



YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

YUZUNCU YIL UNIVERSITY

Journal of the Institute of Natural & Applied Sciences

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>

ISSN: 1300 - 5413 / e-ISSN: 2667-467X

Yıl / Year : 2024

Cilt / Volume : 29

Sayı / Issue : 2

**YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ /
YUZUNCU YIL UNIVERSITY JOURNAL OF THE INSTITUTE OF NATURAL AND
APPLIED SCIENCES**

SAHİBİ / OWNER

Prof. Dr. Hamdullah ŞEVLİ
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Rektörü
/ Rector of Van Yuzuncu Yil University

EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF

Prof. Dr. Harun AKKUŞ
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
/ Director of Van Yuzuncu Yil University the Institute of Natural and Applied Sciences

YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS

Doç. Dr. Dilara ÖZTÜRK
Doç. Dr. Ferda KARAKUŞ
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÖZDEMİR

YAYIN KURULU / EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Burak DİKİCİ, Atatürk Üniversitesi
Prof. Dr. Burak ORDİN, Ege Üniversitesi
Prof. Dr. Cemil TUNÇ, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Prof. Dr. Csaba SZABO, Debrecen University
Prof. Dr. Çağdaş Hakan ALADAĞ, Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Emre ÇOMAK, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Prof. Dr. Feyyaz DURAP, Dicle Üniversitesi
Prof. Dr. Hasan BULUT, Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Hüseyin KARAKUŞ, Dumlupınar Üniversitesi
Prof. Dr. Hüseyin MERDAN, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Prof. Dr. Hüsnü KOÇ, Siirt Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail KASAP, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Prof. Dr. Kenan SÖĞÜT, Mersin Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet Ali KIRPIK, Kafkas Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet Emin MERAL, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet Sait TAYLAN, Hakkari Üniversitesi
Prof. Dr. Mubariz KARAEV, King Saud University
Prof. Dr. Naci GENÇ, Yalova Üniversitesi
Prof. Dr. Özdemir ADIZEL, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Prof. Dr. Özlem SELÇUK ZORER, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Prof. Dr. Rıdvan SARAÇOĞLU, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Prof. Dr. Sabri GÜL, Mustafa Kemal Üniversitesi
Prof. Dr. Sedat YAYLA, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Prof. Dr. Semra DEMİR, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Doç. Dr. Alper HAMZADAYI, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Doç. Dr. Baran YOĞURTCUOĞLU, Hacettepe Üniversitesi
Doç. Dr. Barış ERDİL, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Doç. Dr. Çeknas ERDİNÇ, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Doç. Dr. Duygu YAŞAR ŞİRİN, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Doç. Dr. Ekrem MUTLU, Kastamonu Üniversitesi
Doç. Dr. Emel ÖZ, Atatürk Üniversitesi
Doç. Dr. Erdal AĞLAR, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Doç. Dr. Ferhat KIZILGEÇİ, Mardin Artuklu Üniversitesi
Doç. Dr. Harun AYDIN, Hacettepe Üniversitesi
Doç. Dr. Mohammed J. K. BASHİR, University of Tunku Abdul Rahman
Doç. Dr. Memduh KARALAR, Bülent Ecevit Üniversitesi
Doç. Dr. Müge ÜNAL ÇİLEK, Fırat Üniversitesi
Doç. Dr. Nergiz YILDIZ YORGUN, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Doç. Dr. Onur ŞATIR, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Doç. Dr. Özal YILDIRIM, Fırat Üniversitesi
Doç. Dr. Reza ABDİ-GHALEH, University of Bonab
Doç. Dr. Zehra Funda AKBULUT, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Altuğ KARABEY, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Atabak ELMİ, Deakin University
Dr. Danielle RODRIGUES MAGALHAES, Zaragoza University
Dr. Madhumita MUKHOPADHYAY, Maulana Abul Kalam Azad University of Technology

İSTATİSTİK EDİTÖRÜ / STATISTICS EDITOR

Prof. Dr. Abdullah YEŞİLOVA

DİL EDİTÖRLERİ / LANGUAGE EDITORS

Doç. Dr. Selçuk TOPAL
Dr. Öğr. Üyesi Gül ŞEN
Arş. Gör. Murat TURAN

MİZANPAJ EDİTÖRÜ / LAYOUT EDITOR

Doç. Dr. Fikriye Şeyma KAYA

SEKRETER / SECRETARY

Dr. Öğr. Üyesi Ogün Ozan VAROL

YAZI İŞLERİ / EDITORIAL AFFAIRS

Dr. Öğr. Üyesi Burak ÖZDEMİR
Arş. Gör. Ayşenur KALMER
Arş. Gör. Bahar KALKAN
Arş. Gör. Fadime KARADAŞ
Arş. Gör. Murat TURAN
Arş. Gör. Muhammed Coşkun IRMAK
Mehmet ERZEN
Zilan ŞİRP

YAZIŞMA ADRESİ / CORRESPONDENCE ADDRESS

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 65080 Tuşba/VAN
Van Yuzuncu Yil University the Institute of Natural and Applied Sciences, 65080
Tuşba/VAN

Telefon / Telephone: +90 432 225 10 97

Belgegeçer / Fax: +90 432 225 11 23

E-posta / E-mail: fbedergi@yyu.edu.tr

Cilt / Volume: 29

Sayı / Issue: 2

Web: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>

Basım Yeri ve Tarih / Published in: Van, 2024

DERGİ BİLGİLERİ / INFORMATION

Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Yuzuncu Yil University Journal of the Institute of Natural and Applied Sciences

ISSN 1300-5413 | e-ISSN 2667-467X | Yayın Aralığı Yılda 3 Sayı / 3 Issues Per Year

İçindekiler / Contents

Fen Bilimleri ve Matematik / Natural Sciences and Mathematics

-
- Histopathological and Antioxidant Effects of Bromelain on Kidney Tissue of Tyloxapol-Induced Hyperlipidemic Rats
♦ *Ayşe Nurseli SULUMER, Esra PALABIYIK, Bahri AVCI, Handan UGUZ, Hakan ASKIN* 413-422
- Türkiye İçin Yeni Bir Yonca Kaydı: *Trifolium alexandrinum* var. *serotinum*
♦ *Mustafa KESKİN, Mehmet ÇELİK* 423-428
- Antalya'daki Keçi ve Koyunların İşkembe Siliyat (Ciliophora, Trichostomatia) Faunası ve İşkembe Siliyatlarının Filogenisi
♦ *Gözde GÜRELLİ, Nuray YÜRÜCÜOĞLU* 429-437
- Theoretical Investigation of the Chemical Reactivity of Acrylic Acid Molecules: A DFT Study with UV-Vis, NMR, and FT-IR Spectroscopy Using STO-3G Basis Set
♦ *Fermin AK, Mehmet Hanifi KEBİROĞLU* 438-446
- ZnO/ITO, Sn and Cu Doped ZnO/ITO Films as an Photoanode for Solar Cell: Production and Characterizations
♦ *İlker KARA, Dheyaaldain Mohammed Hussein ALHASANI, Ahmet Furkan KAYIŞ, Özcan YALÇINKAYA, Olcay GENÇYILMAZ, Abjar Ibrahim Rashid HAFEDH* 447-457
- Gamma Radiation Shielding Efficiency of High Entropy Alloys: A Comparative Study
♦ *Ufuk PERİŞANOĞLU* 458-467
- Investigation of Radiation Effects on Cr-Co-Ni Alloys Used in Dental Applications by Monte Carlo Simulation
♦ *Doğan DURNA, Bünyamin AYGÜN, Abdulhalik KARABULUT* 468-482
- Yeni Potansiyel Şeker-Ferrosenil İmin Katalizörler Sentezi ve Spektroskopik Yöntemlerle Karakterizasyonu
♦ *Cansu ÖZKARA, Özer IŞILAR, Adnan BULUT* 483-493

- Roman Domination in Mycielski Graphs: A Study of Some Graphs
♦ and a Heuristic Algorithm 494-502
Derya DOĞAN DURGUN, Emre Niyazi TOPRAKKAYA
- Logistic and CSG Growth Models for Predicting Life Expectancy
♦ *Begüm ÇIĞŞAR, Deniz ÜNAL, Abdel-Hack BIO BOULOU, Bassel ALSHAHABY* 503-513
-

Mühendislik ve Mimarlık / Engineering and Architecture

- Erçek Gölü (Van) Kapalı Havzası Arazi Kullanım/Arazi Örtüsü
♦ Değişiklerinin Uzaktan Algılama Yöntemi Kullanılarak Belirlenmesi 514-529
Erkan DİŞLİ, Zehra ŞAPCI
- Ulaşım Kaynaklı Emisyonların Çevresel Etkilerinin ve İnsan Sağlığına
♦ Yansımalarının İncelenmesi: Ege Bölgesi Örneği 530-561
Tarık ÖZDEMİR, Emine Didem EVCİ KİRAZ
- Copras Yöntemi ile Karadeniz Bölgesi'nde Askeri Üs Bölgesi Seçimi
♦ *Ali KILIÇASLAN, Selen AVCI AZKESKİN, Zerrin ALADAĞ* 562-579
- Nar Çekirdeğinin Bazı Fizikokimyasal Özellikleri ve Yağ Asidi Bileşimi
♦ *Dilara ASLAN BAKKALBAŞI, İsa CAVİDOĞLU* 580-588
- Physicochemical and Mechanical Properties of Sodium Alginate Films
♦ Containing Thyme Essential Oil 589-600
Cansu TOROL, Özgül ÖZDESTAN OCAK
- Duvara Yakın Tandem Silindirler Etrafındaki Akış Yapıları
♦ *Engin PINAR, Gökhan YAŞAR* 601-610
- Shannon Entropi (SE) ve AHP Metoduyla Artvin (Arhavi)
♦ Kapisre Taşkınının İncelenmesi 611-631
Ufuk YÜKSELER, Ömerul Faruk DURSUN
-

- ◆ Yarı Kurak-Kurak İklim Koşullarında Bazı Ampirik Modeller Kullanılarak A Sınıfı Buharlaşma Kabından Gerçekleşen Günlük Buharlaşmanın Tahmin Edilmesi 632-647
Selçuk USTA
- ◆ Hakkari ve Civarının (Güneydoğu Anadolu, Türkiye) Güncel Deprem Potansiyeli: Bölge-Zaman-Magnitüd Analizleri 648-664
Serkan ÖZTÜRK, Hamdi ALKAN
- ◆ Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Kriterlerinin İncelenmesi 665-681
İsmail SARAÇ
- ◆ Çok Duvarlı Karbon Nanotüp- PVC/PMMA Nanokompozitinin Spektroskopik ve Termal Karakterizasyonu 682-689
Afşar ÇELİK, Mustafa Hamdi KARAGÖZ
- ◆ Atık Lastiklerin Geri Dönüşümü İçin Kenevir Katkılı Yeşil Kompozit Üretiminin Araştırılması 690-707
Arife ŞİMŞEK, Gökhan DEMİR
- ◆ Investigation of Delamination in the Drilling of PLA Specimens with Different Lattice Structures 708-719
Ender EMİR, Burak ÖZDEMİR, Erkan BAHÇE, Güzde ERENER
- ◆ Kars Mazlum Ağa Hamamı Onarımı Hakkında Bir İnceleme 720-744
Şahabettin ÖZTÜRK

Zirai Bilimler / Agriculture

- ◆ Absisik Asit ve Arbusküler Mikorizal Fungus Uygulamalarının Fasulyede Kömür Çürüklüğü Hastalığı [(*Macrophomina phaseolina*) (Tassi) Goid.] ve Bitki Gelişimine Etkisi 745-760
Ali VURAL, Semra DEMİR, Çeknas ERDİNÇ

-
- ◆ Zeytin Atığı Karasuyun Nane (*Mentha piperita* L.) ve Kuzukulağı (*Rumex acetosella* L.) Bitkilerinde Bazı Morfolojik Özellikler ve Mineral Madde İçeriğine Etkisi 761-769
İsmail GÜL, Yasemin SALİHOĞLU, Faika YARALI KARAKAN
- ◆ Narince x Regent Melezi F1 Genotiplerinin Mildiyö ve Külleme Hastalıklarına Dayanıklılığının Moleküler Markörlerle Belirlenmesi 770-779
İlknur POLAT, Esra SULUHAN
- ◆ Evelik Otu'nun (*Rumex acetosella*) Yem Değeri ve İn vitro Gerçek Sindirilebilirliğinin Belirlenmesi 780-786
Mehtap GÜNEY, Rabia AYDIN
-

Derleme / Review

- ◆ The Anticancer Potential of Van Lake Basin Plants 787-797
Gül GÖRMEZ
- ◆ Su Dalga Enerjisi Üretimi ve Yapay Zekâ: Asya, Avrupa ve Türkiye'nin Potansiyeli 798-822
Selma KAYMAZ, Tuğrul BAYRAKTAR, Çağrı SEL
-



Research Article

Histopathological and Antioxidant Effects of Bromelain on Kidney Tissue of Tyloxapol-Induced Hyperlipidemic Rats

Ayse Nurseli SULUMER, Esra PALABIYIK*, Bahri AVCI, Handan UGUZ, Hakan ASKIN

Ataturk University, Faculty of Science, Department of Molecular Biology and Genetics, 25000, Erzurum, Türkiye

Ayse Nurseli SULUMER, [ORCID No: 0000-0002-2001-2186](#), Esra PALABIYIK, [ORCID No: 0000-0002-3066-1921](#), Bahri AVCI, [ORCID No: 0000-0001-8451-5463](#), Handan UĞUZ, [ORCID No: 0000-0001-5444-1459](#), Hakan AŞKIN, [ORCID No: 0000-0003-3248-759X](#)

*Corresponding author e-mail: esraozdemir.tr@gmail.com

Article Info

Received: 26.10.2023
Accepted: 19.03.2024
Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1381717](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1381717)

Keywords

Bromelain,
Histopathology,
Hyperlipidemia,
Kidney,
Oxidative stress,
Tyloxapol

Abstract: This study was designed to investigate the nephroprotective effect of Bromelain against oxidative stress induced by Tyloxapol-induced hyperlipidemia in rats. Rats (n=6) were divided into three groups. I: Control (C) Group: No treatment was given and only distilled water was given; II: Tyloxapol (TX) Group: Group receiving Tyloxapol (400 mg/kg, i.p); III: Tyloxapol + Bromelain (TX+BR) Group: Group receiving Tyloxapol (400 mg/kg, i.p.) and group receiving Bromelain (250 mg/kg, o.d.) for 18 days. As a result of Tyloxapol administration, oxidative stress parameters SOD and CAT levels decreased, while MDA levels increased. In addition, histopathologic variations were detected in kidney sections. On the other hand, lipid peroxidation decreased and most of the studied parameters improved with combined administration (TX+BR group). According to the results obtained, bromelain may be a potent and alternative agent with protective effect for further studies.

Tyloxapol ile İndüklenmiş Hiperlipidemik Sıçanların Böbrek Dokusu Üzerinde Bromelainin Histopatolojik ve Antioksidan Etkileri

Makale Bilgileri

Geliş: 26.10.2023
Kabul: 19.03.2024
Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1381717](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1381717)

Anahtar Kelimeler

Böbrek,
Bromelain,
Hiperlipidemi,
Histopatoloji,
Oksidatif stres,
Tyloxapol

Öz: Bu çalışma, ratlarda Tyloxapol ile indüklenen hiperlipidemi neticesinde oluşan oksidatif strese karşı Bromelain'in nefroprotektif etkisinin incelenmesi için tasarlandı. Ratlar (n=6) üç grup altında sınıflandırıldı. I: Kontrol (C) Grubu: Herhangi bir uygulama yapılmayan ve sadece distile su verilen grup; II: Tyloxapol (TX) Grup: Tyloxapol (400 mg/kg, i.p) alan grup; III: Tyloxapol + Bromelain (TX+BR) Grup: Tyloxapol (400 mg/kg, i.p) alan ve 18 gün Bromelain (250 mg/kg, o.d.) alan grup. Tyloxapol uygulaması neticesinde oksidatif stres parametrelerinden SOD ve CAT seviyelerinde azalma meydana gelirken MDA seviyelerinde artış görüldü. Buna ek olarak böbrek kesitlerinde histopatolojik varyasyonlar tespit edildi. Bunun aksine çalışmada, kombine uygulama ile (TX+BR grubu) lipid peroksidasyonu azaldı ve çalışılan parametrelerin çoğunda iyileşme görüldü. Elde edilen sonuçlara göre bromelain'in daha sonraki çalışmalar için koruyucu etkiye sahip güçlü ve alternatif bir ajan olabileceği düşünülmektedir.

1. Introduction

Hyperlipidemia due to genetic or environmental causes is defined as serum cholesterol and triglyceride levels above normal. Hyperlipidemia, which includes lipoprotein disorders such as high total cholesterol, low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C), triglycerides and low HDL cholesterol, is a risk factor for cardiovascular diseases and a leading cause of morbidity and mortality worldwide (Husain et al., 2022). Coronary arteries and atherosclerosis can be counted as cardiovascular diseases that pose the most important health problems. However, hyperlipidemia not only causes these diseases, but can also cause damage in many organs, including kidney damage (Manzoni et al., 2020). Lipid accumulation in the renal parenchyma is thought to be detrimental to kidney function and therefore hyperlipidemia is known to be one of the most common independent risk factors for chronic kidney disease (Gai et al., 2019).

It is well known that hyperlipidemia is associated with inflammation and oxidative stress, which are generally recognized as the most important risk factors for major cardiovascular diseases such as atherosclerosis (Fidèle et al., 2017). Studies have shown that a diet rich in antioxidants plays an important role in the prevention of cardiovascular disease and cancer and may be preferable to drug therapies for conditions such as hyperlipidemia and hypertension (Nwozo et al., 2017). Stress alters the lipid profile and leads to increased production of free oxygen radicals. A number of studies have reported that stress-induced changes in antioxidant status increase lipid peroxidation, reduce physical activity, and lead to decreased activity of the antioxidant enzymes superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) (Chukwuebuka et al., 2021).

Keeping triglyceride and cholesterol levels within limits is crucial for cardiovascular health and having low LDL-C and high HDL-C levels is associated with a reduced risk of atherosclerotic disease (Palabiyik et al., 2023). In order to achieve more effective results in lowering cholesterol levels, drug therapies are applied and statins are one of these therapies. Statins can be produced by microbial or chemical synthesis and are used as inhibitors of cholesterol biosynthesis (Toth & Banach, 2019). While the drugs used are therapeutic, they also have inherent side effects such as hepatotoxicity and nephrotoxicity, which have been demonstrated in various clinical settings. Therefore, researchers have focused on natural compounds with therapeutic properties.

Evidence supporting the effect of increasing fruit and vegetable intake on hyperlipidemia is limited because studies either combined an increase in fruit and vegetable intake with another dietary intervention, such as reducing fat intake, or many studies were not specifically designed to test the effect on hyperlipidemia (Alissa & Ferns, 2017). Ananas comosus (pineapple), which grows in equatorial regions worldwide, has attracted much attention as a phytotherapy and is believed to have anti-cancer, anti-inflammatory and anti-platelet effects, particularly due to its antioxidant potential (Hikisz & Bernasinska-Slomczewska, 2021). Bromelain, an inexpensive by-product waste of pineapple extract, is rich in complex enzymes that play a vital role in various clinical applications and has a highly effective antioxidant effect in the treatment of dichlorvos-induced nephrotoxicity (Colletti et al., 2021; Gürel & Kaya, 2022). Bromelain has extremely low toxicity, is safe for long-term oral administration and is readily absorbed from the intestinal tract without any loss or impairment of activity.

Tyloxapol is a nonionic surface-active oligomer that is a highly valuable substance in the study of triglyceride and cholesterol metabolism and is widely used in *in vivo*/*in vitro* biomedical applications. It has many pharmacological effects such as antioxidant, anti-inflammatory and anticancer activities and is used to screen lipid-lowering natural or chemical drugs to study cholesterol and triglyceride metabolism in animal studies (de Sousa et al., 2017).

Our study aimed to evaluate the antioxidant and histopathological effects of bromelain in kidney tissue to alleviate tyloxapol-induced hyperlipidemia in rats.

2. Material and Methods

2.1. Chemicals and materials

Bromelain from pineapple stems (Holland and Barrett) was purchased from the UK and Tyloxapol (Santa Cruz Biotechnology) was purchased from the USA. MDA, SOD and CAT Elisa kits (SunRed Biotechnology) were used for oxidative stress measurement.

2.2. Procurement and preparation of experimental animals

The study was conducted with 18 rats (*Rattus norvegicus* *Domestica*, male, 210-300 g) with the approval of Atatürk University Medical Experimental Application and Research Center Ethics Committee dated 15.11.2021 and numbered E-55885869-900-2100312890. Rats were housed in groups of 6 in polycarbonate cages at room temperature ($22 \pm 2^\circ\text{C}$), with free access to food and water, on a 12 h light/dark cycle, until the beginning of the experiment. After three groups (I-III) were randomly assigned ($n=6$), all treatments were performed on rats that were fasted for 12 hours. Anesthesia was administered 24 hours later and kidney tissues were then removed.

2.3. Preparation and application of materials

0.5% (w/v) carboxymethylcellulose was used to prepare an aqueous solution of bromelain and administered to animals by gavage (250 mg/kg per day). A hyperlipidemia model was established by administering tyloxapol (400 mg/kg i.p.) to animals fasted for 12 h after bromelain administration (El-Demerdash et al., 2020; Sulumer et al., 2023). After 24 hours, animals were considered hypercholesterolemic (Sulumer et al., 2023).

2.4. Creation of application group

The 18 Wistar (*Rattus norvegicus* *Domestica*) albino rats used in the study were grouped as follows; **I: Control (C) Group:** No treatment was given and only physiologic water [2.5 mL/kg, (i.p)] was given intraperitoneally; **II: Tyloxapol (TX) Group:** Group given Tyloxapol (400 mg/kg, i.p) 30 minutes after physiologic water (2.5 mL/kg, i.p) administration; **III: Tyloxapol + Bromelain (TX+BR) Group:** Group receiving tyloxapol (400 mg/kg, i.p) 24 hours after Bromelain (250 mg/kg, o.d) administration for 18 days.

