grafiği sunulmuştur. Weighted cover ile ağdaki önemli toplulukları belirlemek amaçlanmıştır. Şekilde 2. ve 7. ağaç derinliklerinin sınıflandırmada etkili olduğu görülmektedir. Bu nedenle derinliğin 7' ye çıkmasının sınıflandırmaya katkı sağladığı izlenmektedir.

Bu çalışmada, ilaç duyarlılığını doğru bir şekilde tahmin etmek için bir yöntem geliştirildi. Bir ilacın kanser hücresi canlılığının yarı maksimal inhibitör konsantrasyonu (IC50), gücünün bir ölçüsü olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Dolayısıyla daha yüksek ilaç gücü, hücre canlılığı açısından daha düşük IC50 değerleriyle sonuçlanır.

Kanser hücresi canlılığının IC50 değerleri, hücrelerin tümör mutasyon yükü ile tahmin edilmiştir. Tümör mutasyon yükü, kanser hücrelerinin DNA'sında bulunan değişikliklerin (genetik mutasyonlar olarak adlandırılır) sayısıdır. Bu ilaç yanıtı tahmin muammasını ele almak için makine öğrenimi (ML) ve ağ biyolojisi yaklaşımları kullanılmıştır. Bir ilacın yanıtını tahmin etmek, tıbbı etkili bir şekilde uygulamak için çok önemlidir. Araştırmacılar farklı kanser hastalarında ilaç yanıtını değerlendirmek için sıklıkla kanser klinik çalışmalarından elde edilen tedavi sonuçlarına bakmaktadır; ancak bu etik ve mali konular nedeniyle sorunludur. Bunun yerine, kanser hücre dizilerinin genomlarını girdi olarak alan çok sayıda araştırma, kanser hücre dizilerindeki farmakogenomik bilgileri kullanarak farklı ilaçların ilaç yanıtı tahmin modellerini oluşturmaktadır. Bu modeller ile hastaların farklı ilaçlara nasıl yanıt vereceğini tahmin etmek için hastalar ve ilaçla ilişkili hücre hattı arasındaki genomik profilleri karşılaştırmak için kullanılması mümkündür.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada kanser hücresi mutasyon yükünün ilaç direncine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla açık kaynak verileri derlenip farklı mutasyon özellikleri sayılarak yeni bir mutasyon veri yükü seti oluşturulmuştur. Mutasyon sayımı yapılarak üretilen veride ilaç-küçük hücreli akciğer karsinom hücresi-ilaç direnci verilerinin yanı sıra hücredeki farklı mutasyon yüklerinin sayısı da yer almaktadır.

Mutasyon yük bilgilerine göre ilaç hassasiyetinin tahminini yapmak için farklı makine öğrenmesi yöntemleri denenmiş ve farklı modeller geliştirilmiştir. Carboost, XGBoost, SVM ve TabNet algoritmaları kullanılarak geliştirilen modeller ilaç hassasiyetini en çok %60 üzerinde doğru tahmin edebilmiştir. Çalışmanın bir diğer amacı mutasyon yükünün belirlenmesinde mutasyon türünün etkisinin araştırılmasıdır. Kullanılan veri seti için XGBoost makine öğrenmesi tabanlı makine öğrenme modelimiz Nonsense, Frameshift, ToplamMutasyon, Upstream ve Start Loss, ve Driver mutasyonların ilaç hassasiyeti konusunda daha fazla belirleyici olduğu sonucuna varmıştır.

Unutulmamalıdır ki hücre hattındaki bir mutasyon türünün niceliksel olarak fazla olması da ilgili mutasyonun ağırlığının artmasına etki edebilmektedir. Bu nedenle veri kümesinin ve dolayısıyla farklı hastalık kapsamının aynı anda değerlendirilmesi daha etkili sonuçlar sunabilecektir.