Rats were considered hyperlipidemic, anesthetized with sevoflurane and sacrificed 24 hours after the end of the treatment. The abdomen of the animals was carefully opened with a vertical incision, kidney tissues were removed and stored at -20°C and -80°C until the period of analysis.

2.5. Oxidative stress (MDA, SOD, and CAT) analyze

Kidney tissue was placed in a tube, homogenized at 4000 rpm with the addition of buffer and placed in a homogenizer apparatus (5 x 1 min shaking and 10 sec holding). The lysed tissue was then centrifuged at 13,000 rpm (4°C , 30 min) and the supernatant fraction (homogenate) was removed. For oxidative stress analysis, standards and homogenates prepared as dilute solutions were placed in well plates and reacted according to the procedure documented in the kit. After the reaction, optical density (OD) was measured with a spectrophotometer at a wavelength of 450 nm and the standard curve was calculated.

2.6. Histopathology analysis

Kidney tissues were cut and cassettes were placed in a tissue processing device. The tissues were first kept in formaldehyde for 48 hours, 70%, 80%, 90%, 96%, 100%, 30%, 30 minutes in each alcohol series, 30 minutes in Xylene I and Xylene II separately and 40 minutes in 2 separate paraffin baths and processed in autotechnique (Çakmak, 2020). After this process, tissue embedding (blocking) was performed. The blocks were placed on a microtome to obtain 4 micron thick sections and placed in a water bath at $30-45^\circ\text{C}$ to be kept on slides. The slides were incubated at 80°C for 30 minutes and then stained with Hemotoxylene-Eosin (H&E) to observe the overall histologic structure. Microscopic examination was performed using a Leica CV5030 Fully Automatic Glass Coverage (Chicago, United States of America). High resolution images of the specimens were taken at $\times 200$ magnification using an Olympus B $\times 60$ microscope.

2.7. Statistical analysis

One-way ANOVA test (normal distribution) and GraphPad program (Prism 3.0) were used to compare the groups. All values were expressed as mean \pm SEM to emphasize differences between groups. The non-parametric Kruskal-Wallis test was used to analyze the differences between the data obtained using the semi-quantitative method in histopathological examination. Analyses between two groups were performed using the Mann-Whitney U-test. $p < 0.05$ was considered statistically significant

3. Results

3.1. Antioxidant effect of bromelain

In this study, we examined MDA, which is an indicator of lipid peroxidation among the enzymes that contribute to the antioxidant defense mechanism in kidney tissue, as well as SOD, which plays a role in defense against superoxide radicals, and CAT, which detoxifies hydrogen peroxide.

When the MDA data obtained were analyzed, an increase was observed in the kidney tissue in the Tyloxapol treated group. However, this increase is thought to be statistically insignificant. In the group in which Tyloxapol and Bromelain were administered together, Bromelain decreased the observed increase and brought it closer to the data of the control group. However, this decrease is also considered to be statistically insignificant.

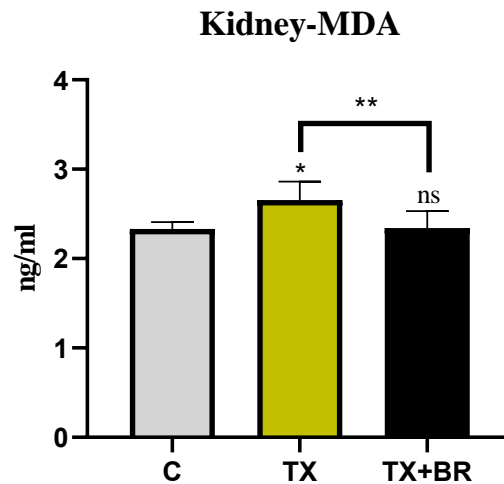


Figure 1. Graphical representation of MDA levels in kidney tissues.

^{ns} $p > 0.05$, * $p < 0.05$ and ** $p < 0.01$ vs control group. The data are shown as mean \pm SEM (n = 5).

When SOD data, which is one of the enzymatic oxidants, was analyzed, it showed a decrease in the kidney in the tyloxapol treated group compared to the control group and this decrease was found to be statistically significant. In both Tyloxapol and Bromelain treated groups, it was observed that the effect of tyloxapol causing hyperlipidemia was reversed with bromelain and approached the control values. This situation is considered statistically significant.

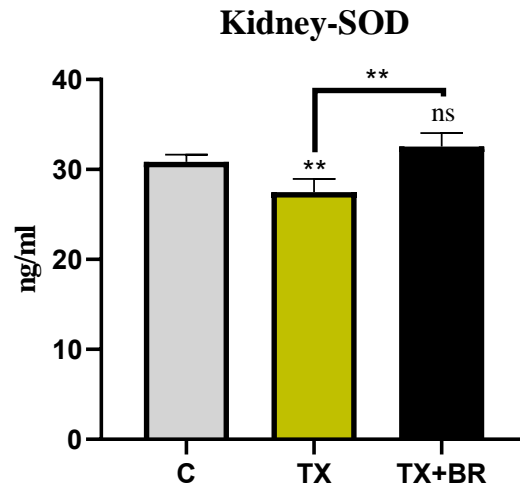


Figure 2. Graphical representation of SOD levels in kidney tissues.
^{ns}p > 0.05, *p < 0.05 and **p < 0.01 vs control group. The data are shown as mean ± SEM (n = 5).

In the analysis of catalase data, the difference between the control group and the group administered Tyloxapol alone was not considered statistically significant, while the difference with Group III was considered significant.

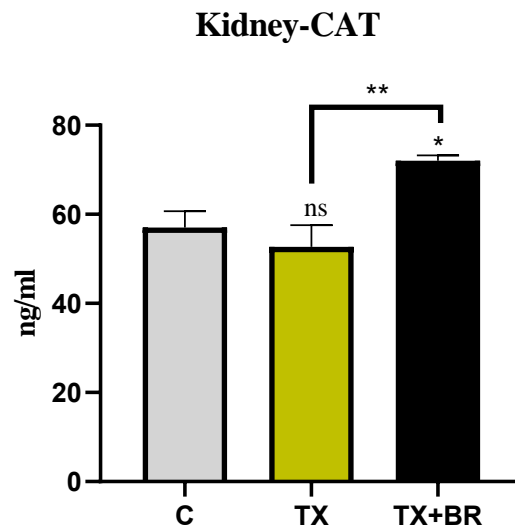


Figure 3. Graphical representation of CAT levels in kidney tissues.
^{ns}p > 0.05, *p < 0.05 and **p < 0.01 vs control group. The data are shown as mean ± SEM (n = 5).

3.2. Effect of bromelain on histopathology

The kidney tissues used in our study were sectioned and examined for histopathology. In the histologic evaluation of the renal cortex of Group C, the microscopy images obtained after H&E staining showed that the renal tubules, glomeruli and renal cavity (Bowman's capsule) had normal structures and no pathological findings were found (Figure 4, Table 1).

Table 1. Histopathologic findings and scores in kidney tissue

Groups	C	TX	TX+BR
Congestion	---	+++	+
Hemorrhage	---	++	+
Apoptosis	---	+	---
Necrosis	---	+	---
Infiltration	---	+++	---
Dilatation	---	++	---

*According to histopathologic results: none (---), mild (+), moderate (++), and severe (+++)

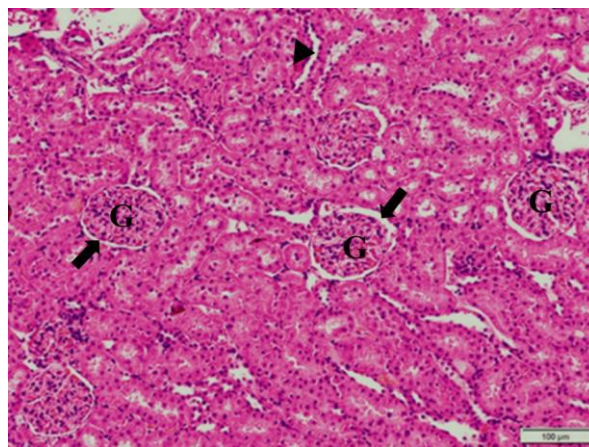


Figure 4. Kidney control (C) group histology images. **G**: glomeruli; **thick arrow**: Bowman's capsule; **arrowhead**: indicates normal histological structures of proximal convoluted tubules (H&E, Bar: 100 μm.).

Significant histopathologic findings including tubular dilatation, congestion, hemorrhage, mononuclear cell infiltration, cell apoptosis and necrosis were observed in the evaluation of TX group (Figure 5).

When bromelain was administered to the rats (TX group) for protection before hyperlipidemia occurred, it was observed that pathologic findings in the kidney tissues decreased due to the effect of bromelain. When TX group was compared with TX+BR group, it was shown in Figure 6 that hemorrhage decreased, congestion, mononuclear cell infiltration, tubular dilatation, cell apoptosis and necrosis were not observed.

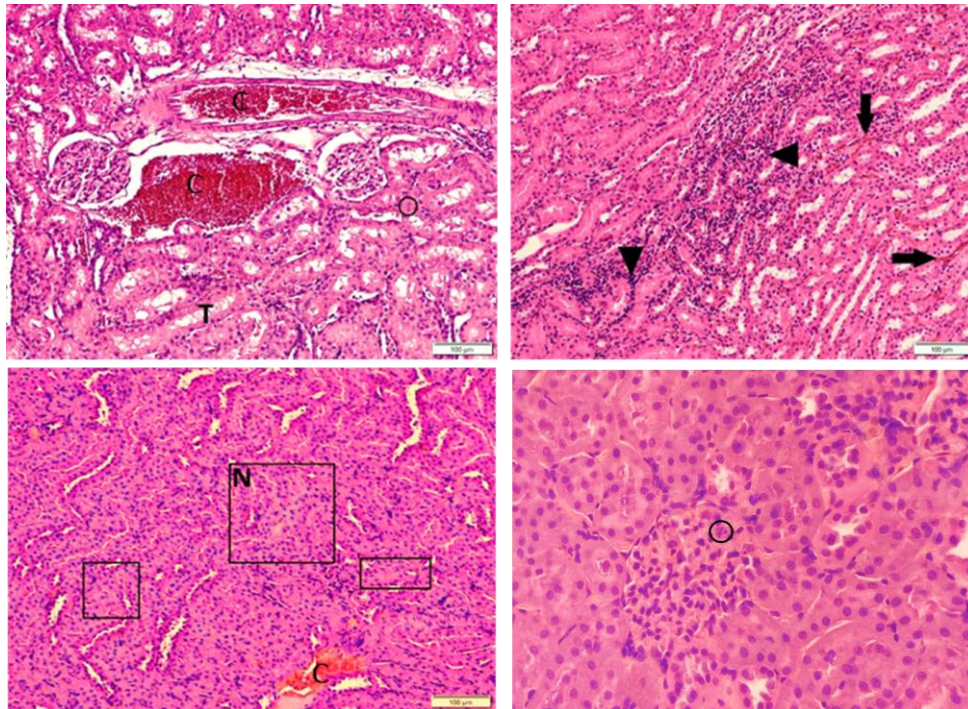


Figure 5. Histological effects of Tyloxapol on kidney tissue in the hypercholesterol group (TX) **circle:** apoptosis, **T:** tubular dilatation; **arrowhead:** mononuclear cell infiltration, **thick arrow:** bleeding (hemorrhage); **N:** necrosis, **C:** congestion (blood supply).

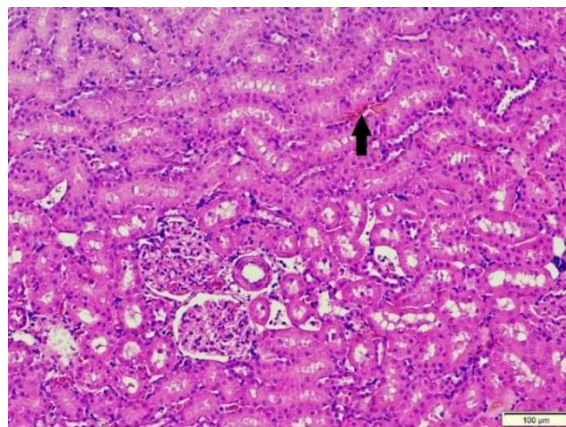


Figure 6. Kidney TX+BR group histology images (H&E, Bar: 100 μ m). **Thick arrow:** Hemorrhage.

4. Discussion

Correction of elevated plasma total cholesterol, triglyceride and LDL levels, as well as increased HDL lipid ratios, is paramount in the treatment of hyperlipidemia. Lipoprotein and lipid abnormalities are recognized as risk factors for cardiovascular diseases, which have increased significantly globally in recent years (Iyer & Patil, 2019). Tyloxapol is a non-ionic surfactant that induces hyperlipidemia by inhibiting peripheral lipoprotein lipase responsible for clearance of lipid particles from the body and increasing cholesterol synthesis in the liver and lipid absorption in the intestine (Dudhipala et al., 2021). In our study, an acute hyperlipidemia model was established in animals 24 hours after tyloxapol induction and our model was supported by the study of Parwin and colleagues (Parwin et al., 2019). The accumulation of lipids and other substances in the arterial walls can block the vessel lumen and affect heart tissue, while restricting blood flow to the kidneys and other vital organs, leading to coronary heart disease or kidney failure (Akinmoladun et al., 2021).

In hyperlipidemia, increased production of reactive oxygen species (ROS) by endothelial cells challenges the cell's antioxidant defenses, and increased ROS production from accumulated fat can lead to increased oxidative stress in the blood, which can severely affect other organs (Feng et al., 2022). MDA is an indicator of lipid peroxidation, which triggers protein oxidation and disrupts cell membrane structure and function (Gaschler & Stockwell, 2017). Superoxide dismutase (SOD), a bioactive substance known to have antioxidant properties (oxygen radical scavenger), causes a decrease in antioxidant-SOD levels in liver and kidney tissues of rats under hypercholesterolemic conditions. Under conditions of increased oxidative stress, catalase may represent the most effective antioxidant defense in the body and, like SOD, is an essential enzyme to prevent ROS production (Baldissera et al., 2017). Therefore, in our study, the levels of MDA, SOD and CAT, which are antioxidant parameters in kidney tissue, were investigated in tyloxapol, which causes hyperlipidemia, and bromelain, which is given for preventive purposes. When the results were analyzed, an increase in MDA level was observed as the first parameter in the hyperlipidemic group (TX), while this increase was close to the control level in the combined group (TX+BR). For the antioxidant defense enzyme SOD, a decrease was observed in the TX group compared to the control group, but Bromelain was able to reverse this decrease by providing strong protection before hyperlipidemia. Although catalase, one of the last antioxidant parameters we studied, decreased in the hyperlipidemic group, bromelain increased CAT activity in the combined group and showed that it has a strong anti-oxidation activity. In a study in rats, bromelain was shown to significantly eliminate oxidative stress during isoproterenol-induced myocardial infarction (Allawadhi et al., 2018). Kalaiselvi et al. (2013) reported that bromelain can quench and detoxify free radicals and positively modulate antioxidant activity in rats with 7,12-dimethylbenz[a]anthracene (DMBA)-induced breast cancer (Kalaiselvi et al., 2013).

In another stage of the study, sections of kidney tissue were taken for pathological examination to observe the effects of hyperlipidemia on kidney tissue. In previous studies, glomerular atrophy, hemorrhage and abundant necrosis were detected in kidney tissues after hyperlipidemia (Liu et al., 2021). In another study, foot process fusion, mild damage to glomeruli, and accumulation of lipid droplets in the renal tubule interstitium were observed in the kidney tissues of rats fed a high-fat diet (Li et al., 2022). Singh et al. (2024) reported that tyloxapol-induced mice exhibited many damages, especially inflammation in kidney, liver, pancreas and arterial tissues. In another study on rats, it was reported that hyperlipidemia caused glomerular atrophy and increased Bowman's capsule size in kidney tissue (Gara et al., 2017). In addition, triton-induced inflammation, glomerular fibrosis and tissue necrosis were observed in the kidney tissues of rats (Karale et al., 2022). In a study with bromelain, it was observed that paracetamol caused glomerular atrophy, tubular dilatation, inflammatory cell infiltration and necrotic changes in renal tissue, but treatment with bromelain significantly reduced these damages (Akaras et al., 2023). El-Demerdash et al. (2020) proved that aluminum causes atrophic and fragmented glomeruli in renal tissue and bromelain treatment treats these findings and shows normal glomerular structure. In our study, pathological signs of mononuclear cell infiltration, tubular dilatation, hemorrhagic cell apoptosis, congestion and necrosis were found in the TX group. These findings are significantly different from the control group and demonstrate the success of our model. When the histopathological changes of the kidney tissue were examined, our combined group (TX+BR) showed a significant decrease in the pathological findings observed in the TX group and had a histoprotective effect.

5. Conclusion

In conclusion, our study addressed the effects of Tyloxapol-induced hyperlipidemia. Accordingly, Tyloxapol induced dysfunction in renal tissue, leading to disruption of oxidative-antioxidative balance and tissue damage. The bromelain used in this study is known as a potent agent with many broad spectrum health benefits. In this context, bromelain, which is used as an untested agent, is seen as a promising protective and alternative with the potential to reduce the risk of death and disease as a result of free radical reactions in kidney tissue.

Acknowledgements

We would like to thank the Atatürk University Faculty of Science Molecular Biology/Genetics Departments for their support of our experimental study.

References

- Akaras, N., Toktay, E., Celep, N. A., Yüce, N., Şimşek, H., & Özkan, H. İ. (2023). Antioxidant effects of bromelain on paracetamol-induced renal injury in rats. *Archives of Basic Clinical Research*, 5, 364-371. <https://doi.org/10.5152/ABCR.2023.22123>
- Akinmoladun, A. C., Adegbamigbe, A. D., Okafor, N. R., Josiah, S. S., & Olaleye, M. T. (2021). Toxicological and pharmacological assessment of a multi herbal phytopharmaceutical on Triton X-1339-induced hyperlipidemia and allied biochemical dysfunctions. *Journal of Food Biochemistry*, 45(3), e13238. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13238>
- Alissa, E. M., & Ferns, G. A. (2017). Dietary fruits and vegetables and cardiovascular diseases risk. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(9), 1950-1962. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1040487>
- Allawadhi, P., Khurana, A., Sayed, N., Kumari, P., & Godugu, C. (2018). Isoproterenol-induced cardiac ischemia and fibrosis: Plant-based approaches for intervention. *Phytotherapy Research*, 32(10), 1908-1932. <https://doi.org/10.1002/ptr.6152>
- Baldissera, M. D., Souza, C. F., Grando, T. H., Doleski, P. H., Boligon, A. A., Stefani, L. M., & Monteiro, S. G. (2017). Hypolipidemic effect of β -caryophyllene to treat hyperlipidemic rats. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, 390(2), 215-223. <https://doi.org/10.1007/s00210-016-1326-3>
- Chukwuebuka, N. B., Elias, D. T. M., Ijogo, A. E., Peggy, O. E., Ejime, A. C., & Omeru, O. (2021). Changes in antioxidant enzymes activities and lipid peroxidase level in tissues of stress-induced rats. *Biomedical and Pharmacology Journal*, 14(2), 583-596. <https://dx.doi.org/10.13005/bpj/2161>
- Colletti, A., Li, S., Marengo, M., Adinolfi, S., & Cravotto, G. (2021). Recent advances and insights into bromelain processing, pharmacokinetics and therapeutic uses. *Applied Sciences*, 11(18), 8428. <https://doi.org/10.3390/app11188428>
- Çakmak, Ö. (2020). *The effects of boric acid on renal ischemia/reperfusion injury in rat*. (MSc), Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- deSousa, J. A., Pereira, P., Allgayer, M. D. C., Marroni, N. P., de Barros Falcão Ferraz, A., & Picada, J. N. (2017). Evaluation of DNA damage in Wistar rat tissues with hyperlipidemia induced by tyloxapol. *Experimental and Molecular Pathology*, 103(1), 51-55. <https://doi.org/10.1016/j.yexmp.2017.06.009>
- Dudhipala, N. R., Ettireddy, S. R., & Puchakayala, G. R. (2021). Attenuation of lipid levels in triton induced hyperlipidemia rats through rosuvastatin calcium nanoparticles: Pharmacokinetic and pharmacodynamic studies. *Chemistry and Physics of Lipids*, 237, 105081. <https://doi.org/10.1016/j.chemphyslip.2021.105081>
- El-Demerdash, F. M., Baghdadi, H. H., Ghanem, N. F., & Al Mhanna, A. B. (2020). Nephroprotective role of bromelain against oxidative injury induced by aluminum in rats. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 80, 103509. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103509>
- Feng, Y., Gao, S., Zhu, T., Sun, G., Zhang, P., Huang, Y., Qu, S., Du, X., & Mou, D. (2022). Hawthorn fruit acid consumption attenuate hyperlipidemia-associated oxidative damage in rats. *Frontiers in Nutrition*, 9, 936229. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.936229>
- Fidèle, N., Joseph, B., Emmanuel, T., & Théophile, D. (2017). Hypolipidemic, antioxidant and anti-atherosclerogenic effect of aqueous extract leaves of *Cassia. Occidentalis* Linn (Caesalpiniaceae) in diet-induced hypercholesterolemic rats. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 17(1), 76. <https://doi.org/10.1186/s12906-017-1566-x>
- Gai, Z., Wang, T., Visentin, M., Kullak-Ublick, G. A., Fu, X., & Wang, Z. (2019). Lipid accumulation and chronic kidney disease. *Nutrients*, 11(4), 722. <https://doi.org/10.3390/nu11040722>
- Gara, A. B., Kolsi, R. B. A., Chaaben, R., Hammami, N., Kammoun, M., Patti, F. P., ... & Belghith, K. (2017). Inhibition of key digestive enzymes related to hyperlipidemia and protection of liver-kidney functions by *Cystoseira crinita* sulphated polysaccharide in high-fat diet-fed rats. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 85, 517-526. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2016.11.059>
- Gaschler, M. M., & Stockwell, B. R. (2017). Lipid peroxidation in cell death. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 482(3), 419-425. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.10.086>

- Gürel, A., & Kaya, K. (2022). Bromelain has antioxidant effect on methotrexate hepatotoxicity and nephrotoxicity. *Van Sağlık Bilimleri Dergisi*, 15(1), 37-42. <https://doi.org/10.52976/vansaglik.982411>
- Hikisz, P., & Bernasinska-Slomczewska, J. (2021). Beneficial properties of Bromelain. *Nutrients*, 13(12), 4313. <https://doi.org/10.3390/nu13124313>
- Husain, M. J., Spencer, G., Nugent, R., Kostova, D., & Richter, P. (2022). The cost-effectiveness of hyperlipidemia medication in low- and middle-income countries: a review. *Global Heart*, 17(1), 18. <https://doi.org/10.5334/gh.1097>
- Iyer, D., & Patil, U. K. (2019). Assessment of Antihyperlipidemic and Antitumor effect of isolated active Phytoconstituents from *Apium graveolens* L. through Bioassay-Guided procedures. *Journal of Dietary Supplements*, 16(2), 193-206. <https://doi.org/10.1080/19390211.2018.1448921>
- Kalaiselvi, M., Gomathi, D., Ravikumar, G., Devaki, K., & Uma, C. (2013). Ameliorative effect of Ananus comosus peel on 7, 12 dimethylbenz (α) anthracene induced mammary carcinogenesis with reference to oxidative stress. *Journal of Acute Disease*, 2(1), 22-28. [https://doi.org/10.1016/S2221-6189\(13\)60089-X](https://doi.org/10.1016/S2221-6189(13)60089-X)
- Karale, P., Dhawale, S., & Karale, M. (2022). HR-LCMS analysis and Antihyperlipidemic effect of Ethanolic Leaf extract of *Momordica charantia* L. *Hacettepe University Journal of the Faculty of Pharmacy*, 42(2), 93-104. <https://doi.org/10.52794/hujpharm.1063583>
- Li, Y., Gong, W., Liu, J., Chen, X., Suo, Y., Yang, H., & Gao, X. (2022). Angiotensin-like protein 4 promotes hyperlipidemia-induced renal injury by down-regulating the expression of ACTN4. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 595, 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2022.01.061>
- Liu, Y., Sun, Y., Xue, B. H., Wang, X. D., & Yu, W. L. (2021). Negative regulation of SIRT1 by IRF9 involved in Hyperlipidemia acute Pancreatitis associated with Kidney injury. *Digestive Diseases and Sciences*, 66(4), 1063-1071. <https://doi.org/10.1007/s10620-020-06331-1>
- Manzoni, A. G., Passos, D. F., Leitemperger, J. W., Storck, T. R., Doleski, P. H., Jantsch, M. H., ... & Leal, D. B. (2020). Hyperlipidemia-induced lipotoxicity and immune activation in rats are prevented by curcumin and rutin. *International Immunopharmacology*, 81, 106217. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2020.106217>
- Nwozo, S. O., Lewis, Y. T., & Oyinloye, B. E. (2017). The effects of *Piper Guineense* versus *Sesamum Indicum* Aqueous extracts on Lipid metabolism and antioxidants in hypercholesterolemic rats. *Iranian Journal of Medical Sciences*, 42(5), 449-456.
- Palabiyik, E., Sulumer, A. N., Uguz, H., Avci, B., Askin, S., & Askin, H. (2023). Walnut fruit diaphragm ethanol extract ameliorates damage due to Triton WR-1339-induced hyperlipidemia in rats. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2300105. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202300105>
- Parwin, A., Najmi, A. K., Ismail, M. V., Kaundal, M., & Akhtar, M. (2019). Protective effects of alendronate in Triton X-100-induced hyperlipidemia in rats. *The Turkish Journal of Gastroenterology*, 30(6), 557-564. <https://doi.org/10.5152/tjg.2019.18076>
- Singh, R. P., & Pattnaik, A. K. (2024). Scientific insights into Hyperlipidemia Mitigation: a profound examination of isolated bioactive fractions of *Kalanchoe pinnata* (Lam.) leaves and their therapeutic implications using In Vitro, In Vivo, and In Silico study from the characterized compounds using HPTLC MS/MSn analysis. *Pharmacognosy Magazine*, (online first). <https://doi.org/10.1177/09731296241228925>
- Sulumer, A. N., Palabiyik, E., Avci, B., Uguz, H., Demir, Y., Serhat Özaslan, M., & Aşkın, H. (2023). Protective effect of bromelain on some metabolic enzyme activities in tyloxapol-induced hyperlipidemic rats. *Biotechnology and Applied Biochemistry*. <https://doi.org/10.1002/bab.2517>
- Toth, P. P., & Banach, M. (2019). Statins: then and now. *Methodist DeBakey cardiovascular journal*, 15(1), 23-31. <https://doi.org/10.14797/mdcj-15-1-23>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Türkiye İçin Yeni Bir Yonca Kaydı: *Trifolium alexandrinum* var. *serotinum*

Mustafa KESKİN^{*1}, Mehmet ÇELİK²

¹Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Programı, 34730, Kadıköy, Türkiye

²Alibekirli Mah. 23 Sokak no:35 Merkez-Osmaniye, 80020, Osmaniye, Türkiye

Mustafa KESKİN, ORCID No: 0000-0003-2454-1891, Mehmet ÇELİK, ORCID No: 0000-0003-0827-0796

*Sorumlu yazar e-posta: trifolium@hotmail.com

Makale Bilgileri

Geliş: 18.11.2023

Kabul: 24.04.2024

Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1392718](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1392718)

Anahtar Kelimeler

Trifolium alexandrinum,
Türkiye,
var. *alexandrinum*,
var. *serotinum*,
Yeni kayıt

Öz: *Trifolium alexandrinum* var. *serotinum* taksonu Türkiye'nin güneyinde bulunan Osmaniye ilinden toplanarak varlığı ilk defa rapor edilmektedir. *Trifolium alexandrinum* var. *alexandrinum* taksonu dar ve dağınık bir yayılışa sahip olup Ankara, İstanbul, İzmir, Konya, Mersin ve Şanlıurfa'dan bilinmektedir. Yeni kayıt olan var. *Serotinum* taksonunun sahip olduğu karakterler detaylıca belirtilmiş, ana varyeteden ayrıldığı noktalar bir anahtar üzerinde gösterilmiş ve türlerin dağılımları bir harita üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca bu taksona özgü yeni bilimsel Türkçe ad atanmıştır.

A New Clover Record for Türkiye: *Trifolium alexandrinum* var. *serotinum*

Article Info

Received: 18.11.2023

Accepted: 24.04.2024

Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1392718](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1392718)

Keywords

New record,
Trifolium alexandrinum,
Türkiye,
var. *alexandrinum*,
var. *serotinum*

Abstract: The taxon *Trifolium alexandrinum* var. *serotinum* was collected from Osmaniye province in southern Türkiye and its existence is reported for the first time in this paper. The species *Trifolium alexandrinum* to which this variety belongs has a narrow and scattered distribution and is known from Ankara, İstanbul, İzmir, Konya, Mersin and Şanlıurfa. The characteristics of var. *serotinum* are indicated in detail, the points where it differs from the main variety are shown on a key, and the distribution of the species is displayed on a map. In addition, a new scientific Turkish name specific to this taxon has been assigned.

1. Giriş

Trifolium alexandrinum (Sirek) türü çok geniş alanlarda ekimi yapılan bir türdür. Özellikle soğuğa ve verimsiz koşullara adaptasyonu sebebiyle bu türün önemi gün geçtikçe artmaktadır (Agarwal ve ark., 2013). Üzerinde çok çalışılması ve belirtilen önemi nedeniyle günümüzde fazla sayıda kültürvar çeşidi bulunmaktadır. Sirek yoncası, dünya çapında mahsul üretim sistemlerinde bir yem bitkisi olarak uygunluğunu kanıtlamıştır. Yetiştirilmesi kolaydır, yüksek kalitede bol miktarda yem sağlar ve önemli

ölçüde azotu sabitleyerek toprağı iyileştirir (Muhammad ve ark., 2014). Bu türün gelecekte çok daha önem kazanacağı vurgulanmaktadır. Ayrıca bu türün anavatanı olduğuna inanılan Mısır'da iyi bir gelir getirici ihraç materyalidir (Bakheit, 2013).

Dünyanın çeşitli yörelerinde yetişen ve büyüme hızları, bir mevsimdeki kesim sayısı, bitki boyu ve gerekli sulama miktarı ve bakım yöntemleri bakımından farklılık gösteren dört farklı tarım çeşidi olduğu belirtilmiştir: *Miskawi, Khadrawi, Saidi ve Fahl* (Kennedy & Mackie, 1925).

Dünya genelinde ekimi yapılan bir tür olduğu için günümüzde bu türün yabancı olarak yetişen atasının gerçekte halen bulunup bulunmadığı aslında bir soru işareti oluşturmaktadır.

Doğal yetişen Sirek yoncası hakkında çeşitli sistematik anlayışlar da bulunmaktadır (Hossain, 1961; Zohary, 1970; Zohary & Heller, 1984). Bunun yanı sıra *T. alexandrinum* türü ve onun yakın akrabaları ile arasındaki ilişkiler ve günümüzdeki kültür örneklerinin kökenleri hakkındaki akrabalık durumları çeşitli araştırmacılar tarafından çalışılmıştır. Oppenheimer (1959) *Trifolium alexandrinum* ve onun yakın akraba türleri ile karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Benzer bir çalışma Katznelson (1969) tarafından yayınlanmıştır. Putiyevsky & Katznelson (1970; 1973; 1974) tarafından yayınlanan bir seri makalede *T. alexandrinum* ve akraba türlerin gerek kromozom özelliklerini, gerekse genetik yapılarını ortaya koyan makaleler yayınlamışlardır. Ayrıca yakın türler arasındaki hibritleşme özelliklerini de çalışmışlardır. Katznelson & Putiyevsk (1974) benzer olarak *T. alexandrinum* türünün dahil olduğu *Echinata* grubu türleri üzerinde sitogenetik incelemeler yapmışlardır. Putiyevsky ve ark. (1975) *T. alexandrinum* ve ilgili türler ile kromozom sayıları ve genetik ilişkileri hakkında bir makale yayınlamışlardır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmaya konu olan örnekler Osmaniye ilinden, yurttaş bilgin olan ikinci yazarın yapmış olduğu arazi gezileri sırasında toplanmıştır. Örnekler binoküler altında detaylı incelenmiş, fotoğraflanmış ve ilgili makaleler incelendikten sonra toplanan yonca türü, *Trifolium alexandrinum* L. var. *serotinum* Zohary & Lern olarak isimlendirilmiştir. Daha evvel çalışılan türün diğer örnekleri ile karşılaştırılmıştır.

3. Bulgular

3.1. *Trifolium alexandrinum* L., Cent. Pl. I. 25 (1755).

Tek yıllık. Gövde basit ya da çok dallanmış; üzeri az tüylü, yayılmış. Üst yapraklar karşılıklı. Yaprakçıklar genellikle 30 x 7 mm kadar, yatık tüylü, eliptik, eliptik ile dikdörtgenimsi, uç kısmı kısa mukrolu, sapa yakın kısımları genellikle ince dişli. Çiçekli başlar saplı, yapraktan uzun veya biraz kısa ve farklı boyda birkaç bırakteden oluşan bir involukur mevcut ya da bazen yok. Taç yapraklar 8-12 mm, genellikle krem renkli, çanak uzun. Çanak dişleri farklı boyda, 7 mm, yayılmış ince uzun tüylü, tüpten kısa ya da hemen hemen tüpe eşit boyda; dişler özellikle taban kısımda belirgin olarak 3-5 damarlı, uç kısımda sivri; tüp 10-damarlı, tüylerin dip kısmı tüberküllü, yayılmış tüylü; meyveli çanak şişemsi (urseolat), ters konik, tüylü. Taç yapraklar meyvedeyken dökülür. Pod 3 mm, tüp içinde kalıcı, 1 mm gagalı. Tek tohumlu 2 mm, kırmızımsı kahverengi.

3.2. Varyete ayırım anahtarı

1. Bitki genellikle tek gövdeli ya da sadece birkaç gövdeli; gövde içi dolu, 1-2 mm eninde; çiçekler birkatesiz
var. *alexandrinum*
2. Bitki çok gövdeli; gövdenin içi boş ve 3-5 mm eninde; çiçekler genellikle kısaca birkateli bazen birkatesiz
var. *serotinum*

3.3. *Trifolium alexandrinum* L. var. *alexandrinum* / Sirek

Gövde genellikle tabandan itibaren dallanma yapmaz. Gövde en fazla 2 mm kalınlığında, içi dolu. Çiçek durumunda birkate bulunmaz. Uzun çanak dişleri diğerlerinden az uzun. Meyveli başlar dikdörtgenimsi-yumurtamsı, çanak dişleri batıcı değil.

Bu takson sıklıkla ekimi yapılan bir tür olması sebebiyle Türkiye’de dağınık bir yaşam alanına sahiptir (Şekil 2).

3.4. var. *alexandrinum* taksonunun incelenen örnekleri

- İsrail: Jaffa, kültürden kaçmış, 1-20 m, 30 iv 1909, F.S. Meyers ve J.E.Dinsmore (G!).
Lokalitesiz: 13 v 1866, M.Blanche (G-BOISS 00783059!).
Lübnan: v 1852, H. Pabot (G!).
Mısır: i-iii 1846, Boissier (G-BOISS 00783063!).
Mısır: 03 v 1866, C. Gaillardot 159 (G-BOISS 00783062!).
Mısır: 1842, (G-BOISS 00783061!).
Mısır: İsmailiya’nın 6 km güneyi, Port Said yolu kenarı, sulanan alanlar, 30° 23’ D ve 30° 42’ K, 06 v 1991, D. Poclech 50186 (G!).
Mısır: Kahire, kültür, 28 i 1835, A.Wiest (G-BOISS 00783060!).
Suriye: Beyrut, 06 v 1853, M. Blanche 580 (G-BOISS 00783064!).
Suriye: Golan, Har Shipon, volkanik küllerde, 740 m, 04 iv 1989, A. Danin ve ark. (G!).
Türkiye: Ankara, Bahçe, kültür, tarihsiz, H.Bağda (ANK 1524!).
Türkiye: İstanbul, Adalar, Heybeliada, 21 v 1946, M.Başarman (ISTF 39516!).
Türkiye: İstanbul, Merkez, tarihsiz, Lady Liston (E00338656! ve E00027632!).
Türkiye: İstanbul, Merkez, vi 1946, M.Başarman (ISTF 39517!).
Türkiye: İzmir, Karaburun sahil yolu, M.A.Öner ve ark. (ISTE 47565!).
Türkiye: Konya, Seydişehir, Kuğulu bataklığı kenarı çayırılık, 1140 m, 21 vii 1982, H.Ocakverdi (ANK 1625!).
Türkiye: Mersin, Tarsus, Tarsus’un 10 km GD, 20 m, 18 v 1956, A.Huber-Morath 14672 (G!).
Türkiye: Şanlıurfa, Birecik, 1843, M. Kotschy 78 (G-BOISS 00783073!).

3.5. *Trifolium alexandrinum* L. var. *serotinum* Zohary & Lerner, Fl. Palaestina 2: 457 (1972).

Tip: Palaestine, Lower Galilee, env. of Meskha, about 1.5 km west of settlement, field border, alluvial basalt soil, 10 iii 1963, Zohary 2104/9 (HUI).

Eş ad: *T. alexandrinum* subsp. *serotinum* (Zohary & Lerner) P.Silva, Agron. Lusit. 35(4): 299 (1974).

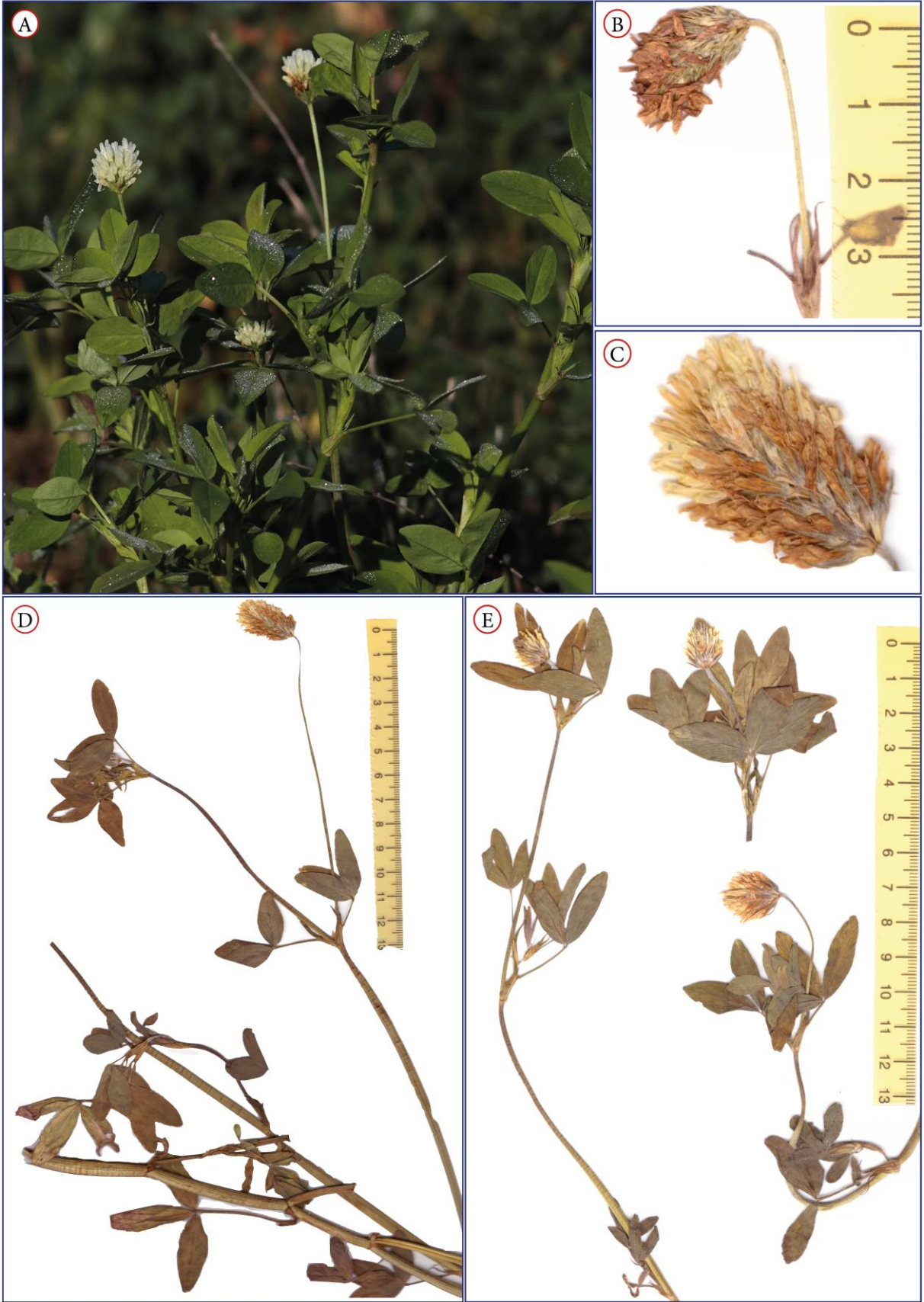
Tabandan itibaren çok sayıda dallanma yapar. Gövde 3-5 mm kalınlığında ve içi boş. Çiçek durumunun altındaki çiçekler beyaz, ince-zarımsı yapıda bırıkteli ya da bazen değil. Uzun çanak dışi diğerlerinden belirgin uzun. Meyveli başlar konik, çanak dişleri sertleşmiş ve batıcı.

Bu takson Türkiye için yeni kayıttır (Şekil 1-2). Tespit edilen Türkçe bir ada sahip olmayışı sebebiyle ona “tez yonca” (yeni Türkçe bilimsel ad) adının verilmesi uygun görülmüştür (Menemen ve ark., 2021).

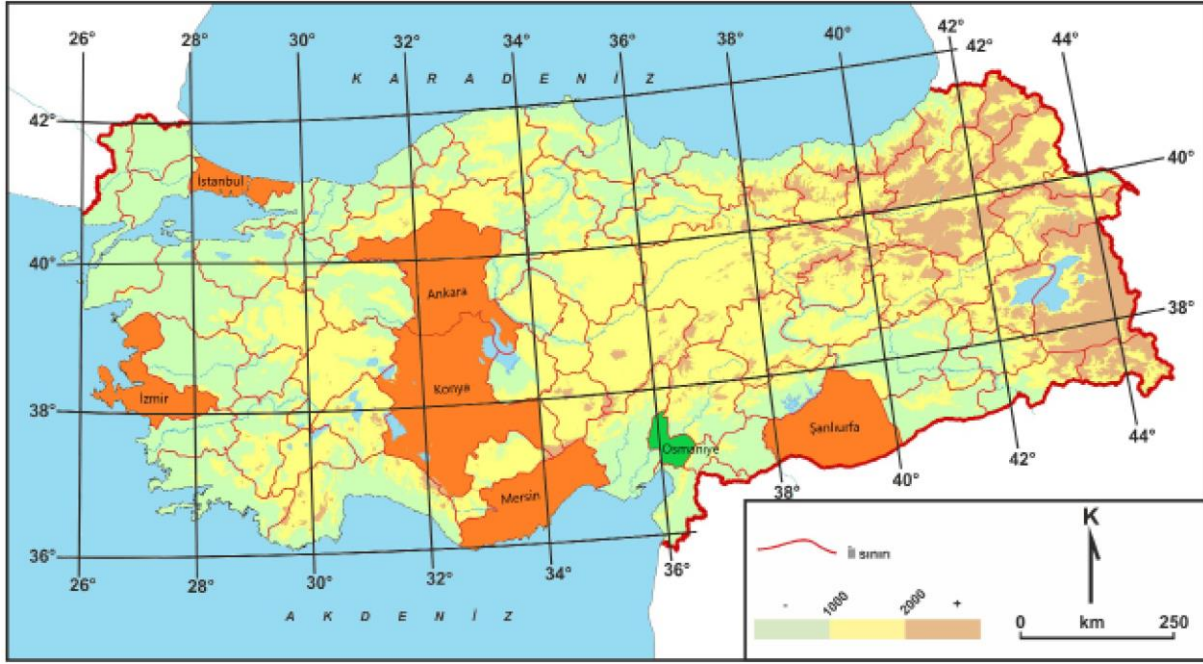
3.6. var. *serotinum* taksonunun incelenen örnekleri

Türkiye: Osmaniye, Merkez, Kastabala, Değirmen ocağı mevkii, 37°10'21.61"K, 36°07'14.75"D, 04 ii 2018, M.Çelik, (M.Keskin 8234) (NGBB!).