Doğru tahmin edilen ilaçların daha kapsamlı deneylere tabi tutulma olanağının sunması nedeniyle sonuçlar anlamlıdır ve potansiyel ilaçların bulunmasına katkı sağlama şansı sunmaktadır. Bundan sonraki çalışmalarda mutasyon yükünün ve özelliklerinin ileriki çalışmalarda daha kapsamlı olarak ele alınmasının önemi ortaya çıkmaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışma Doç.Dr. Gıyasettin ÖZCAN danışmanlığında Berfu MERGEN tarafından devam etmekte olan Doktora tez çalışmasının bir ürünüdür. Çalışmada kullanılan verilerin tamamı açık kaynaklıdır ve ilgili bilimsel çalışmalara bu makalede atıf yapılmıştır.
Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – original taslak
Yazar 2: Araştırma, Deney tasarımı, Proje Yöneticisi, Yazma –orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

5. Kaynaklar

Barretina, J., Caponigro, G., Stransky, N., Venkatesan, K., Margolin, A.A., Kim, S., Wilson, C.J., Lehár, J., Kryukov, G.V., Sonkin, D., Reddy, A., Liu, M., Murray, L., Berger, M.F., Monahan, J.E., Morais, P., Meltzer, J., Korejwa, A., Jané-Valbuena, J., Mapa, F.A., Thibault, J., Bric-Furlong, E., Raman, P., Shipway, A., Engels, I.H., Cheng, J., Yu, G.K., Yu, J., Aspesi, P. Jr., de Silva, M., Jagtap, K., Jones, M.D., Wang, L., Hatton, C., Palescandolo, E., Gupta, S., Mahan, S., Sougnez, C., Onofrio, R.C., Liefeld, T., MacConaill, L., Winckler, W., Reich, M., Li, N., Mesirov, J.P., Gabriel, S.B., Getz, G., Ardlie, K., Chan, V., Myer, V.E., Weber, B.L., Porter, J., Warmuth, M., Finan,P., Harris, J.L., Meyerson, M., Golub, T.R., Morrissey, M.P., Sellers, W.R., Schlegel, R., Garraway, L.A. 2012. The Cancer Cell Line Encyclopedia enables predictive modelling of anticancer drug sensitivity. *Nature*, **483**(7391), 603-7. https://doi.org/10.1038/nature11003

Bashi, A.C., Coker, E.A., Bulusu, K.C., Jaaks, P., Crafter, C., Lightfoot, H., Milo, M., McCarten, K., Jenkins, D.F., van der Meer, D., Lynch, J.T., Barthorpe, S., Andersen, C.L., Barry, S.T., Beck, A., Cidado, J., Gordon, J.A., Hall, C., Hall, J., Mali, I., Mironenko, T., Mongeon, K., Morris, J., Richardson, L., Smith, P.D., Tavana, O., Tolley, C., Thomas, F., Willis, B.S., Yang, W., O'Connor, M.J., McDermott, U., Critchlow, S.E., Drew, L., Fawell, S.E., Mettetal J.T., Garnett, M.J., 2024. Large-scale Pan-cancer Cell Line Screening Identifies Actionable and Effective Drug Combinations. *Cancer Discov*, **14(5)**, 846-865. https://doi.org/10.1158/2159-8290.CD-23-0388.

Berlow, N., Haider, S., Wan, Q., Geltzeiler, M., Davis, LE., Keller, C., Pal, R. 2014. An Integrated Approach to Anti-Cancer Drug Sensitivity Prediction. *IEEE/ACM Trans Comput Biol Bioinform*. **11(6) ,** 995-1008. https://doi.org/10.1109/TCBB.2014.2321138.

Berrouet, C., Dorilas, N., Rejniak, K.A., Tuncer, N. 2020.Comparison of Drug Inhibitory Effects ([Formula: see text]) in Monolayer and Spheroid Cultures. *Bull Math Biol.* **82(6),** 68. https://doi.org/10.1007/s11538-020-00746-7

Bomane, A , Gonçalves, A., Ballester, P.J. 2019. Paclitaxel Response Can Be Predicted With Interpretable Multi-Variate Classifiers Exploiting DNA-Methylation and miRNA Data. *Front Genet.* **10:1041**. https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01041

Boser, B.E., Guyon, I.M., Vapnik, V.N. 1992. A training algorithm for optimal margin classifier. Proceedings of the 5th ACM Workshop Pennsylvania, USA. 144–152, https:///doi.org/10.1145/130385.130401

Cecchin, E. and Stocco, G.,2020. Pharmacogenomics and Personalized Medicine. *Genes (Basel)*, **11(6)**, 679. https://doi.org/10.3390/genes11060679

Chen, T. and Guestrin, C., XGBoost. 2016. A scalable tree boosting system, In Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining San Francisco, CA, USA. 785–794 https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

Chiu, Y.C., Chen, H.H., Zhang, T., Zhang, S., Gorthi, A., Wang, L.J., Huang, Y., Chen, Y. 2019. Predicting drug response of tumors from integrated genomic profiles by deep neural networks. *BMC Med Genomics*, **12(1)**18. https://doi.org/10.1186/s12920-018-0460-9

Costello, J.C., Heiser, L.M., Georgii, E., Gönen, M., Menden, M.P., Wang, N.J., Bansal, M., Ammad-ud-din, M., Hintsanen, P., Khan, S.A., Mpindi, J.P., Kallioniemi, O., Honkela, A., Aittokallio, T., Wennerberg, K., NCI DREAM Community, Collins, J.J., Gallahan, D., Singer, D., Saez-Rodriguez, J., Kaski, S., Gray, J.W., Stolovitzky, G. 2014. A community effort to assess and improve drug sensitivity prediction algorithms. Nat Biotechnol. 32(12):1202-12. https://doi.org/10.1038/nbt.2877.

Fearon, E.R., Vogelstein, B.1990 A genetic model for colorectal tumorigenesis. *Cell*, **61(5)**,759-67. https://doi.org/10.1016/0092-8674(90)90186-i.

Gao, Y., Lyu, Q., Luo, P., Li, M., Zhou, R., Zhang, J., & Lyu, Q. 2021. Applications of Machine Learning to Predict Cisplatin Resistance in Lung Cancer. *International Journal of General Medicine*, **14**, 5911–5925. https://doi.org/10.2147/IJGM.S329644

Geeleher, P., Zhang, Z., Wang, F., Gruener, R.F., Nath, A., Morrison, G., Bhutra, S., Grossman, R.L., Huang, R.S. 2017. Discovering novel pharmacogenomic biomarkers by imputing drug response in cancer patients from large genomics studies. *Genome Res,* **27(10)**, 1743-1751. https://doi.org/10.1101/gr.221077.117

Gillet, J.P., Calcagno A.M., Varma, S., Marin,o M., Green, L.J., Vora, M.I., Patel C., Orina J.N., Eliseeva, T.A., Singal, V., Padmanabhan, R., Davidson, B., Ganapathi, R., Sood A.K., Rued,a B.R., Ambudkar S.V., Gottesman, M.M. 2011. Redefining the relevance of established cancer cell lines to the study of mechanisms of clinical anti-cancer drug resistance. *Proc Natl Acad Sci* U S A. 2011 Nov 15;108(46):18708-13. https://doi.org/10.1073/pnas.1111840108

Gönen, M. and Margolin, A.A. 2014. Drug susceptibility prediction against a panel of drugs using kernelized Bayesian multitask learning. *Bioinformatics,* **30(17),** 556-63. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu464

Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., 2009. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. Springer, New York, 150-190

Joo, M., Park, A., Kim, K., Son, W-J., Lee, H.S., Lim, G., Lee, J., Lee, D.H., An, J., Kim, J.H. 2019 A Deep Learning Model for Cell Growth Inhibition IC50 Prediction and Its Application for Gastric Cancer Patients. *International Journal of Molecular Sciences*. **20(24)**:6276. https://doi.org/10.3390/ijms20246276

Langdon, S.P. 2004. Cell culture contamination: an overview. *Methods Mol Med.* 2004, **88**:309-17. https://doi.org/10.1385/1-59259-406-9:309

Lecun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., P. Haffner, 1998. "Gradient-based learning applied to document recognition," in Proceedings of the IEEE, 86, 11, 2278-2324 https://doi.org/10.1109/5.726791