İsrail: Esdraelon ovası, Ein Harod–Moledeth yolu, yol kenarı, 05 v 1962, M.Zohary (G 26007!).



Şekil 1. *Trifolium alexandrinum* var. *serotinum*: A. Genel görünüm B. Yarı olgun çiçek durumu ve pedankıl C. Çiçek durumu D. Olgun bitkiden herbarium örneği E. Tomurcuk ve genç bitkiden herbarium örneği.



Şekil 2. *Trifolium alexandrinum* türünün Türkiye’deki dağılımı: var. *alexandrinum* (turuncu) ve var. *serotinum* (yeşil).

4. Tartışma ve Sonuç

Trifolium alexandrinum türü, uzun boylu, zor şartlara dayanıklı bir yonca türüdür. Çok sayıda kültürvar çeşidi bulunmakta olup iyi ve oldukça verimli bir yem bitkisidir. Ana vatanı Mısır olup günümüzde dünyanın pekçok yerine dağılmış durumdadır (Badr ve ark., 2008).

Türkiye’de daha önce sadece kendi ana taksonu bilinmekteydi (Zohary, 1970; Keskin, 2012). Bu çalışmada Osmaniye ilinden toplanan bir örneğin ilgili kaynaklar ışığında teşhisi yapıldığında bu örneğin adının *Trifolium alexandrinum* var. *serotinum* olduğu anlaşılmıştır (Zohary & Heller, 1984). Bu varyetenin de Türkiye florası için yeni bir takson olduğu bu çalışmada rapor edilmektedir.

Bu kayıt ile birlikte Türkiye’de *Trifolium alexandrinum* türüne ait iki varyete yetiştiği saptanmış olup bunlar sahip oldukları karakterler ile kolayca birbirlerinden ayrılabilirlerdir.

Son söz olarak bu varyetenin Osmaniye ve çevresinde daha yaygın olabileceğine inanmaktayız zira “1875 Yılında Adana, Mersin, Osmaniye, Maraş, Konya ve Karaman’a Seyahat” adlı bir kitapta makalede rapor edilen örneğin toplandığı Kastabala alanından ve onun 6-7 km güneybatısında yeralan Toprakkale alanının anlatıldığı kısımda şu ifadeler geçmektedir: “Yaklaşık iki saat kadar atların dizlerine kadar gelen dönümlerce yonca bulunan ve doğada kendiliğinden büyüyen sık bitkilerle dolu bir vadiden geçtik.” (Davis, 2022). Bu tarihi notlardan yola çıkarak, burada bahsedilen yonca türünün bu makalede rapor edilen *Trifolium alexandrinum* var. *serotinum* olabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

İlk yazar tarafından, Resimli Türkiye Florası için yapılan *Trifolium* revizyonu sırasında örneklerini inceleyebilmem için izin veren E, G, NGBB, ANK, ISTF ve ISTE herbaryum yöneticilerine ayrıca bu geziler için maddi destek sağlayan Nezahat Gökyiğit Botanik Vakfı’na çok teşekkür ederim.

Kaynakça

Agarwal, S., Ahmad, Z., & Deshwal, V. K. (2013). Comparative study of berseem cultivars (*Trifolium alexandrinum* L.) in support of nodulation and leg haemoglobin content under saline conditions. *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology*, 4(2), 227-234.

- Badr, A., El-Shazly, H. H., & Watson, L. E. (2008). Origin and ancestry of Egyptian clover (*Trifolium alexandrinum* L.) as revealed by AFLP markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 55, 21-31. <https://doi.org/10.1007/s10722-007-9210-0>
- Bakheit, B. R. (2013). Egyptian clover (*Trifolium alexandrinum* L.) breeding in Egypt: A review. *Asian Journal of Crop Science*, 5(4), 325-337. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2013.325.337>
- Davis, E. J. (2022). *Asyatik Türkiye'de yaşam: 1875 yılında Adana, Mersin, Osmaniye, Maraş, Konya ve Karaman'a seyahat*. (Tercüme: S. H. Uygur ve H. Yaman). Akademisyen Kitapevi.
- Hossain, M. (1961). A revision of *Trifolium* in the nearer east. *Notes Royal Botanic Garden Edinburgh* 23, 387-481.
- Katznelson, J. (1969). Population studies and selection in berseem clover (*Trifolium alexandrinum* L.) and the closely related taxa. 3rd An. Rep. to the USDA, Project At0-CR-56.
- Katznelson, J., & Putiyevsky, E. (1974). Cytogenetic studies in *Trifolium* spp. related to berseem. II. Relationships within the *echinata* group. *Theoretical and Applied Genetics*, 44, 87-94. <https://doi.org/10.1007/BF00277959>
- Kennedy, P. B., & Mackie, W. W. (1925). *Berseem or egyptian clover (Trifolium alexandrinum): A Preliminary report*. University of California College of Agriculture, Agricultural Experiment Station Berkeley, California. Bulletin, 389. <https://ia801401.us.archive.org/20/items/berseemoregyptia389kenn/berseemoregyptia389kenn.pdf>
- Keskin, M. (2012). *Trifolium* L.. In A. Güner, S. Aslan, T. Ekim, M. Vural, & M. T. Babaç (Eds.), *Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler)* (pp. 488-498). Nezahat Gökyiğit Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Yayını, İstanbul.
- Menemen, Y., Aytaç, Z., & Kandemir, A. (2021). Türkçe bilimsel bitki, mantar, suyunu ve bakteri adları yönergesi. *Bağbahçe Bilim Dergisi*, 8(3), 188-195.
- Muhammad, D., Misri, B., El-Nahrawy, M., Khan, S., & Serkan, A. (2014). Berseem Cultivation. In D. Muhammad, B. Misri, M. El-Nahrawy, S. Khan, & A. Serkan (Eds.), *Egyptian Clover (Trifolium alexandrinum), King of Forage Crops* (pp. 25-27). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Regional Office for the Near East and North Africa, Cairo.
- Oppenheimer, H. R. (1959). The origin of Egyptian clover with critical revision of some closely related species. *Bulletin of the Research Council of Israel*, 7D, 202-221.
- Putiyevsky, E., & Katznelson, J. (1970). Chromosome number and genetic system in several *Trifolium* species related to *T. alexandrinum*. *Chromosoma*, 30, 476-482. <https://doi.org/10.1007/BF00321142>
- Putiyevsky, E., & Katznelson, J. (1973). Cytogenetic studies in *Trifolium* ssp. related to berseem. I. Intra- and interspecific hybrid seed formation. *Theoretical and Applied Genetics*, 43, 351-358. <https://doi.org/10.1007/BF00278172>
- Putiyevsky, E., & Katznelson, J. (1974). Cytogenetic studies in *Trifolium* spp. related to berseem. III. The relationships between the *T. scutatum*, *T. plebeium* and the *echinata* groups. *Theoretical and Applied Genetics*, 44, 184-190. <https://doi.org/10.1007/BF00277018>
- Putiyevsky, E., Katznelson, J., & Zohary, D. (1975). Cytogenetic studies of *Trifolium* spp. related to berseem. IV: The relationships in the *alexandrinum* and *vavillovi* crossability groups, and the origin of the cultivated berseem. *Theoretical and Applied Genetics*, 45, 355-362. <https://doi.org/10.1007/BF00277676>
- Zohary, M. (1970) *Trifolium* L. In P. H. Davis (Ed.) *Flora of Turkey and the east Aegean Islands* vol.3 (pp. 384-448). Edinburgh University Press.
- Zohary, M., & Heller, D. (1984). *The Genus Trifolium*, 1st ed. Israel Academy of Sciences and Humanities, Jerusalem, Israel.



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Antalya'daki Keçi ve Koyunların İşkembe Siliyat (Ciliophora, Trichostomatia) Faunası ve İşkembe Siliyatlarının Filogenisi

Gözde GÜRELLİ^{*1}, Nuray YÜRÜCÜOĞLU²

¹Kastamonu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 37150, Kastamonu, Türkiye

²Ali Fuat Darende İlkokulu, 37150, Kastamonu, Türkiye

Gözde GÜRELLİ, ORCID No: 0000-0001-7233-9060,

Nuray YÜRÜCÜOĞLU, ORCID No: 0009-0002-5530-6659

*Sorumlu yazar e-posta: ggurelli@kastamonu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 25.03.2024

Kabul: 07.06.2024

Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1458622](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1458622)

Anahtar Kelimeler

Antalya,
Filogeni,
İşkembe,
Keçi,
Koyun,
Trichostomatia

Öz: Bu çalışmada Antalya'daki keçi (*Capra aegagrus hircus*) ve koyunların (*Ovis aries*) işkembe siliyat faunası tespit edilmiş ve GenBank'tan elde edilen 68 işkembe siliyatına ait 18S rDNA gen dizileri kullanılarak filogenetik analizler yapılmıştır. Antalya'daki 6 keçi ve 11 koyunun işkembesindeki ortalama siliyat yoğunluğu sırasıyla, 124.0×10^4 hücre mL^{-1} ve 46.3×10^4 hücre mL^{-1} 'dir. Keçide 8 cins, 15 tür ve 6 morfortip, koyunda 8 cins, 19 tür ve 7 morfortip teşhis edilmiştir. *Entodinium simulans* %100 yaygınlıkla tüm keçilerde, *Metadinium affine* ve *Entodinium bursa* ise %16.7 yaygınlıkla tek bir keçiden gözlemlenmiştir. Koyunlarda *Entodinium simulans* %81.8 yaygınlıkla incelenen 11 koyunun 10'unda, *Enoploplastron trilorricatum*, *Entodinium dilobum*, *E. longinucleatum*, *E. rectangulatum*, *E. simplex*, *E. simulans* m. lobosospinosum ise %9.1 yaygınlıkla tek bir koyundan tespit edilmiştir. Keçi ve koyunların işkembe siliyat faunası genelde *Entodinium* spp.'den meydana gelmektedir (keçiler için ortalama nispi bolluk %88.7, koyunlar için ortalama nispi bolluk %52.2). Filogenetik analizlere göre Ophryoscolecidae ailesi içinde Ophryoscolecinae, Entodiniinae ve Diplodiniinae alt-aileleri monofiletik orijine sahiptirler. *Isotricha*, *Dasytricha*, *Ophryoscolex*, *Epidinium*, *Entodinium*, *Diplodinium* ve *Ostracodinium* cinsleri de monofiletik kökenlidir.

Rumen Ciliate (Ciliophora, Trichostomatia) Fauna of Goats and Sheep in Antalya, and Phylogeny of Rumen Ciliates

Article Info

Received: 25.03.2024

Accepted: 07.06.2024

Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1458622](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1458622)

Keywords

Antalya,
Goat,
Phylogeny,
Rumen,
Sheep,
Trichostomatia

Abstract: In this study, the rumen ciliate fauna of goats (*Capra aegagrus hircus*) and sheep (*Ovis aries*) in Antalya was detected, and phylogenetic analyses were performed using 18S rDNA gene sequences of 68 rumen ciliates obtained from GenBank. The average ciliate density in the rumen of 6 goats and 11 sheep in Antalya was 124.0×10^4 cells mL^{-1} and 46.3×10^4 cells mL^{-1} , respectively. Eight genera, 15 species, and 6 morphotypes have been identified in goats, and 8 genera, 19 species, and 7 morphotypes in sheep. *Entodinium simulans* was observed in all goats with a prevalence of 100%, while *Metadinium affine* and *Entodinium bursa* were identified in a single goat with a prevalence of 16.7%. *Entodinium simulans* in sheep had a prevalence of 81.8%, and in 10 of the 11 sheep examined, *Enoploplastron trilorricatum*, *Entodinium dilobum*, *E. longinucleatum*, *E. rectangulatum*, *E. simplex*, and *E. simulans* m. lobosospinosum were detected in a single sheep with a prevalence of 9.1%. The rumen ciliate fauna of goats and sheep generally consists of *Entodinium* spp. (the average relative abundance for goats is 88.7%, and the average relative abundance for sheep is 52.2%). According to phylogenetic analyses, the Ophryoscolecinae, Entodiniinae, and Diplodiniinae subfamilies within the family Ophryoscolecidae have a monophyletic origin. The genera *Isotricha*, *Dasytricha*, *Ophryoscolex*, *Epidinium*, *Entodinium*, *Diplodinium*, and *Ostracodinium* are also monophyletic.

1. Giriş

İşkembede bulunan protozoonların az bir kısmını kamçılılar, büyük bir çoğunluğunu ise siliyatlar oluşturmaktadır. Sağlıklı hayvanlarda işkembede sayı olarak mililitre başına 10^5 – 10^6 siliyat bulunmaktadır (Ogimoto & Imai, 1981). İşkembede hayvanın sindiremediği selülozu ve nişastayı sindirmeyi sağlayan siliyatlar Litostomatea sınıfına ve Trichostomatia alt-sınıfına dahildirler (Lynn, 2008). Endokommensal olan bu siliyatların mevcudiyeti ilk kez Gruby & Delafond (1843) tarafından tespit edilmiştir. Konakları için patojen olmayan siliyatlar yaşam döngülerinde dayanıklı bir safhaya, yani kistik şekillere sahip değildir. Ayrıca işkembedeki bakterilerle beslendikleri için işkembe ortamında aşırı bakteri çoğalmasını engellemekte, bu sayede konak hayvanın işkembesinde aşırı fermentasyon olayının gerçekleşmesine de engel olmaktadır (Ogimoto & Imai, 1981; Williams & Coleman, 1992). Gün içinde enine ikiye bölünmeyle işkembedeki sayılarını iki katına çıkartmakta ve artan sayı kadarı şirden ve ince bağırsakta sindirilerek azotlu besin olarak konak tarafından kullanılmaktadır (Hungate, 1966). Ergin veya genç geviş getiren konaklara bulaşma, tükürük ile gerçekleşir. Yeni doğduklarında siliyat taşımayan genç geviş getiren hayvanlara işkembe siliyatlarının ilk bulaşması, ya anneleri tarafından yalandıklarında veya ruminasyonla çıkarılan ve protozoon içeren tükürükle bulaşmış besinlerin genç hayvan tarafından yenmesi ile olmaktadır (Dehority, 1986; Göçmen & Özbel, 2001; Moon-van der Staay ve ark., 2014; Vd'ačný, 2018). İşkembe siliyat içeriğinin konakların dağılım alanları ve filogenetik faktörler ile kontrol edildiği Dogiel (1947) tarafından rapor edilmiştir. Tür içeriğinin ayrıca, konakların beslenme habitatları, besin tipi ve miktarı ile de değiştiği bildirilmiştir (Dehority, 1978). Konağın fizyolojik durumu da faunanın oluşmasını sağlayan bir başka faktördür (Ogimoto & Imai, 1981). Son olarak da işkembe siliyatlarının bazı türleri arasında bulunduğu bildirilen antagonizm, fauna içeriğini belirleyen bir başka etken olarak rapor edilmiştir (Eadie, 1957; Imai ve ark., 1978; Gürelli & Mohamed, 2021).

Trichostomatia alt-sınıfına dahil olan işkembe siliyatları Vestibuliferida ve Entodiniomorphida olmak üzere iki takıma, Entodiniomorphida takımı ise Archistomatina, Blepharocorythina ve Entodiniomorphina olarak 3 alt-takıma ayrılır. Vestibuliferida takımı Isotrichidae ailesini, Archistomatina alt-takımı Buetschliidae ailesini, Blepharocorythina alt-takımı Blepharocorythidae ailesini, Entodiniomorphina alt-takımı Ophryoscolecidae ailesini içerir (Lynn, 2008). Ophryoscolecidae ailesi Entodiniinae, Diplodiniinae ve Ophryoscolecinae olmak üzere 3 alt-aileye ayrılır (Lubinsky, 1957).

Bu çalışmada Antalya'daki keçi (*Capra aegagrus hircus*) ve koyunların (*Ovis aries*) işkembe siliyat (Ciliophora, Trichostomatia) faunasının tespit edilmesi, GenBank'tan elde edilen işkembe siliyatlarına ait 18S rDNA gen dizileri kullanılarak filogenetik analizlerinin yapılması ve bu sayede işkembe siliyatlarının filogenisi hakkında bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. İşkembe örneklerinin toplanması ve siliyatlara uygulanan morfolojik yöntemler

Antalya'da bulunan keçi (*C. aegagrus hircus*) ve koyunların (*O. aries*) işkembe siliyat faunasını tespit etmek için Antalya'daki mezbahalarda kesilen ve o yöreye ait olan 6 keçi ve 11 koyundan Ocak 2018-Temmuz 2018 tarihleri arasında taze işkembe içeriği alınmıştır. İşkembe bir bıçak yardımıyla açılarak, işkembe içeriğinden bir miktar temiz bir kavanoza konulup üzerine %18.5'lik formalin eklenmiştir (Dehority, 1984). Formalin ile tespit edilerek laboratuvara getirilen örnekler, hücre ayrıştırma eleklerinden geçirilerek süzülmüştür. Oluşan süzüntü ağzı kapaklı şişeler içine alınarak depo örnekleri olarak saklanmıştır. Formalin ile tespit edilen depo örneklerden bir miktar küçük tüplere alınarak üzerlerine eşit miktarda MFS (metil yeşili formalin salin) solüsyonu ilave edilerek boyama gerçekleştirilmiştir (Ogimoto & Imai, 1981). MFS solüsyonu ile boyanmış olan örnekler, ışık mikroskobunun çeşitli büyütmelerinde incelenerek siliyat türleri teşhis edilmiş ve her bir konaktaki tür çeşitliliği ortaya çıkarılmıştır. Bazı siliyat türlerindeki iskelet plaklarını gözlemleyebilmek için örnekler %2'lik Lugol'ün iyot solüsyonu ilave edilmiştir. Tür teşhisi yapıldıktan sonra, her bir konaktaki siliyat türlerinin yaygınlığı (Bush ve ark., 1997), nispi bolluğu ve toplam siliyat yoğunluğu hesaplanmıştır (Gürelli, 2017). Siliyat sayımı için Neubauer hemositometresi kullanılmıştır. Sayım işlemi hemositometrenin üzerine 1 damla MFS solüsyonu ile boyanmış örnek konulduktan sonra lamel

kapatılarak mikroskop altında hemositometrenin 4 büyük köşe kare kısmındaki toplam siliyat hücresinin sayılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sayım sonuçları örneğin sulandırma katsayısı ile çarpılarak mililitredeki siliyat sayısı hesaplanmıştır ($N = 10/4 \times a \times d$, N: toplam siliyat yoğunluğu, a: hemositometrenin 4 köşe kare kısmındaki toplam siliyat sayısı, d: sulandırma katsayısı). İşkembe siliyatlarının istatistiksel hesaplanmasında SPSS istatistik programı kullanılmıştır (Gürelli ve ark., 2016; Gürelli & Mohamed, 2021).

Türlerin teşhisinde ve sınıflandırılmasında Dogiel (1927), Ogimoto & Imai (1981), Dehority (1993), Öktem ve ark. (1997) ve Lynn (2008)'in çalışmalarından faydalanılmıştır.

2.2. Filogenetik yöntemler

İç grup olarak 68 işkembe siliyatına ait 18S rDNA gen dizileri ve dış grup olarak *Spathidium papilliferum*'un 18S rDNA gen dizisi GenBank'tan elde edilmiştir. Gen dizilerine ait asession numaraları Şekil 1'de verilmiştir. Siliyatlara ait gen dizileri Mega7 programında Clustal W implement algoritması kullanılarak hizalanmıştır (Kumar ve ark., 2016). Anormal hizalanmış bölgeler Gblocks v.091b programı kullanılarak hizalanmış diziden uzaklaştırılmıştır (Talavera & Castresana, 2007). Maksimum olabilirlik (ML) analizi IQ-Tree web sunucusunda IQ-Tree v.1.6.12 programında yapılmıştır (Nguyen ve ark., 2015; Trifinopoulos ve ark., 2016). ML analizi için en uygun model IQ-Tree programı tarafından belirlenen GTR+F+I+G4 modeli ile 1.000 bootstrap olarak yapılmıştır (Kalyaanamoorthy ve ark., 2017; Hoang ve ark., 2018). Bayesian Çıkarılması (BI) analizi MrBayes v.3.2.7 programı ile GTR+G+I evrimsel modeli kullanılarak yapılmıştır (Ronquist ve ark., 2012). Bayesian çıkarılması 1.000.000 jenerasyon ve her 500 jenerasyonda 1 örnekleme yapılacak şekilde dizayn edilmiştir. Elde edilen filogenetik ağacın ilk ve son %25'lik kısmı yakılarak kalan ağaçlardan konsensüs ağacı oluşturulmuştur. Her iki analiz (ML ve BI) ile oluşturulan filogenetik ağaçlar FigTree v1.4.3 programı ile kontrol edildikten sonra tek bir ağaç (ML ağacı) üzerinde nod değerleri ile birlikte birleştirilmiştir.

3. Bulgular

3.1. İşkembe örneklerindeki siliyat kompozisyonu

Antalya'daki 6 keçi ve 11 koyunun işkembesindeki ortalama siliyat yoğunluğu (\pm standart sapma) sırasıyla, $124.0 \pm 46.1 \times 10^4$ hücre mL^{-1} (minimum-maksimum değer, $136.5-199.0 \times 10^4$ hücre mL^{-1}) ve $46.3 \pm 63.1 \times 10^4$ hücre mL^{-1} (minimum-maksimum değer, $0-157.0 \times 10^4$ hücre mL^{-1})'dir. Bir koyunun (5 no'lu) işkembesinde herhangi bir siliyat türü tespit edilememiştir. Keçi başına düşen tür sayısı 3.0-14.0 (ortalama, 8.5 ± 4.3), koyun başına düşen tür sayısı ise 0-16.0 (ortalama, 5.5 ± 4.9)'dir.

Keçide 8 cins, 15 tür ve 6 morfortip, koyunda 8 cins, 19 tür ve 7 morfortip teşhis edilmiştir. *Entodinium simulans* %100 yaygınlıkla tüm keçilerde, *Metadinium affine* ve *E. bursa* ise %16.7 yaygınlıkla tek bir keçiden gözlemlenmiştir. Koyunlarda *E. simulans* %81.8 yaygınlıkla incelenen 11 koyunun 10'unda, *Enoploplastron triloricaum*, *Entodinium dilobum*, *E. longinucleatum*, *E. rectangulatum*, *E. simplex* ve *E. simulans m. lobosospinosum* ise %9.1 yaygınlıkla tek bir koyundan tespit edilmiştir. Keçi ve koyunların işkembe siliyat faunası genelde *Entodinium spp.*'den meydana gelmektedir (keçiler için ortalama nispi bolluk %88.7, koyunlar için ortalama nispi bolluk %52.2) (Çizelge 1).

3.2. Filogenetik analiz

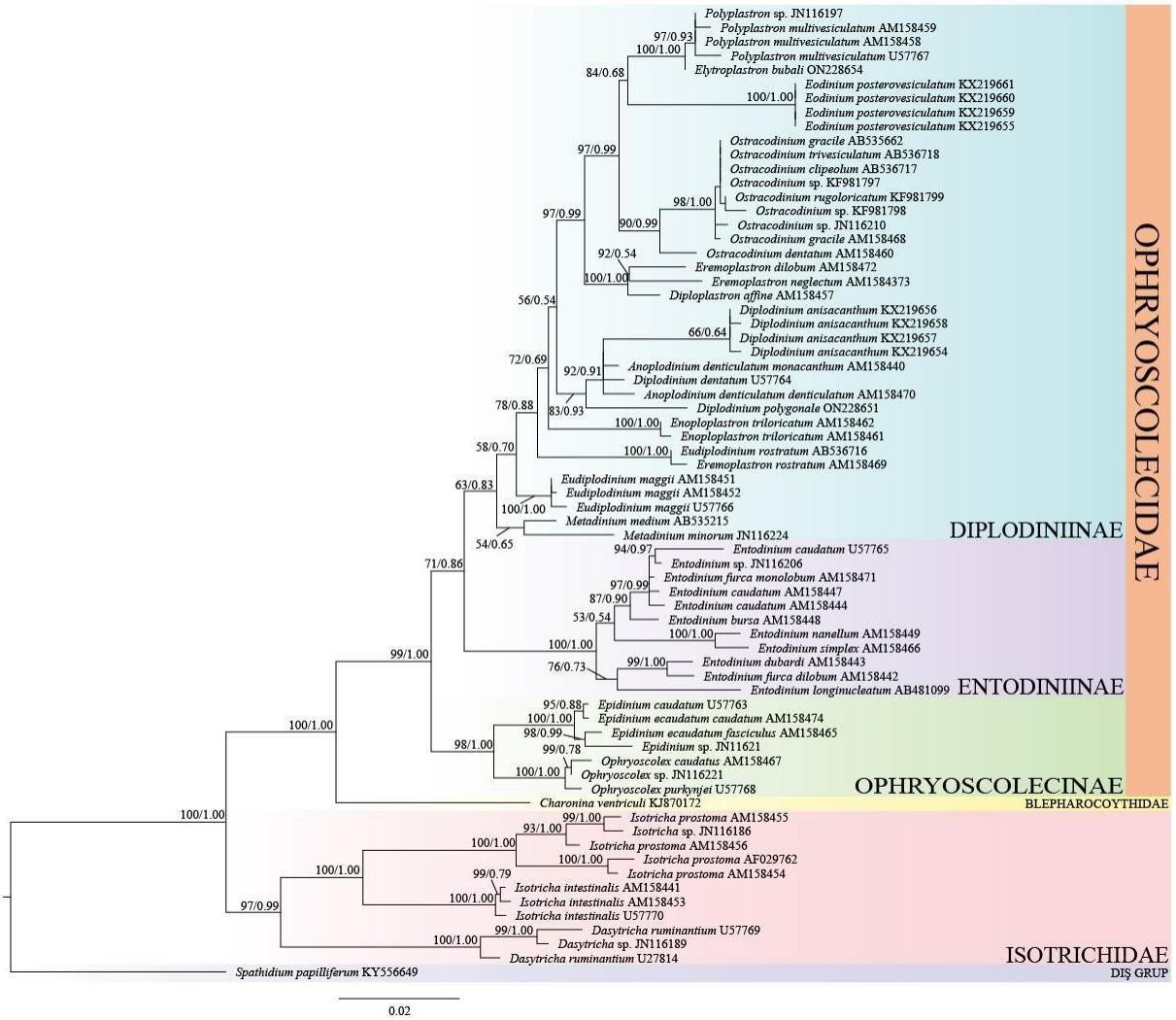
Bu çalışmada 68 işkembe siliyatına ait 18S rDNA gen dizileri ve dış grup olarak *Spathidium papilliferum*'un 18S rDNA gen dizisi kullanılarak Maksimum Olabilirlik (ML) ve Bayesian Çıkarılması (BI) analizleri ile filogenetik ağaçlar oluşturulmuştur. Her iki algoritma ile oluşturulan filogenetik ağaçlar topolojik olarak birbirlerine çok benzer olduklarından analiz sonuçları ML ağacı üzerinde BI düğüm (nod) değerleri gösterilerek verilmiştir (Şekil 1).

Çizelge 1. Antalya'daki 6 keçinin ve 11 koyunun işkembe içeriğindeki siliyatların yaygınlığı ve nispi bolluğu (SD: standart sapma)

Cins/Tür/Morfotip	Keçi		Koyun	
	Yaygınlık (%)	Nispi Bolluk (%) Ortalama ± SD (min.-maks. değer)	Yaygınlık (%)	Nispi Bolluk (%) Ortalama ± SD (min.-maks. değer)
<i>Dasytricha</i> Schuberg, 1888	83.3	3.8 ± 3.1 (0-7.8)	45.5	3.8 ± 6.7 (0-22.6)
<i>D. ruminantium</i> Schuberg, 1888	83.3	3.8 ± 3.1 (0-7.8)	45.5	3.8 ± 6.7 (0-22.6)
<i>Enoploplastron</i> Kofoid & MacLennan, 1932	-	-	9.1	0.2 ± 0.7 (0-2.2)
<i>E. trilorica</i> (Dogiel, 1925)	-	-	9.1	0.2 ± 0.7 (0-2.2)
<i>Entodinium</i> Stein, 1859	100	88.7 ± 6.9 (80.7-99.3)	81.8	52.2 ± 37.4 (0-97.2)
<i>E. bursa</i> Stein, 1858	16.7	0.5 ± 1.3 (0-3.2)	27.3	1.8 ± 4.3 (0-14.4)
<i>E. dilobum</i> (Dogiel, 1927)	50	1.3 ± 1.5 (0-3.0)	9.1	2.0 ± 6.7 (0-22.3)
<i>E. ellipsoideum</i> (Kofoid & MacLennan, 1930)	50	3.4 ± 3.9 (0-8.6)	27.3	3.0 ± 5.5 (0-14.3)
<i>E. exiguum</i> Dogiel, 1925	66.7	11.1 ± 8.8 (0-17.9)	27.3	2.8 ± 5.1 (0-12.9)
<i>E. longinucleatum</i> Dogiel, 1925	83.3	7.9 ± 4.3 (0-11.8)	9.1	0.4 ± 1.4 (0-4.6)
<i>E. minimum</i> Schuberg, 1888	-	-	27.3	5.2 ± 10.7 (0-33.3)
<i>E. nanellum</i> Dogiel, 1923	66.7	12.9 ± 11.6 (0-27.8)	27.3	6.0 ± 10.4 (0-24.4)
<i>E. rectangulatum</i> Kofoid & MacLennan, 1930	-	-	9.1	0.2 ± 0.7 (0-2.1)
<i>m. rectangulatum</i> Kofoid & MacLennan, 1930	-	-	9.1	0.2 ± 0.7 (0-2.1)
<i>E. semahatae</i> Öktem ve ark., 1997	-	-	9.1	0.1 ± 0.3 (0-1.0)
<i>E. simplex</i> (Dogiel, 1925)	-	-	9.1	1.3 ± 4.4 (0-14.5)
<i>E. simulans</i> Lubinsky, 1957	100	50.7 ± 28.6 (17.9-99.3)	81.8	36.0 ± 34.5 (0-85.0)
<i>m. dubardi</i> Lubinsky, 1957	66.7	19.9 ± 17.6 (0-45.6)	54.5	30.7 ± 36.6 (0-85.1)
<i>m. lobosospinosum</i> Lubinsky, 1957	66.7	6.5 ± 6.9 (0-18.3)	9.1	0.4 ± 1.2 (0-4.1)
<i>m. caudatum</i> Lubinsky, 1957	100	24.3 ± 7.0 (17.0-35.4)	36.4	4.9 ± 8.5 (0-25.8)
<i>Epidinium</i> Crawley, 1923	66.7	3.7 ± 5.9 (0-14.3)	45.5	7.3 ± 13.5 (0-44.4)
<i>E. ecaudatum</i> (Fiorentini, 1889)	66.7	3.7 ± 5.9 (0-14.3)	45.5	7.3 ± 13.5 (0-44.4)
<i>m. ecaudatum</i> (Fiorentini, 1889)	50	0.9 ± 1.8 (0-4.6)	45.5	4.7 ± 9.8 (0-33.3)
<i>m. caudatum</i> (Fiorentini, 1889)	66.7	1.4 ± 2.0 (0-4.8)	27.3	2.7 ± 4.7 (0-11.3)
<i>Isotricha</i> Stein, 1858	66.7	1.7 ± 2.0 (0-4.3)	72.7	17.7 ± 23.6 (0-66.7)
<i>I. intestinalis</i> Stein, 1858	66.7	0.5 ± 0.5 (0-1.1)	18.2	2.3 ± 6.4 (0-21.4)
<i>I. prostoma</i> Stein, 1858	50	1.2 ± 1.5 (0-3.2)	72.7	15.4 ± 23.7 (0-66.7)
<i>Metadinium</i> Awerinzew & Mutafova, 1914	16.7	0.2 ± 0.4 (0-1.0)	18.2	1.0 ± 2.0 (0-7.1)
<i>M. affine</i> (Dogiel & Fedorowa, 1925)	16.7	0.2 ± 0.4 (0-1.0)	18.2	1.0 ± 2.0 (0-7.1)
<i>Ophryoscolex</i> Stein, 1858	50	0.5 ± 1.1 (0-2.8)	18.2	0.5 ± 1.2 (0-3.8)
<i>O. caudatus</i> Eberlein, 1895	50	0.5 ± 1.1 (0-2.8)	18.2	0.5 ± 1.2 (0-3.8)
<i>m. tricornatus</i> Dogiel, 1927	50	0.5 ± 1.1 (0-2.8)	18.2	0.5 ± 1.2 (0-3.8)
<i>Polyplastron</i> Dogiel, 1927	50	0.9 ± 1.0 (0-2.1)	27.3	1.1 ± 2.3 (0-7.3)
<i>P. multivesiculatum</i> (Dogiel & Fedorowa, 1923)	50	0.9 ± 1.0 (0-2.1)	27.3	1.1 ± 2.3 (0-7.3)

Filogenetik ağaçlarda, vestibuliferid ve entodiniomorphid siliyatlar iki monofiletik klad oluşturmuş ve bu kladların ayrımı her iki analizde tam desteklenmiştir (ML/BI, %100/1.00). Vestibuliferid siliyatlar *Dasytricha ruminantium* ve *Isotricha* spp. olmak üzere 2 alt kümeye ayrılır (ML/BI, %97/0.99). *Dasytricha ruminantium* kümesi *Isotricha* spp. kümesine bazal olarak bağlanmaktadır. *Isotricha* spp.'den oluşan küme 2 dala ayrılmakta, *Isotricha intestinalis* kümesini oluşturan dal *Isotricha prostoma* kümesini oluşturan dala bazal olarak bağlanmaktadır (ML/BI, %100/1.00). Blepharocorythina alt-takımı ve Blepharocorythidae ailesine dahil *Charonina ventriculi* Entodiniomorphina alt-takımı ve Ophryoscolecidae ailesine dahil işkembe siliyatlarına her iki analiz ile tam desteklenerek bazal olarak bağlanmaktadır (ML/BI, %100/1.00). Ophryoscolecinae alt-ailesi Ophryoscolecidae ailesi içerisinde ve onun kaidesinde monofiletik bir klad oluşturmaktadır. Bu kladın ayrımı ML analizi ile çok güçlü, BI analizi ile tam desteklenmektedir (ML/BI, %99/1.00). Ophryoscolecinae alt-ailesi de *Epidinium* spp. ve *Ophryoscolex* spp. olmak üzere iki küme oluşturmaktadır. *Epidinium* spp. ve *Ophryoscolex* spp. popülasyonlarının oluşturdukları kümeler ML analizi ile çok güçlü, BI analizi ile tam desteklenerek birbirlerinden farklılaşırlar (ML/BI, %98/1.00). Ophryoscolecidae ailesi içinde yer alan Entodiniinae alt-ailesi ve Diplodiniinae alt-ailesi birbirlerinden orta derecede güçlü destek ile farklılaşmış (ML/BI, %71/0.86) ve her iki alt-aile monofiletik bir klad oluşturmuştur. Entodiniinae alt-ailesinde bulunan *Entodinium longinucleatum*, *E. furca dilobum* (sin. *E. dilobum*), *Entodinium dubardi* bir küme oluşturmakta ve bu küme *E. simplex*, *E. nanellum*, *E. bursa*, *Entodinium caudatum*, *E. furca monolobum* (sin. *E. monolobum*), *Entodinium* sp., *E. caudatum*'dan oluşan kümeden her iki analiz ile tam ayrılmaktadır (ML/BI, %100/1.00). Diplodiniinae alt-ailesine

dahil *Metadinium minorum* ve *M. medium* kardeş taksonlar olarak bir küme oluşturmakta ve bu küme *Eudiplodinium maggii* ile birbirlerinden ML analizi ile zayıf, BI analizi ile orta derecede güçlü destek ile farklılaşırlar (ML/BI, %63/0.83). *Eudiplodinium maggii* ve *Eremoplastron rostratum* (sin. *Eudiplodinium rostratum*) birbirlerinden ML analizi ile zayıf, BI analizi ile orta derecede güçlü destek ile ayrılırlar (ML/BI, %58/0.70). *Eudiplodinium rostratum* ve *Enoploplastron triloricastrum* birbirlerinden orta derecede güçlü bir destek ile farklılaşırlar (ML/BI, %78/0.88). *Diplodinium* spp.; *Diplodinium polygonale*, *Anoplodinium denticulatum denticulatum* (sin. *Diplodinium dentatum*), *Diplodinium dentatum*, *Anoplodinium denticulatum monocanthum* (sin. *Diplodinium anisacanthum* m. monocanthum), *Diplodinium anisacanthum* bir küme oluşturmakta ve bu küme, *Diploplastron affine* (sin. *Metadinium affine*), *Eremoplastron neglectum* (sin. *Eudiplodinium neglectum*) ve *Eremoplastron dilobum* (sin. *Eudiplodinium dilobum*)'un oluşturduğu kümeyle birbirlerinden her iki analiz ile zayıf desteklenerek ayrılırlar (ML/BI, %56/0.54). *Ostracodinium* spp.; *Ostracodinium dentatum* (sin. *Ostracodinium mammosum*), *O. gracile*, *Ostracodinium* sp., *O. rugoloricastrum*, *O. clipeolum* ve *O. trivesiculatum* bir küme oluşturmakta ve bu küme *Eodinium postero-vesiculatum*'dan her iki analiz ile çok güçlü desteklenerek birbirlerinden farklılaşırlar (ML/BI, %97/0.99). *Eodinium postero-vesiculatum* ve *Elytroplastron bubali* birbirlerinden ML analizi ile güçlü, BI analizi ile orta derecede güçlü bir destek ile ayrılırlar (ML/BI, %84/0.68). *Elytroplastron bubali* ve *Polyplastron multivesiculatum* her iki analiz ile tam desteklenerek birbirlerinden farklılaşırlar (ML/BI, %100/1.00).



Şekil 1. İşkembe siliyatlarına ait 18SrDNA gen dizilerinin ML ve BI analizlerine dayalı filogenisi. Nod değerleri ML/BI çıkarması sonuçlarını içermektedir. Bar her 100 nükleotidde 2 baz değişimini göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, keçilerden 8 cins, 15 tür ve 6 morfotip, koyunlardan 8 cins, 19 tür ve 7 morfotip tespit edilmiştir. Yeni bir tür veya ülkemizden ilk kayıt tür rapor edilememiştir, gözlemlenen türler daha önce ülkemizdeki keçi ve koyunlardan teşhis edilmiştir (Öktem ve ark., 1997; Göçmen ve ark., 1999; Göçmen ve ark., 2005; Gürelli, 2014; Gürelli, 2017; Berber & Gürelli, 2019).

Antalya'daki keçilerin işkembesinde bulunan ortalama siliyat yoğunluğu ($124.0 \pm 46.1 \times 10^4$ hücre mL^{-1}) İzmir'deki (Gürelli, 2014) ve Türkiye'nin güneydoğusundaki (Göçmen ve ark., 2005) keçilerden daha fazladır. Antalya'daki koyunların işkembesinden tespit edilen ortalama siliyat yoğunluğu ($46.3 \pm 63.1 \times 10^4$ hücre mL^{-1}) İzmir'deki (Öktem ve ark., 1997; Göçmen ve ark., 1999; Gürelli, 2017) ve Kastamonu'daki (Berber & Gürelli, 2019) koyunlardan daha azdır. Siliyat yoğunluk değerlerindeki varyasyon konak hayvanlardan, tükettiği besinin cinsi ve miktarındaki farklılıklardan coğrafi dağılımından veya bu faktörlerin birleşiminden meydana gelebilir (Imai ve ark., 1989; Ito & Imai, 1990; Gürelli, 2016; Gürelli & Mohamed, 2021).

Antalya'daki keçi ve koyunların işkembe içeriğinde *Entodinium* türleri baskın olarak bulunması keçi ve koyunların beslenme alışkanlıklarından kaynaklanmış olabilir. Keçi ve koyunlar ara beslenici (fırsatçı beslenici) hayvanlar olmalarına rağmen, keçiler yaprak, çalı ve ağaç sürgünleriyle, koyunlar ise çoğunlukla ot, çayır ve otsu çiçekli bitkilerle beslenmektedir (Ito ve ark., 1995; Gurung ve ark., 2002; Burrit & Frost, 2006; Cannas & Pulina, 2008). Ara beslenici hayvanların işkembesi *Entodinium* türlerinin gelişmesi için daha uygun çevresel faktörler içerebilir (Ito ve ark., 1993). Eğer konak hayvan yüksek konsantrasyonla beslenirse, *Entodinium* türleri daha hızlı büyümekte ve neticede *Entodinium* türlerinin kompozisyon oranı ve toplam yoğunluğu daha fazla olmaktadır (Hungate, 1966). *Entodinium* türleri için başlıca enerji kaynağı nişastadır (Kurihara ve ark., 1978). Farklı konak hayvanlar tarafından tüketilen besinin seçimi ve miktarı işkembe siliyat faunası üzerinde önemli faktörlerdir (Dehority, 1974; Ito ve ark., 1993). Bunun yanında *Entodinium* türleri bütün geniş getiren hayvanlarda geniş bir dağılıma sahiptir ve bu sebeple işkembedeki baskın türleri oluşturmaktadır (Imai, 1988; Gürelli ve ark., 2016). *E. simulans*'ın keçilerde ve koyunlarda en çok tür (%100 ve %81.8) olarak tespit edilmesinin nedeni, *E. simulans*'ın geniş bir dağılıma sahip olması yada konakların diyetleri olabilir. *Enoploplastron triloricastrum*, *Entodinium minimum*, *E. rectangulatum*, *E. semahatae* ve *E. simplex* koyunlardan teşhis edilmesine rağmen, keçilerden gözlemlenememiştir. Bu durum daha az konak sayısı ile çalışılmasından kaynaklanmış olabilir. Antalya'daki koyunlarda kaudal ışınsız *E. simulans* morfotipinin daha fazla bulunmasına rağmen, keçilerde ise kaudal ışınlı *E. simulans* morfotipi daha fazla tespit edilmiştir. Konaklar düşük nişasta değerli bir diyet ile beslenirse kaudal ışınsız siliyatlar daha baskın olmakta, konaklar zengin nişasta değerli bir diyet ile beslendiğinde iyi gelişmiş kaudal ışınlı siliyatlar baskın hale gelmektedir (Lubinsky, 1957). *Entodinium* ve *Epidinium* türlerinin kaudal ışın geliştirmelerinin nedeni olarak *Entodinium bursa* ve *Polyplastron multivesiculatum*'un predatör davranışlarına karşı korunmaya çalışmak olarak düşünülmektedir, çünkü *E. bursa* ve *P. multivesiculatum* daha büyük ve karnivor türlerdir (Coleman ve ark., 1977). Fakat ışın geliştirmenin tam nedeni bilinmemektedir. Geniş getiren hayvanların işkembesindeki siliyat popülasyonu 4 tipe ayrılmaktadır. Bütün tipler *Entodinium*, *Dasytricha* ve *Isotricha* cinslerini içermektedir. A-tip siliyat popülasyonu *P. multivesiculatum*'u ve genellikle fakat her zaman olmamakla birlikte *Metadinium affine*'i içermektedir. B-tip siliyat popülasyonu *Epidinium* türünü, *Eudiplodinium maggii*'yi veya her iki türü birlikte içermektedir. K-tip siliyat popülasyonu *Elytroplastron bubali*'yi içermekte ve sığırlarda bulunmaktadır. O-tip siliyat popülasyonu sadece *Entodinium*, *Isotricha* ve *Dasytricha*'yı içermektedir. *Polyplastron multivesiculatum*'un predatör aktivitesi nedeniyle A-tip siliyat popülasyonu ve B-tip siliyat popülasyonu aynı konakta bulunmamaktadır. *Polyplastron multivesiculatum*, *Epidinium* türünü ve *Eudiplodinium maggii*'yi yok etmektedir (Eadie, 1957; Eadie, 1962; Imai ve ark., 1978; Imai ve ark., 1979; Ogimoto & Imai, 1981; Williams & Coleman, 1992). Antalyada'ki keçilerin 3'ü A-tip, 2'si B-tip ve 1'i O-tip popülasyona, koyunların ise 3'ü A-tip, 5'i B-tip ve 2'si O-tip popülasyona sahiptirler.