Masters, J.R.2000. Human cancer cell lines: fact and fantasy. *Nat Rev Mol Cell Biol*. **1(3)**, 233-6. https://doi.org/10.1038/35043102

Matlock, K., De Niz, C., Rahman, R., Ghosh, S., Pal, R. 2018. Investigation of model stacking for drug sensitivity prediction. *BMC Bioinformatics,* **19(3),** 71. https://doi.org/10.1186/s12859-018-2060-2

Park, A., Joo, M., Kim, K., Son, W.J., Lim, G., Lee, J., Kim, J.H., Lee, D.H., Nam, S. 2022. A comprehensive evaluation of regression-based drug responsiveness prediction models, using cell viability inhibitory concentrations (IC50 values). *Bioinformatics*, **38(10),** 2810-2817. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btac177

Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., Gulin, A., 2018. CatBoost: unbiased boosting with categorical features, Advances in neural information processing systems, 31

Roden, D.M., McLeod, H.L., Relling, M.V., Williams, M.S., Mensah, G.A., Peterson, J.F., Van Driest, S.L., 2019 *Pharmacogenomics. Lancet*., **394**(10197):521-532. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)31276-0

Sharma, A. and Rani, R. 2020. Ensembled machine learning framework for drug sensitivity prediction. *IET Syst Biol*, **14(1),** 39-46. https://doi.org/10.1049/iet-syb.2018.5094

Singh, D. P. and Kaushik, B. 2023. A systematic literature review for the prediction of anticancer drug response using various machine-learning and deep-learning techniques. *Chemical Biology & Drug Design*, **101(1)**, 175-194.

Steele, F.R. 2009. Personalized medicine: something old, something new. *Per Med*., ,**6(1)**:1-5. https://doi.org/10.2217/17410541.6.1.1

Vis, D.J., Bombardelli, L., Lightfoot, H., Iorio, F., Garnett, M.J., Wessels, L.F. 2016. Multilevel models improve precision and speed of IC50 estimates. *Pharmacogenomics*. 2016 May, **17(7)**, 691-700. https://doi.org/10.2217/pgs.16.15

Wang, H., Xi, J., Wang, M., Li, A. 2020. Dual-Layer Strengthened Collaborative Topic Regression Modeling for Predicting Drug Sensitivity. *IEEE/ACM Trans Comput Biol Bioinform*., 2020 Mar-Apr, **17(2)**:587-598. https://doi.org/10.1109/TCBB.2018.2864739

Wei, D., Liu, C., Zheng, X., Li, Y. 2019. Comprehensive anticancer drug response prediction based on a simple cell line-drug complex network model. *BMC Bioinformatics*. 2019 Jan 22, **20(1)**:44.

https://doi.org/10.1186/s12859-019-2608-9

van der Meer, D., Barthorpe S., Yang W., Lightfoot H., Hall, C., Gilbert, J., Francies, H.E., Garnett, M.J., 2019, Cell Model Passports-a hub for clinical, genetic and functional datasets of preclinical cancer models. *Nucleic Acids Res*., Jan, **8;47**(D1):D923-D929. https://doi.org/10.1093/nar/gky872.

Véstias, M.P. 2020. Deep Learning on Edge: Challenges and Trends. In Smart Systems Design, Applications, and Challenges; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2020; 23–42

Yang, W., Soares, J., Greninger, P., Edelman, E.J., Lightfoot, H., Forbes, S., Bindal, N., Beare, D., Smith, J.A., Thompson, I.R., Ramaswamy, S., Futreal, P.A., Haber, D.A., Stratton, M.R., Benes, C., McDermott, U., Garnett, M.J. 2013. Genomics of Drug Sensitivity in Cancer (GDSC): a resource for therapeutic biomarker discovery in cancer cells. *Nucleic Acids Res.,* 2013 Jan, **41** (Database issue):D955-61. https://doi.org/10.1093/nar/gks1111

İnternet Kaynakları

[1] https:///cellmodelpassports.sanger.ac.uk/downloads

[2] https:///www.cancerrxgene.org/celllines

[3] https:///cellmodelpassports.sanger.ac.uk