Her iki analiz (ML ve BI) ile elde edilen filogenetik ağaçlarda *Isotricha prostoma* kümesi içerisinde yer alan *Isotricha prostoma* popülasyonları (AM158454 ve AM158455) birbirlerinden genetik olarak oldukça uzak konumlanmıştır. Bu durum siliyat popülasyonlarının elde edildiği konaklar ile bu konakların coğrafi dağılımlarının farklı olması ve her konağın farklı seçim baskısına maruz kalmasından dolayı simbiyontu oldukları siliyatlarda da tür içi genetik farklılaşmanın devam ettiğini işaret etmektedir. *Metadinium minorum* ve *M. medium* kardeş pozisyonda konumlanmış olmalarına

rağmen *M. minorum*'da genetik farklılaşma daha fazladır. *Diplodinium polygonale* diğer *Diplodinium* spp. popülasyonları ile bir küme oluşturmakta fakat *D. polygonale* bu kümeye bazal olarak bağlanmaktadır. Bu durum *D. polygonale*'nin diğer *Diplodinium* spp. popülasyonlarından genetik olarak farklı olduğunu ve daha atasal konumda olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde *Ostracodinium dentatum* (sin. *Ostracodinium mammosum*) diğer *Ostracodinium* spp. popülasyonlarının oluşturduğu kümeye bazal olarak bağlandığı için bu popülasyonlardan genetik olarak farklılaşmış ve daha atasal konumdadır. (Şekil 1).

Bu çalışmadaki filogenetik analizlere göre Ophryoscolecidae ailesi içinde Ophryoscolecinae, Entodiniinae ve Diplodiniinae alt-aileleri monofiletik orijine sahiptirler ve Lubinsky (1957)'nin Ophryoscolecidae ailesini morfolojik sistematiğe göre 3 alt-aileye ayırma hipotezi filogenetik ağaca göre desteklenmektedir, ayrıca Cedrola ve ark. (2022) ile Rossi ve ark. (2015)'in çalışmalarıyla da uygunluk göstermektedir. *Dasytricha*, *Isotricha*, *Ophryoscolex*, *Epidinium*, *Entodinium*, *Diplodinium* ve *Ostracodinium* cinsleri de monofiletik kökenlidir (Şekil 1).

Sonuç olarak işkembe siliyat faunasının oluşumunda konak türün beslenme alışkanlıkları, filogenetik faktörleri, coğrafi dağılımları, işkembedeki pH, antagonizm ve siliyat türleri arasındaki transfaunasyon önemli etkilere sahiptir.

Kaynakça

- Berber, B., & Gürelli, G. (2019). Rumen ciliate fauna of domestic sheep in Kastamonu, Turkey and infraciliature of *Diplodinium quinquespinosum*, *Metadinium affine*, and *M. tauricum* (Entodiniomorpha, Ophryoscolecidae). *Zootaxa*, 4695(6), 550–558. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4695.6.5>
- Burritt, E., & Frost, R. (2006). Chapter 2: Animal behaviour principles and practices. In: K. L. Launchbaugh, J. W. Walker, & R. J. Daines (Eds), *Targeted grazing: A natural approach to vegetation management and landscape enhancement* (pp. 10–21). Englewood: American Sheep Industry Association.
- Bush, A. O., Lafferty, K. D., Lotz, J. M., & Shostak, A. W. (1997). Parasitology meets ecology on its own terms: Margolis et al. revisited. *Journal of Parasitology*, 83, 575–583. <https://doi.org/10.2307/3284227>
- Cannas, A., & Pulina, G. (2008). *Dairy goats feeding and nutrition*. CAB International.
- Cedrola, F., Senra, M. V. X., Fregulia, P., D'Agosto, M., & Dias, R. J. P. (2022). Insights into the systematics of the family Ophryoscolecidae (Ciliophora, Entodiniomorpha). *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 69, e12915. <https://doi.org/10.1111/jeu.12915>
- Coleman, G. S., Laurie, J. I., & Bailey, J. E. (1977). The cultivation of the rumen ciliate *Entodinium bursa* in the presence of *Entodinium caudatum*. *Journal of General Microbiology*, 101, 253–258. <https://doi.org/10.1099/00221287-101-2-253>
- Dehority, B. A. (1974). Rumen ciliate fauna of Alaskan moose (*Alces americana*), musk-ox (*Ovibos moschatus*) and Dall mountain sheep (*Ovis dalli*). *Journal of Protozoology*, 21, 26–32. <https://doi.org/10.1111/j.1550-7408.1974.tb03612.x>
- Dehority, B. A. (1978). Specificity of rumen ciliate protozoa in cattle and sheep. *Journal of Protozoology*, 25(4), 509–513. <https://doi.org/10.1111/j.1550-7408.1978.tb04177.x>
- Dehority, B. A. (1984). Evaluation of subsampling and fixation procedures used for counting rumen protozoa. *Applied and Environmental Microbiology*, 48(1), 182–185. <https://doi.org/10.1128/aem.48.1.182-185.1984>
- Dehority, B. A. (1986). Protozoa of the digestive tract of herbivorous mammals. *Insect Science and Its Application*, 7, 279–296. <https://doi.org/10.1017/S1742758400009346>
- Dehority, B. A. (1993). *Laboratory manual for classification and morphology of rumen ciliate protozoa*. CRC Press.
- Dogiel, V. A. (1927). Monographie der familie Ophryoscolecidae. *Archiv für Protistenkunde*, 59, 1–288.
- Dogiel, V. A. (1947). The phylogeny of the stomach infusorians of ruminants in the light of paleontological and parasitological data. *Quarterly Journal of Microscopical Science*, 88(3), 337–343. <https://doi.org/10.1242/jcs.s3-88.3.337>

- Eadie, J. M. (1957). The mid-winter rumen microfauna of the seaweed-eating sheep of North Ronaldshay. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section B* 66(3), 276–287. <https://doi.org/10.1017/S0080455X00010055>
- Eadie, J. M. (1962). The development of rumen microbial populations in lambs and calves under various conditions of management. *Journal of General Microbiology*, 29, 563–578. <https://doi.org/10.1099/00221287-29-4-563>
- Göçmen, B., & Özbek, Y. (2001). İşkembede yaşayan kamçılı (Mastigophora) ve holotriş siliyat (Ciliophora) protozoonlar. *Türkiye Parazitoloji Dergisi*, 25(4), 405–425.
- Göçmen, B., Rastgeldi, S., Karaoğlu, A., & Aşkan, H. (2005). Rumen ciliated protozoa of the Turkish domestic goats (*Capra hircus* L.). *Zootaxa*, 1091(1), 53–64. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.1091.1.4>
- Göçmen, B., Torun, S., & Öktem, N. (1999). Türkiye evcil koyun (*Ovis ammon aries*)'lerinin işkembe siliyat (Protozoa: Ciliophora) faunası hakkında bir ön çalışma: II- Familia Ophryoscolecidae (Entodiniomorpha). *Doğa-Turkish Journal of Zoology*, 23, 473–490.
- Gruby, D., & Delafond, O. (1843). Recherches sur des animalcules su developpant en gland nombre dens l'estomac et les intestins, pendant la digestion des animaux herbivores et carnivores. *Comptes Rendus Academy Science Paris*, 17, 1304–1308.
- Gurung, Y. B., Parajuli, N., Miyazaki, Y., Imai, S., & Kobayashi, K. (2002). Rumen ciliate faunae of water buffalo (*Bubalus bubalis*) and goat (*Capra hircus*) in Nepal. *Journal of Veterinary Medical Science*, 64, 265–267. <https://doi.org/10.1292/jvms.64.265>
- Gürelli, G. (2014). Rumen ciliate fauna (Ciliophora, Protista) of Turkish domestic goats living in İzmir, Turkey. *Turkish Journal of Zoology*, 38, 136–143. <https://doi.org/10.3906/zoo-1303-21>
- Gürelli, G. (2016). Rumen ciliates of domestic cattle (*Bos taurus taurus*) in Kastamonu, Turkey with the description of a new species. *European Journal of Protistology*, 56, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.ejop.2016.07.002>
- Gürelli, G. (2017). Rumen ciliate fauna of domestic sheep (*Ovis aries*) in İzmir, Turkey and scanning electron microscopic observations. *Zootaxa*, 4286(4), 545–554. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4286.4.7>
- Gürelli, G., Canbulat, S., Aldayarov, N., & Dehority, B.A. (2016). Rumen ciliate protozoa of domestic sheep (*Ovis aries*) and goat (*Capra aegagrus hircus*) in Kyrgyzstan. *FEMS Microbiology Letters*, 363, fnw028. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnw028>
- Gürelli, G., & Mohamed, A. R. A. (2021). Comparative study of rumen ciliate fauna of goat and sheep in Libya. *Türkiye Parazitoloji Dergisi*, 45(4), 274–279. <https://doi.org/10.4274/tpd.galenos.2021.39974>
- Hoang, D. T., Chernomor, O., Von Haeseler A., Minh, B. Q., & Vinh, L. S. (2018). UFBoot2: Improving the ultrafast bootstrap approximation. *Molecular Biology and Evolution*, 3, 518–522. <https://doi.org/10.1093/molbev/msx281>
- Hungate, R. E. (1996). *The rumen and its microbes*. Academic Press.
- Imai, S. (1988). Ciliate protozoa in the rumen of Kenyan zebu cattle, *Bos taurus indicus*, with the description of four new species. *Journal of Protozoology*, 35, 130–136. <https://doi.org/10.1111/j.1550-7408.1988.tb04092.x>
- Imai, S., Han, S. S., Cheng, K. J., & Kudo, H. (1989). Composition of the rumen ciliate population in experimental herds of cattle and sheep in Lethbridge, Alberta, Western Canada. *Canadian Journal of Microbiology*, 35, 686–90. <https://doi.org/10.1139/m89-112>
- Imai, S., Katsuno, M., & Ogimoto, K. (1978). Distribution of rumen ciliate protozoa in cattle, sheep and goat and experimental transfaunation of them. *Japanese Journal of Zootechnical Science*, 49(7), 494–505. <https://doi.org/10.2508/chikusan.49.494>
- Imai, S., Katsuno, M., & Ogimoto, K. (1979). Type of the pattern of the rumen ciliate composition of the domestic ruminants and the predator-prey interaction of ciliates. *Japanese Journal of Zootechnical Science*, 50(2), 79–87. <https://doi.org/10.2508/chikusan.50.79>
- Ito, A., & Imai, S. (1990). Ciliated protozoa in the rumen of Holstein–Friesian cattle (*Bos taurus taurus*) in Hokkaido, Japan, with the description of two new species. *Zoological Science*, 7, 449–458.
- Ito, A., Imai, S., Manda, M., & Ogimoto, K. (1995). Rumen ciliates of Tokara native goat in Kagoshima, Japan. *Journal of Veterinary Medical Science*, 57, 355–357. <https://doi.org/10.1292/jvms.57.355>

- Ito, A., Imai, S., & Ogimoto, K. (1993). Rumen ciliates of ezo deer (*Cervus nippon yezoensis*) with the morphological comparison with those of cattle. *The Journal of Veterinary Medical Science*, *55*, 93–98. <https://doi.org/10.1292/jvms.55.93>
- Kalyaanamoorthy, S., Minh, B. Q., Wong, T. F. K., & Von Haeseler, A. (2017). ModelFinder: fast model selection for accurate phylogenetic estimates. *Nature Methods*, *14*, 587–589. <https://doi.org/10.1038/nmeth.4285>
- Kumar, S., Stecher, G., & Tamura, K., (2016). MEGA 7: Molecular evolutionary genetics analysis version 7.0 for bigger datasets. *Molecular Biology and Evolution*, *33*, 1870–1874. <https://doi.org/10.1093/molbev/msw054>
- Kurihara, Y., Takechi, T., & Shibata, F. (1978). Relationship between bacteria and ciliate protozoa in the rumen of sheep fed on a purified diet. *The Journal of Agricultural Science*, *90*, 373–381. <https://doi.org/10.1017/S0021859600055489>
- Lubinsky, G. (1957). Studies on the evolution of the Ophryoscolecidae III. Phylogeny of the Ophryoscolecidae based on their comparative morphology. *Canadian Journal of Zoology*, *35*, 141–159. <https://doi.org/10.1139/z57-009>
- Lynn, D. H. (2008). *The ciliated protozoa: Characterization, classification and guide to the literature* (3rd ed.). Springer.
- Moon-van der Staay, S. Y., van der Staay, G. W. M., Michalowski, T., Jauany, J.-P., Pristas, P., Javorský, P., ... & Hackstein, J. H. P. (2014). The symbiotic intestinal ciliates and the evolution of their hosts. *European Journal of Protistology*, *50*, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.ejop.2014.01.004>
- Nguyen, L. T., Schmidt, H. A., Von Haeseler, A., & Minh, B. Q. (2015). IQ-TREE: a fast and effective stochastic algorithm for estimating maximum-likelihood phylogenies. *Molecular Biology and Evolution*, *32*(1), 268–274. <https://doi.org/10.1093/molbev/msu300>
- Ogimoto, K., & Imai, S. (1981). *Atlas of rumen microbiology*. Japan Scientific Societies Press.
- Öktem, N., Göçmen, B., & Torun, S. (1997). Türkiye evcil koyun (*Ovis ammon aries*)'larının işkembe siliyat (Protozoa: Ciliophora) faunası hakkında bir ön çalışma: I. Familya Isotrichidae (Trichostomatida) ve Entodiniidae (Entodiniomorpha). *Turkish Journal of Zoology*, *21*, 475–502.
- Ronquist, F., Teslenko, M., Van der Mark, P., Ayres, D. L., Darling, A., Höhna, S., ... & Huelsenbeck, J. P. (2012). MrBayes 3.2: efficient Bayesian phylogenetic inference and model choice across a large model space. *Systematic Biology*, *61*, 539–542. <https://doi.org/10.1093/sysbio/sys029>
- Rossi, M. F., Dias, R. J. P., Senra, M. V. X., Martinele, I., Soares, C. A. G., & D'Agosto, M. (2015). Molecular phylogeny of the family Ophryoscolecidae (Ciliophora, Litostomatea) inferred from 18S rDNA Sequences. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, *62*, 584–590. <https://doi.org/10.1111/jeu.12211>
- Talavera, G., & Castresana, J. (2007). Improvement of phylogenies after removing divergent and ambiguously aligned blocks from protein sequence alignments. *Systematic Biology*, *56*, 564–577. <https://doi.org/10.1080/10635150701472164>
- Trifinopoulos, J., Nguyen, L. T., von Haeseler, A., & Minh, B.Q. (2016). W-IQ-TREE: a fast online phylogenetic tool for maximum likelihood analysis. *Nucleic Acids Research*, *44*, 232–235. <https://doi.org/10.1093/nar/gkw256>
- Vd'ačný, P. (2018). Evolutionary associations of endosymbiotic ciliates shed light on the timing of the marsupial-placental split. *Molecular Biology and Evolution*, *35*, 1757–1769. <https://doi.org/10.1093/molbev/msy071>
- Williams, A. G., & Coleman, G. S. (1992). *The rumen protozoa*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2776-2>



Research Article

Theoretical Investigation of the Chemical Reactivity of Acrylic Acid Molecules: A DFT Study with UV-Vis, NMR, and FT-IR Spectroscopy Using STO-3G Basis Set

Fermin AK*, Mehmet Hanifi KEBİROĞLU

Malatya Turgut Özal University, Darende Bekir Ilıcak Vocational School, Opticianry Program, 44700, Malatya, Türkiye

Fermin AK, [ORCID No: 0000-0003-3238-4638](#),

Mehmet Hanifi KEBİROĞLU, [ORCID No: 0000-0002-6764-3364](#)

*Corresponding author e-mail: fermin.ak@ozal.edu.tr

Article Info

Received: 27.08.2023

Accepted: 25.10.2023

Online August 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1350755](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1350755)

Keywords

Acrylic Acid,

FT-IR,

HOMO and LUMO,

NMR,

UV-Vis

Abstract: In this paper, quantum computational chemistry methods were employed to calculate the molecular characteristics of acrylic acid. Density Functional Theory (DFT) was used to optimize the molecule at the STO-3G basis set to calculate the highest occupied molecular orbital (HOMO) and lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) energy levels of the frontier orbitals of acrylic acid. The energy gap between HOMO-LUMO orbitals was calculated to be 5.545 eV. This demonstrated that the energy gap reflects the chemical activity of the molecule. The compound was characterized by UV-Visible, Nuclear Magnetic Resonance (NMR), and Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy methods.

Akrilik Asit Moleküllerinin Kimyasal Reaktivitesinin Teorik İncelenmesi: STO-3G Temel Seti Kullanılarak UV-Vis, NMR ve FT-IR Spektroskopisi ile Bir DFT Çalışması

Makale Bilgileri

Geliş: 27.08.2023

Kabul: 25.10.2023

Online Ağustos 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1350755](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1350755)

Anahtar Kelimeler

Akrilik Asit,

FT-IR,

HOMO ve LUMO,

NMR,

UV-Vis

Öz: Bu yazıda, akrilik asidin moleküler özelliklerini hesaplamak için kuantum hesaplamalı kimya yöntemleri çalışılmıştır. Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT), akrilik asidin sınır orbitallerinin en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) ve en düşük boş moleküler orbital (LUMO) enerji seviyelerini hesaplamak için STO-3G temel setinde molekülü optimize etmek için kullanılmıştır. HOMO-LUMO orbitalleri arasındaki enerji aralığı 5.545 eV olarak hesaplanmıştır. Bu, enerji aralığının molekülün kimyasal aktivitesini yansıttığını göstermiştir. Bileşik; UV-Görünür, Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) ve Fourier Dönüşümü Kızılötesi (FT-IR) spektroskopi yöntemleri ile karakterize edilmiştir.

1. Introduction

Acrylic acid is frequently utilized in grafting procedures as a spacer to link proteins and the substrate. The chemical formula for Polyacrylic acid (PAA) is $C_3O_2H_4$ (Zhang et al., 2014). Furthermore, through functional analysis, a deeper comprehension of the molecular signaling pathways related to surface coating has been achieved. This understanding holds significant potential for advancements in regenerative medicine, biomaterials, and tissue engineering. Commercially available contact lenses are surface-modified using plasma polymerization (Naganandhini et al., 2022). Studies on the polymerization of acrylic acid molecules and the interactions of polyacrylic acid with various polymer blends have been extensively documented in the literature. FT-IR, FT-Raman, and FT-NIR techniques have been used for the various H-bonded structures of acrylic acid (Issaoui et al., 2017). Intermolecular hydrogen bonds play a crucial role in maintaining the stability of the molecule (Kanmazalp, 2017). Density functional theory (DFT), a quantum chemical computation approach, has been extensively employed to ascertain the molecular structure and electronic characteristics of polyatomic molecules. DFT has gained significant popularity in the fields of chemistry, physics, and materials science for understanding and predicting the behavior of complex atomic-scale systems. DFT method has employed to investigate the analysis of the title compound, with a specific focus on its ground state, which corresponds to the minimum energy state (Çiftci et al., 2020; Abdel-baset, 2023). The energy gap, also known as the difference between HOMO and LUMO energies, directly impacts the chemical reactivity and kinetic stability of the molecule (Odujole & Desai, 2020). The electronic properties of nanostructures can be changed optionally. Studies have shown that doping of different atoms or functionalization can enable them to be easily adsorbed by molecules (Bibi et al., 2021). The studies have also shown that they influence the performance of optoelectronic devices (Muz & Kurban, 2019; Muz & Kurban, 2020).

Acrylic acid was investigated by quantum chemical computation and bioactivity analysis. We reported the results of DFT computations, which is a commonly used method for studying chemical reactivity to determine chemical stability (Frau et al., 2017). NMR, FT-IR, UV-vis spectroscopy, and other parameters used as characterization techniques were also investigated in the study.

2. Material and Methods

The Gaussian 09W software package was utilized to construct and study the structure of acrylic acid molecule. Initially, two methods were chosen: DFT and HF. By choosing the basis sets of these two methods separately, the optimized states of the structure were created. As given in Table 1, we decided to use STO-3G as the best fit for the energy range of the results. DFT is employed for quantum chemical calculations at the optimized structure (Taniş, 2022a). In the literature, DFT calculations have become a valuable tool that yields highly reliable results for molecular geometry, electronic, and optical properties when compared to experimental data (Taniş, 2022b). These theoretical investigations are crucial for time and cost savings as well as for optimizing experimental procedures (Taniş, 2022c).

Table 1. The energy gap between HOMO-LUMO orbitals of sets

Sets	DFT (eV)	HF (eV)
STO-3G	5.545	15.324
3-21G	6.086	13.805
6-31G	6.026	13.397
6-31G'	6.026	13.397
6-311G	6.026	13.314
LanL2DZ	5.919	13.056
LanL2MB	5.545	15.324
SDD	5.918	13.064

After optimizing the structure using GaussView 6.0 software, NMR, UV, and FT-IR were performed (Sucheta et al., 2022). The GaussSum program was used to determine the DOS (density of states) spectrum (O'boyle et al., 2008). The vibrational wave numbers and other parameters were calculated using optimized structural parameters.

Molecular chemical reactivity and conductivity can be interpreted by the HOMO-LUMO energy gap (Parr & Yang, 1984; Diomande & Kone, 2019). A minimal energy gap indicates molecular stability and allows electrons to transition into excited states more easily. The compound with the smallest band gap is more polarized and chemically reactive. Molecular polarizability is important for optical and biological activity. The parameter formulas used for this are shown below.

$$I = -E_{HOMO} \quad (1)$$

$$A = -E_{LUMO} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 E}{\partial^2 N} \right]_{v(r)} = \frac{I - A}{2} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1}{\eta} \quad (4)$$

$$\mu = -\chi = \left[\frac{\partial E}{\partial N} \right]_{v(r)} = -\left(\frac{I + A}{2} \right) \quad (5)$$

$$\omega = \frac{\chi^2}{2\eta} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\omega} \quad (7)$$

$$\omega^+ = \frac{(I + 3A)^2}{16(I - A)} \quad (8)$$

$$\omega^- = \frac{(3I + A)^2}{16(I - A)} \quad (9)$$

Molecular polarizability is of great importance in modeling molecular properties, optical properties, and biological activity. These equations are used to calculate ionization energy, electron affinity, chemical potential (μ), electronegativity (χ), spherical hardness (η), and softness (σ) (Çakmak et al., 2022). Table 2 shows the chemistries obtained in the gas phase at the B3LYP/STO-3G ground level. Quantum chemical parameters provide theoretical predictions that can be used to determine the activity of molecules. Figure 1 shows the energy level diagram of acrylic acid, with the HOMO and LUMO orbitals highlighted.

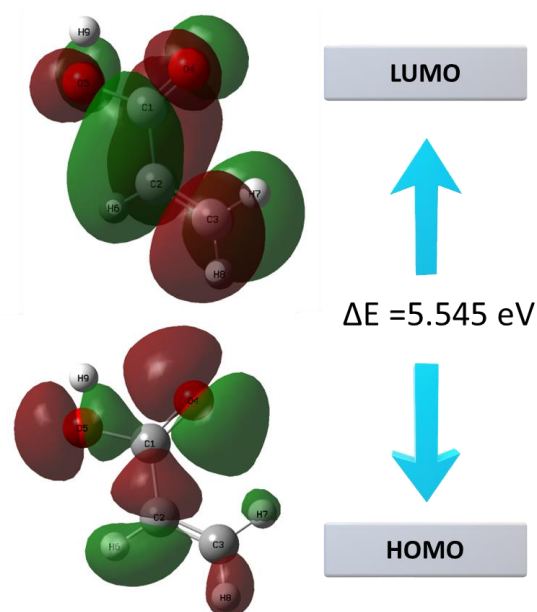


Figure 1. HOMO-LUMO structure with the energy level diagram of Acrylic Acid.

Table 2. The calculated quantum chemical descriptors for Acrylic Acid

Parameter	Values
E_{HOMO} (eV)	-4.191
E_{LUMO} (eV)	1.354
ΔE (eV)	5.545
η (eV)	2.772
σ (eV ⁻¹)	0.361
χ (eV)	1.418
μ (eV)	-1.418
ω	0.362
ε	2.762
ω^+	1.876
ω^-	1.418

3. Results

3.1. Vibrational spectroscopic analysis spectrum

When the dipole moment of the molecule changes during vibration, infrared becomes active (i.e., absorbs incoming infrared radiation) (Griffiths & de Haseth, 1986). As a result, symmetrical oscillations are rarely observed in the infrared spectrum. If a molecule has a center of symmetry, not all symmetrical vibrations around the center will be active in the infrared spectrum (Qiu et al., 2018). On the other hand, asymmetric vibrations of all molecules are detected. This lack of selectivity allows the characterization of almost all chemical groups in a single sample that is difficult to detect with conventional spectroscopic techniques (Messick et al., 2008). Among the different characterization methods, Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy is one of the most powerful tools for

determining the functional group in possible molecular bonds between chemical compounds (Mohamed et al., 2015; Mohamed et al., 2016). Understanding the positions of IR absorption bands in the spectrum as wavenumbers can be used to identify various chemical compounds that are undetectable in X-ray photoelectron spectroscopy spectra. In general, IR spectroscopy is applicable to a wide variety of materials and situations and can be used for qualitative and quantitative analysis (Pavia et al., 2001). The key to understanding an FT-IR spectrum is to identify the positions, relative sizes, vibrational types, and changes in the spectrum pattern of all absorptions or peaks. This information can be used to gain valuable and informative insights (Smith, 2006; Khoshhesab, 2012).

It shows the estimated FT-IR spectra of the studied molecules in the range of 4000 cm^{-1} to 0 cm^{-1} . The frequencies in the figure are harmonic frequencies. Harmonic frequencies are calculated by multiplying the harmonic frequencies by the appropriate measurement factor for each calculation level. Similarity in complexes meant similarity in both spectrum and vibrational frequencies. According to the basic principles of vibrational spectroscopy, the vibrational frequency of a bond increases as the bond strength increases and the mass of the bond atom decreases. In Figure 2, the peak number 41 indicates the highest intensity, and the wavenumber indicates 1208 cm^{-1} . Other permeability numbers, 83, 79, 60, 75, 57, and 77 peak numbers, have been changed at a low level. The peak number and wavelength of 60 to 79 indicate the energy range between 1832 cm^{-1} and 3392 cm^{-1} .

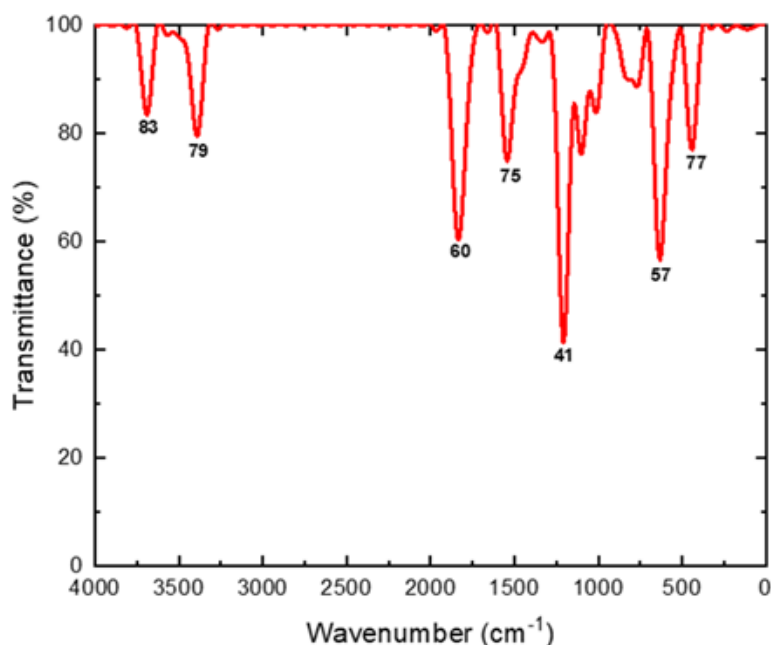


Figure 2. FT-IR spectrum of Acrylic Acid.

3.2. Nuclear magnetic resonance (NMR) investigation

Gaussian is a software package that can be used for a variety of computational chemistry tasks, including nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy. It can be used to calculate NMR spectra for molecules of any size and complexity. Gaussian also includes a number of tools for analyzing NMR spectra, such as peak fitting and integration. Overall, NMR spectroscopy is an incredibly versatile tool that can be used to study a wide variety of materials, especially proteins. The rapid growth of technological advances in NMR spectroscopy has made it an essential tool for research in biochemistry, biology, and medicine (Singh & Singh, 2022).

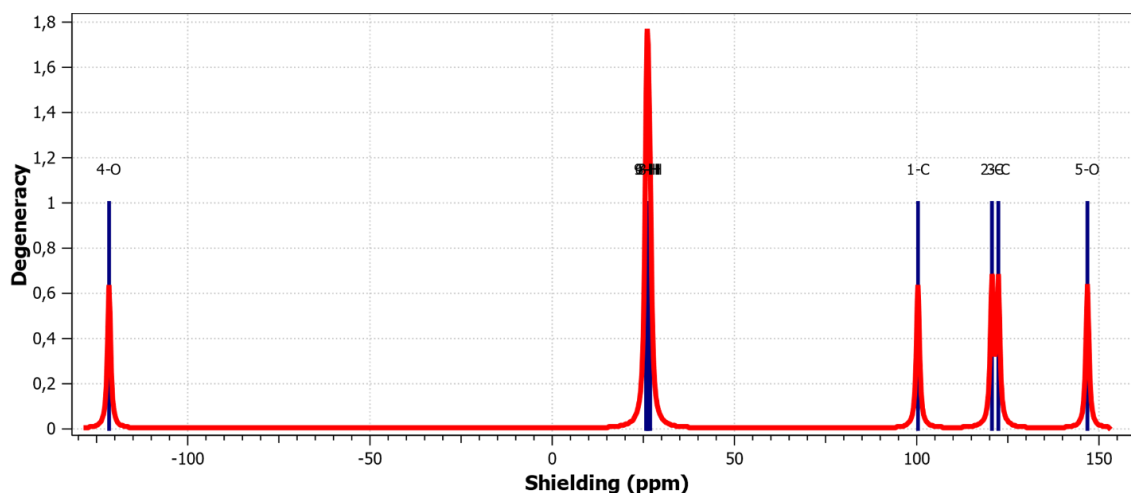


Figure 3. NMR spectrum of Acrylic Acid.

Table 3. Chemical shifts of Acrylic Acid

Method	Shielding (ppm)
4-O	-121.568
9-H	25.7572
6-H	26.0694
7-H	26.3312
8-H	26.8781
1-C	100.3448
2-C	120.6442
3-C	122.3991
5-O	146.8408

Figure 3 shows the NMR spectra of two acrylic acid molecules. The spectra are plotted as a function of the chemical shift, which is a measure of the shielding of an atom's nucleus from the external magnetic field. Table 3 lists the calculated chemical shift values for each atom in the acrylic acid molecule. These values are determined by the electronic environment of the atom, which is influenced by the atoms that are bonded to it. The sudden peaks in the graph of the NMR spectra indicate the locations of distinctive features in the acrylic acid molecule structure. These features include the carboxylic acid group, the carbon-carbon double bond, and the hydrogen atoms attached to the carbon atoms.

3.3. UV-Visible analysis

UV-Visible analysis is a type of spectroscopy that uses light in the ultraviolet (UV) and visible (Vis) ranges to study the electronic structure and properties of molecules. When a molecule absorbs light, it causes electrons to move from a lower energy level to a higher energy level. The amount of energy that is absorbed is equal to the difference in energy between the two levels. The different wavelengths of light correspond to different energies. UV light has shorter wavelengths and higher energies than visible light. The spectrum of a molecule shows the amount of light that is absorbed at each wavelength. This spectrum can be used to identify the molecule and to determine its electronic structure. UV-Visible analysis is a powerful tool for studying the properties of molecules (Schmid, 2001).

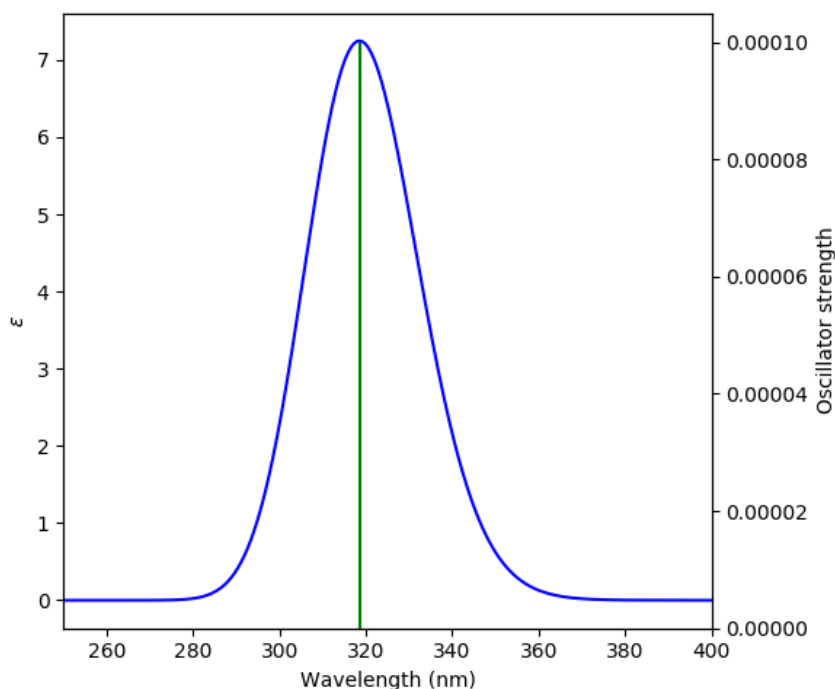


Figure 4. UV-visible absorption spectrum of Acrylic Acid.

Table 4. Peak information of Acrylic Acid

Acrylic Acid	
Wavelength (nm)	Strength
318.52	121.0843162
202	29181.3202
170.64	121.0843162
164.81	0
160.7	392192.1001
138.8	31845.17516

Figure 4 shows the UV-visible absorption spectra of the compound. Table 4 shows wavelength (nm) and strength values. In the case of Acrylic Acid, the UV absorption spectrum covers the wavelength range from 138.8 nm to 318.52 nm. The highest peak observed at 318.52 nm. This range has absorption, especially in conjugated systems, indicating the presence of double or triple bonds within the molecule.

4. Discussion and Conclusion

The structural, electrical, chemical, and biological actions of acrylic acid are described in this study. This molecule is crucial in the medicinal and biological industries. The reactivity of the compounds as evaluated using the STO-3G basis set in a DFT calculation. It can also categorize substances appropriately based on their reactivity. Biochemical and biological activity changes are quite apparent. When using FT-IR, peak 41 represents the maximum intensity, and the wavelength is 1208 cm^{-1} . Other peak permeability numbers, including 83, 79, 60, 75, 57, and 77, have been changed at a low level. It denotes the energy range between peak numbers 60 and 79. The absorbance spectra is examined using UV-visible spectroscopy. This absorption is visible and occurs in this region, the 318.52

nm peak indicates the color of the structure. The 318.52 nm peak has an energy of 5.545 eV. NMR spectra of the compound was also determined.

As a result, acrylic acid is structurally utilized in the manufacture of numerous products, including plastics, coatings, adhesives, paint, and varnish. It broadens the chemical structure detection range and is suitable for a variety of applications.

References

- Abdel-baset, H. M. (2023). Electronic structure and stability of a pure sodium alanate clusters Na₁₂Al₁₂H₄₈, and the interstitial space-doped with Ti, C and H atoms, as a promising hydrogen storage system: Density functional theory. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(53), 20430-20440. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.023>
- Bibi, S., Urrehman, S., Khalid, L., Yaseen, M., Khan, A. Q., & Jia, R. (2021). Metal doped fullerene complexes as promising drug delivery materials against COVID-19. *Chemical Papers*, 75, 6487-6497. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01815-4>
- Çakmak, R., Başaran, E., Kaya, S., & Erkan, S. (2022). Synthesis, spectral characterization, chemical reactivity and anticancer behaviors of some novel hydrazone derivatives: Experimental and theoretical insights. *Journal of Molecular Structure*, 1253, 132224. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.132224>
- Çiftci, E., Ata, A. Ç., Yıldiko, Ü., & Çakmak, İ. (2020). Spectroscopic comparison of 4-Isopropyl-N, N-Bis (4-Azidophenyl) Aniline molecule (IPAPA): DFT and MEP Analysis. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(3), 1799-1810. <https://doi.org/10.21597/jist.687723>
- Diomande, S., & Kone, S. (2019). Lipophilicity and QSAR study of a series of makaluvamines by the method of the density functional theory: B3LYP/6-311++G(d,p). *Journal of Materials Physics and Chemistry*, 7(1), 20-28.
- Frau, J., Muñoz, F., & Glossman-Mitnik, D. (2017). Application of DFT concepts to the study of the chemical reactivity of some resveratrol derivatives through the assessment of the validity of the “Koopmans in DFT” (KID) procedure. *Journal of Theoretical and Computational Chemistry*, 16 (01), 1750006. <https://doi.org/10.1142/S0219633617500067>
- Griffiths, P. R., & de Haseth, J. A. (1986). *Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Vol. 83 aus der Reihe: Chemical Analysis—A Series of Monographs of Analytical Chemistry and Its Applications*. John Wiley Sons. <https://doi.org/10.1002/bbpc.19860901224>
- Issaoui, N., Ghalla, H., Bardak, F., Karabacak, M., Dlala, N. A., Flakus, H. T., & Oujia, B. (2017). Combined experimental and theoretical studies on the molecular structures, spectroscopy, and inhibitor activity of 3-(2-thienyl) acrylic acid through AIM, NBO, FT-IR, FT-Raman, UV and HOMO-LUMO analyses, and molecular docking. *Journal of Molecular Structure*, 1130, 659-668. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.11.019>
- Kanmazalp, S. D. (2017). Investigation of theoretical calculations of 2-(1-Phenylethylideneamino) guanidine compound: NBO, NLO, HOMO-LUMO and MEP analysis by DFT Method. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 7(2), 491-496.
- Khoshhesab, Z. M. (2012). Reflectance IR Spectroscopy. In: T. Theophanides (Ed.), *Infrared Spectroscopy - Materials Science, Engineering and Technology*, (pp. 233e44). InTech. <https://doi.org/10.5772/37180>
- Messick, T. E., Russell, N. S., Iwata, A. J., Sarachan, K. L., Shiekhattar, R., Shanks, J. R., ..., & Marmorstein, R. (2008). Structural basis for ubiquitin recognition by the Otu1 ovarian tumor domain protein. *Journal of Biological Chemistry*, 283(16), 11038-11049. <https://doi.org/10.1074/jbc.M704398200>
- Mohamed, M. A., Salleh, W. N. W., Jaafar, J., Ismail, A. F., Abd. Mutalib, M., & Jamil, S. M. (2015). Feasibility of recycled newspaper as cellulose source for regenerated cellulose membrane fabrication. *Journal of Applied Polymer Science*, 132, (43). <https://doi.org/10.1002/app.42684>
- Mohamed, M. A., Salleh, W. N. W., Jaafar, J., Hir, Z. A. M., Rosmi, M. S., Mutalib, M. A., ..., & Tanemura, M. (2016). Regenerated cellulose membrane as bio-template for in-situ growth of visible-light driven C-modified mesoporous titania. *Carbohydrate Polymers*, 146, 166-173. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.050>

- Muz, İ., & Kurban, M. (2019). Enhancement of electronic, photophysical and optical properties of 5,5'-Dibromo-2,2'-bithiophene molecule: new aspect to molecular design. *Opto-Electronics Review*, 27, 113-118. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.03.002>
- Muz, İ., & Kurban, M. (2020). Electronic transport and non-linear optical properties of hexathiopentacene (HTP) nanorings: A DFT study. *Journal of Electronic Materials*, 49(5), 3282-3289. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08017-w>
- Naganandhini, S. P., Sangeetha, T., Sahana, R., Mounica, P., Rajmohan, G., Dineshkumar, P., & Arivazhagan, G. (2022). Theoretical discussion on the hydrogen bond interactions between Acrylic Acid dimer and dibutyl ether Monomer. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1213, 113746. <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2022.113746>
- O'boyle, N. M., Tenderholt, A. L., & Langner, K. M. (2008). CcLib: a library for package-independent computational chemistry algorithms. *Journal of Computational Chemistry*, 29(5), 839-845. <https://doi.org/10.1002/jcc.20823>
- Odujole, J. I., & Desai, S. (2020). Molecular dynamics simulations of PAA as resist for nanoimprint lithography. In L. Cromarty, R. Shirwaiker, P. Wang (Eds.), *Proceedings of the 2020 IIE Annual Conference* (pp. 221-226). Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE).
- Parr, R. G., & Yang, W. J. (1984). Density functional approach to the frontier-electron theory of chemical reactivity. *Journal of the American Chemical Society*, 106, 511-516. <https://doi.org/10.1021/ja00326a036>
- Pavia, D. L., Lampman G. M., & Kriz, G.S. (2001). *Introduction to Spectroscopy*. 3rd ed. USA: Thomson Learning, Inc.
- Qiu, L., Levine, K., Gajiwala, K. S., Cronin, C. N., Nagata, A., Johnson, E., ... & Sun, S. (2018). Small molecule inhibitors reveal PTK6 kinase is not an oncogenic driver in breast cancers. *PLoS One*, 13(6), e0198374. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198374>
- Schmid, F. X. (2001). Biological Macromolecules: UV-visible Spectrophotometry. In *Encyclopedia of Life Sciences*. <https://doi.org/10.1038/npg.els.0003142>
- Singh, M. K., & Singh, A. (2022). Chapter 14 - Nuclear magnetic resonance spectroscopy. In M. K. Singh & A. Singh (Eds.), *Characterization of Polymers and Fibres* (pp. 321-339). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823986-5.00011-7>
- Smith, B. (2006). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. USA: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Sucheta, M., Pramod, A. G., Zikriya, M., Salma, K. M., Venugopal, N., Chaithra, R., ..., & Murthy, S. (2022). Frontier molecular orbital, molecular structure and Thermal properties of 2, 4, 6, 8-tetramethyl-2, 3, 6, 7-tetrahydro-s-indacene-1, 5-dione using DFT calculation. *Materials Today: Proceedings*, 62, 5241-5244. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.215>
- Taniş, E. (2022a). Study of electronic, optoelectronic and photonic properties of NBB material in solvent environments. *Journal of Electronic Materials*, 51, 4978-4985. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09730-4>
- Taniş, E. (2022b). New optoelectronic material based on biguanide for orange and yellow organic light emitting diode: A combined experimental and theoretical study. *Journal of Molecular Liquids*, 358, 119161. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119161>
- Taniş, E. (2022c). A study of silicon and germanium-based molecules in terms of solar cell devices performance. *Turkish Journal of Chemistry*, 46, 1607-1619. <https://doi.org/10.55730/1300-0527.3464>
- Zhang, H., Brown, K. D., Lowe, S. P., Liu, G. S., Steele, D., Abberton, K., & Daniell, M. (2014). Acrylic acid surface-modified contact lens for the culture of limbal stem cells. *Tissue Engineering Part A*, 20(11-12), 1593-1602. <https://doi.org/10.1089/ten.tea.2013.0320>



Research Article

**ZnO/ITO, Sn and Cu Doped ZnO/ITO Films as an Photoanode for Solar Cell:
Production and Characterizations [†]**

İlker KARA^{*1}, Dheyaaldain Mohammed Hussein ALHASANI¹, Ahmet Furkan KAYIŞ², Özcan YALÇINKAYA², Olcay GENÇYILMAZ¹, Abjar Ibrahim Rashid HAFEDH¹

¹Çankırı Karatekin University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 18100, Çankırı, Türkiye

²Gazi University, Science and Art Faculty, Department of Chemistry, 06500, Ankara, Türkiye

İlker KARA, [ORCID No: 0000-0003-3700-4825](https://orcid.org/0000-0003-3700-4825), Dheyaaldain Mohammed Hussein ALHASANI, [ORCID No: 0009-0003-1635-0435](https://orcid.org/0009-0003-1635-0435), Ahmet Furkan KAYIŞ, [ORCID No: 0000-0002-5412-2906](https://orcid.org/0000-0002-5412-2906), Özcan YALÇINKAYA, [ORCID No: 0000-0002-2891-3878](https://orcid.org/0000-0002-2891-3878), Olcay GENÇYILMAZ, [ORCID No: 0000-0002-7410-2937](https://orcid.org/0000-0002-7410-2937), Abjar Ibrahim Rashid HAFEDH, [ORCID No: 0000-0001-5514-0404](https://orcid.org/0000-0001-5514-0404)

*Corresponding author e-mail: ilkerkara@karatekin.edu.tr

Article Info

Received: 28.11.2023

Accepted: 24.04.2024

Online August 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1397221](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1397221)

Keywords

Cu and Sn doping,
ITO,
SILAR method,
ZnO films

Abstract: Undoped ZnO and Sn- and Cu-doped ZnO thin films were fabricated on ITO substrates via the SILAR method for this study. The films were then subjected to structural, surface, optical, and electrical characterization. The undoped ZnO thin films displayed a spherical surface morphology, while the Sn-doped ZnO thin films exhibited a nano-flower surface morphology. On the other hand, the Cu-doped ZnO thin films demonstrated a relatively thicker and flat layer, as well as a fractured surface morphology that resulted in voids. The level of crystallization and transmittance values augmented upon doping. With Cu doping, n-p heterojunction structure was obtained from ZnO/ITO films. Hence, it is inferred that the generated Cu doped ZnO/ITO films can serve as alternative transparent conductive films (TCO) due to their low resistivity.

Güneş Pili için Fotoanot Olarak ZnO/ITO, Sn ve Cu Katkılı ZnO/ITO Filmleri: Üretim ve Karakterizasyonu

Makale Bilgileri

Geliş: 28.11.2023

Kabul: 24.04.2024

Online Ağustos 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1397221](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1397221)

Anahtar Kelimeler

Cu ve Sn katkısı,
ITO,
SILAR yöntemi,
ZnO filmler

Öz: Bu çalışma için katkısız ZnO ve Sn- ve Cu katkılı ZnO ince filmler ITO alttaşlar üzerinde SILAR yöntemi ile üretilmiştir. Filmler daha sonra yapısal, yüzeyel, optik ve elektriksel karakterizasyona tabi tutulmuştur. Katkısız ZnO ince filmler küresel bir yüzey morfolojisi sergilerken, Sn katkılı ZnO ince filmler nano-çiçek yüzey morfolojisi sergilemiştir. Öte yandan, Cu katkılı ZnO ince filmler nispeten daha kalın ve düz bir tabakanın yanı sıra boşluklarla sonuçlanan kırık bir yüzey morfolojisi göstermiştir. Kristalleşme seviyesi ve geçirgenlik değerleri katkılama ile birlikte artmıştır. Cu katkısı ile ZnO/ITO filmlerinden n-p heteroeklem yapısı elde edildi. Bu nedenle, üretilen Cu katkılı ZnO/ITO ince filmlerin düşük dirençleri nedeniyle alternatif şeffaf iletken filmler (TCO) olarak hizmet edebileceği sonucuna varılmıştır.

[†] This study is produced from Master thesis "The Growth of Doped ZnO Thin Films by The SILAR Method and Investigation of Structural, Optical and Electrical Properties" prepared by Dheyaaldain Mohammed Hussein ALHASANI in 2023 under the supervision of Assoc. Prof. Dr. İlker KARA.

1. Introduction

Zinc oxide (ZnO) thin films are important II-VI semiconductors due to their significant exciton binding energy (60 meV) and wide band gap (approximately 3.3 eV) (Alwadai et al., 2021). The crystal structure of ZnO thin films is typically wurtzite (Devi et al., 2020). They have wide applications in various fields such as solar cells, gas sensors, light-emitting diodes (LEDs), laser systems, and transparent conductors due to their good structural, optical, and electrical qualities (Kaphle & Hari, 2018; Wang et al., 2018; Saini et al., 2020; Zhang et al., 2022; Saravanan et al., 2023; Rashid et al., 2024; Xiao et al., 2024). ZnO films have been extensively studied in recent years, particularly in the fields of optoelectronic devices and solar cells (Gençyılmaz, 2018; Klochko et al., 2018). They can be produced using various physical and chemical techniques. These techniques include magnetron sputtering, thermal evaporation, chemical bath deposition and pulsed laser deposition (PLD) (Li et al., 2024; Gençyılmaz et al., 2024; Alsultany et al., 2016; Thobega et al., 2024; Wang, 2023). Various techniques have been used for the synthesis of the material, including chemical vapour deposition, spray pyrolysis, sol-gel, and successive ionic layer adsorption technique (Devi et al., 2020; Li et al., 2024; Kumar et al., 2018; Saravanan et al., 2023; Cruz et al., 2023; Şahin et al., 2022; Ashith et al., 2018). Among these techniques, the SILAR technique stands out due to its practicality, economy, and reproducibility.

However, the physical properties of ZnO films vary depending on the size, orientation, and surface quality of the grains, as well as the conditions under which the material is prepared and the processes used. The technique employed in production, the substrate on which the films are deposited, and the doping process significantly affects the physical properties of the films. In particular, the structural characteristics of ZnO films are greatly influenced by the substrate used in their formation. Various studies in the literature have investigated the use of substrates such as silicon, quartz, sapphire, FTO, and ITO in the production of ZnO (Tang et al., 2024; Solaymani et al., 2021; Chaitra et al., 2021; Klochko et al., 2019). Recently, metal doping of ZnO films with Ga, Ti, Al, Si, Sn, and Cu has led to the development of materials with enhanced optical characteristics and high conductivity (Dhamodharan et al., 2015).

The study employed the SILAR process to produce ZnO films on ITO substrates. The films were either undoped or doped with Sn and Cu. The impact of Sn and Cu doping on the electrical, surface, structural, and optical characteristics of ZnO films grown on an ITO substrate was investigated.

2. Material and Methods

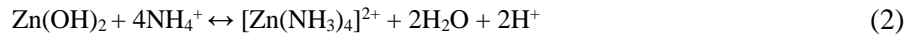
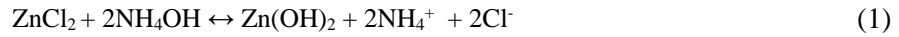
The Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) method is an economical and flexible technique for creating thin films (Kadem et al., 2017). It has a wide range of applications in scientific research, materials science, solar cells, sensors, and optoelectronic devices. The SILAR method enables precise control over the thickness and desired properties of thin films, making it a straightforward and accessible means of regulating their growth. The study involved the growth of undoped, Sn-doped and Cu-doped ZnO films using the SILAR method.

2.1. Preparation of substrate materials

ZnO, Sn and Cu doped ZnO films were grown on an indium tin oxide (ITO) substrate. The ITO coated glass materials used were TEC8 model, 25 mm x 25 mm, 2 mm thick. Prior to modification, the ITO coated glasses underwent cleaning. They were first rinsed in soapy water to remove any material, and then cleaned using an ultrasonic cleaner and acetone for ten minutes. Finally, they were washed using an ultrasonic cleaner for 10 minutes in a 1:1 ethanol-water solution.

2.2. Production process

($[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$) zinc-ammonia complex was used to grow ZnO thin films on ITO substrate. To prepare the zinc-ammonia solution complex, 0.1 M ZnCl_2 (pH \approx 5.5) and 25 - 28 % NH_3 solutions were mixed in 1 to 10 molar ratio [$\text{Zn}:\text{NH}_3=1:10$] (Figure 1). The following Equations 1, 2, 3, and 4 explain the chemical reactions that occur during the growth phase of thin films (Rajamanickam et al., 2024);



In order to generate films of Sn-doped ZnO and Cu-doped ZnO, the ITO substrate had to be cleaned. Following the cleaning process, solutions were mixed according to the specified additive ratio. Then, using the SILAR approach, thin films of zinc oxide (ZnO) doped with Sn and Cu were grown on an indium tin oxide (ITO) substrate.

When the ZnCl₂, SnCl₂, CuCl₂, and NH₃ solutions are mixed together, a complex of [Zn(NH₃)₄]²⁺, ([Sn(NH₃)₄]²⁺, and [Cu(NH₃)₄]²⁺ (pH10) is formed. Keeping the Sn concentration fixed at 1% and Cu concentration at 1%, thin films of Sn-doped and Cu-doped ZnO were grown on ITO (Indium Tin Oxide) substrates by mixing [Zn(NH₃)₄]²⁺ and [Cu(NH₃)₄]³⁺ complexes and following the aforementioned growth stages. Figure 1 and Figure 2 shows a schematic representation of the SILAR technique used in ZnO films on ITO substrate and Schematic representation of the application of the two-point probe technique to films, respectively.

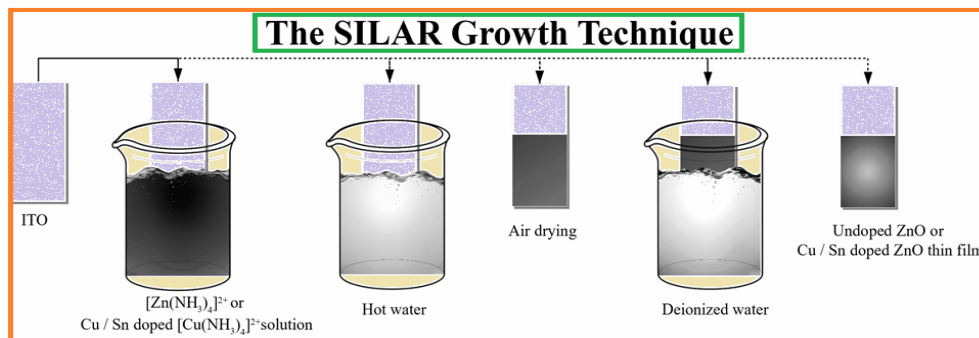


Figure 1. ZnO films on ITO substrate using SILAR method growth process.

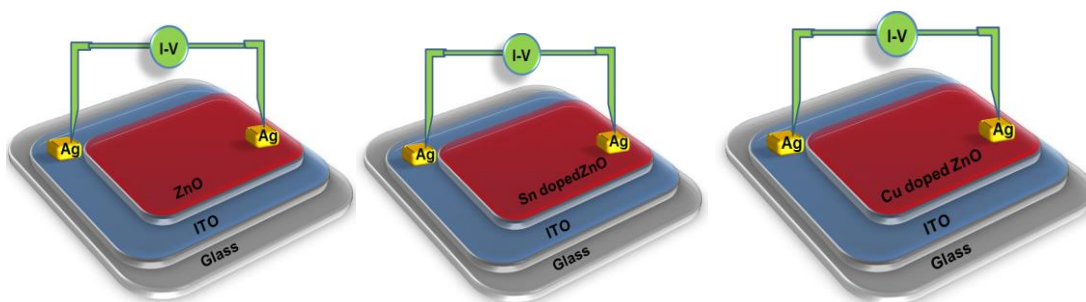


Figure 2. Schematic representation of the application of the two-point probe technique to films.

Research was conducted on films of ZnO, Sn, and Cu-doped ZnO that were formed on an ITO substrate to determine their electrical, structural, surface, and optical characteristics. Various imaging techniques, including X-ray diffractometers, field emission scanning electron microscopy, a UV-VIS spectrophotometer, and a current-voltage measuring device, were used to characterize the necessary attributes. Absorbance and transmittance spectra were obtained from UV-vis spectrometer analyses. The films were analyzed using an APD 2000 PRO XRD device to calculate their spectra, band structure, and band gap energies. The X-ray results were used to determine the films' crystallization levels, half-peak

widths, and Miller indices. Additionally, the films' electrical characteristics were examined using the two-point probe technique. Voltages ranging from -3 to +3 volts were applied by making contact at two different points on the films. The resulting current values were used to draw I-V graphs and determine the transmission mechanisms. Additionally, electrical characteristics such as ideality factor and barrier height were computed for the ZnO sheets. Field emission scanning electron microscopy (FESEM) was used to examine the films' morphological qualities and determine the effect of the base on their surface properties. Surface images of the films were obtained and analyzed to understand the substrate's impact on the surface attributes.

3. Results

X-ray diffraction was used to determine the mode of crystal growth and the phases in which the produced material was formed. The X-ray diffraction patterns revealed a polycrystalline hexagonal (wurtzite) structure of the ZnO thin films produced on a glass substrate at room temperature (Figure 3). These results are consistent with previous findings on ZnO produced using the SILAR method (Alsuntany et al., 2016; Kadem et al., 2017). Figure 3 shows the XRD analysis results of undoped ZnO, Sn-doped ZnO, and Cu-doped ZnO thin films. As shown in Figure 3(a), the dominant diffraction peaks correspond to the ITO substrate, exhibiting the (101), (111), and (002) orientations characteristic of the tetragonal crystal structure. The Cu-doped ZnO films exhibit the most prominent diffraction peaks at (101), (111), and (002), while the Sn-doped ZnO films exhibit the most prominent peaks at (101), (111), and (002). The crystallization levels of the films indicate that the Cu-doped ZnO film is the most compatible, while the undoped ZnO thin film has an amorphous-like structure.

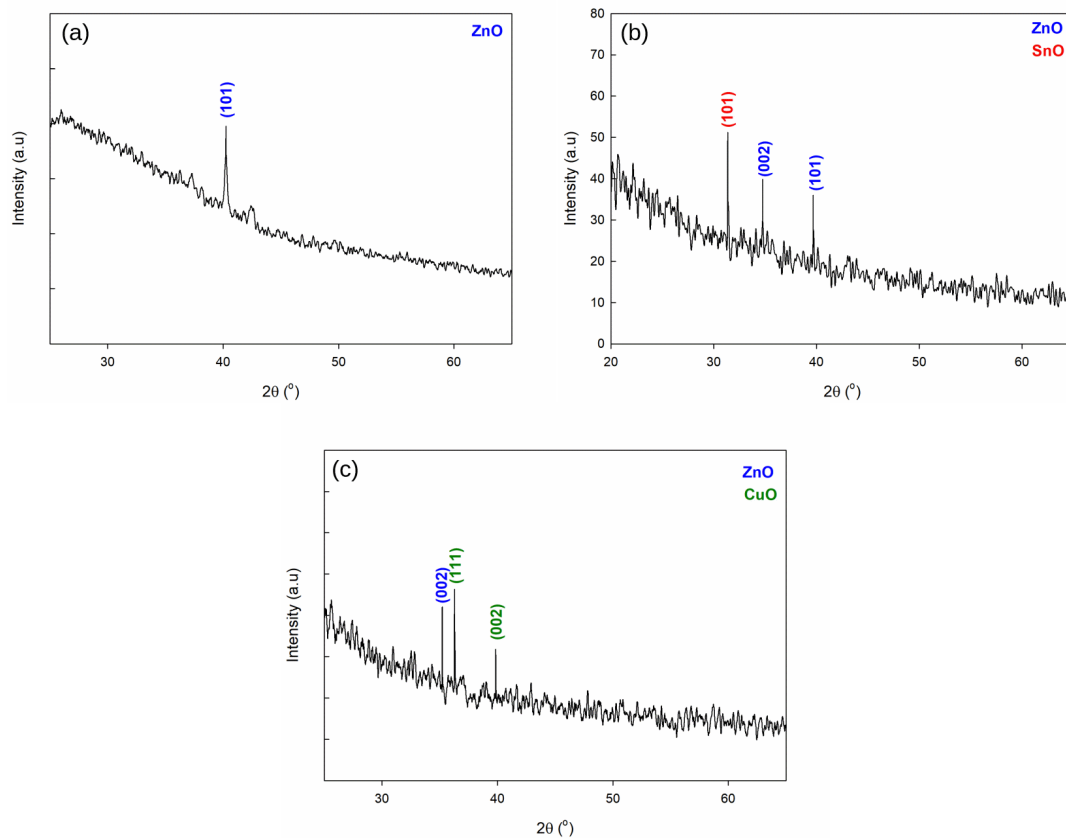


Figure 3. XRD analysis of ITO/ZnO, Sn-doped ZnO, Cu-doped ZnO thin films.

Figure 4 presents FESEM/EDS images of ZnO, Sn and Cu doped ZnO films. The undoped ZnO films exhibit spherical formations on their surface, which appear as a thin layer on the ITO substrate with voids in some regions. In contrast, the Sn-doped ZnO thin films exhibit the growth of nanoflower structures on the ITO substrate, which coalesce in certain regions to form broken layers, while voids are present in other regions. Cu-doped ZnO films form an even layer on the ITO substrate, which is affected by the surface shape. However, this layer may exhibit fractures that create voids in certain areas. These fractures are caused by surface tension during the film growth process.

EDS measurements were performed to understand the elemental composition and compositional ratios of the grown undoped ZnO, Sn-doped ZnO and Cu-doped ZnO samples. The relevant images are given in Figure 4. The EDS spectra of the samples indicate the presence of Al, Si, O, C, and Mg. The presence of Si in the EDS spectrum is attributed to the precursor materials used in the synthesis process and the glass substrate. The presence of magnesium indicates an undesirable impurity during the film synthesis stage. For SEM/EDS analysis of the samples, aluminum studs were used, which explains the presence of the element Al in the studied EDS spectra.

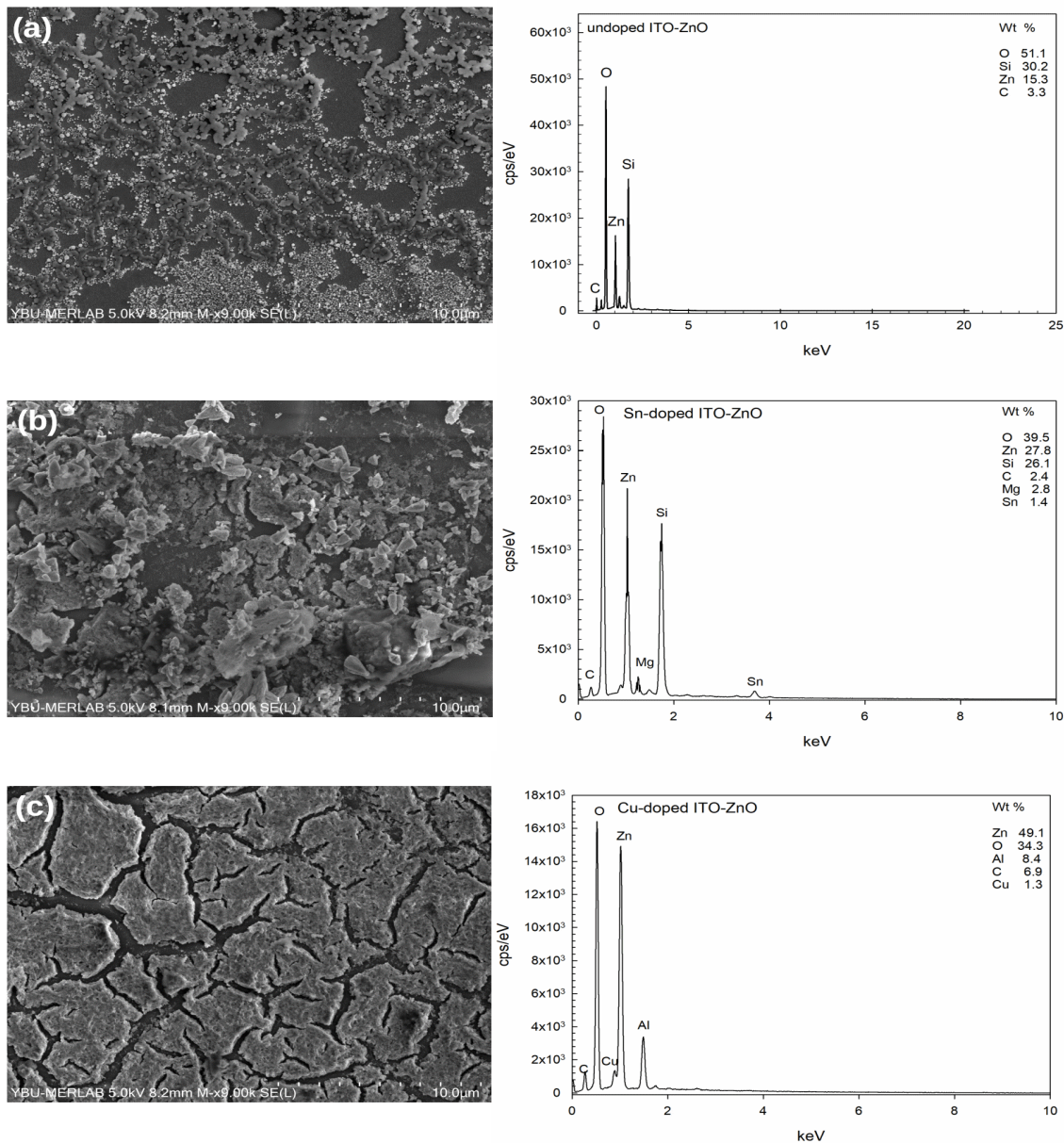


Figure 4. FESEM and EDS analyzes of ITO/ZnO, Sn doped ITO/ZnO, Cu doped ZnO thin films.

The absorbance and transmittance spectra, obtained by measuring the absorption at room temperature, of the undoped ZnO, Sn-doped ZnO, and Cu-doped ZnO thin film samples grown using the SILAR technique, are presented in Figure 5. Sharp and clear band edge formation was observed in all films at wavelengths of less than 300 nm. Figure 5 (b) indicates that the permeability values of ZnO films grown on ITO substrate with Sn and Cu doping increased. Furthermore, the absorption band edges of the films became smoother with the doping of Sn and Cu.

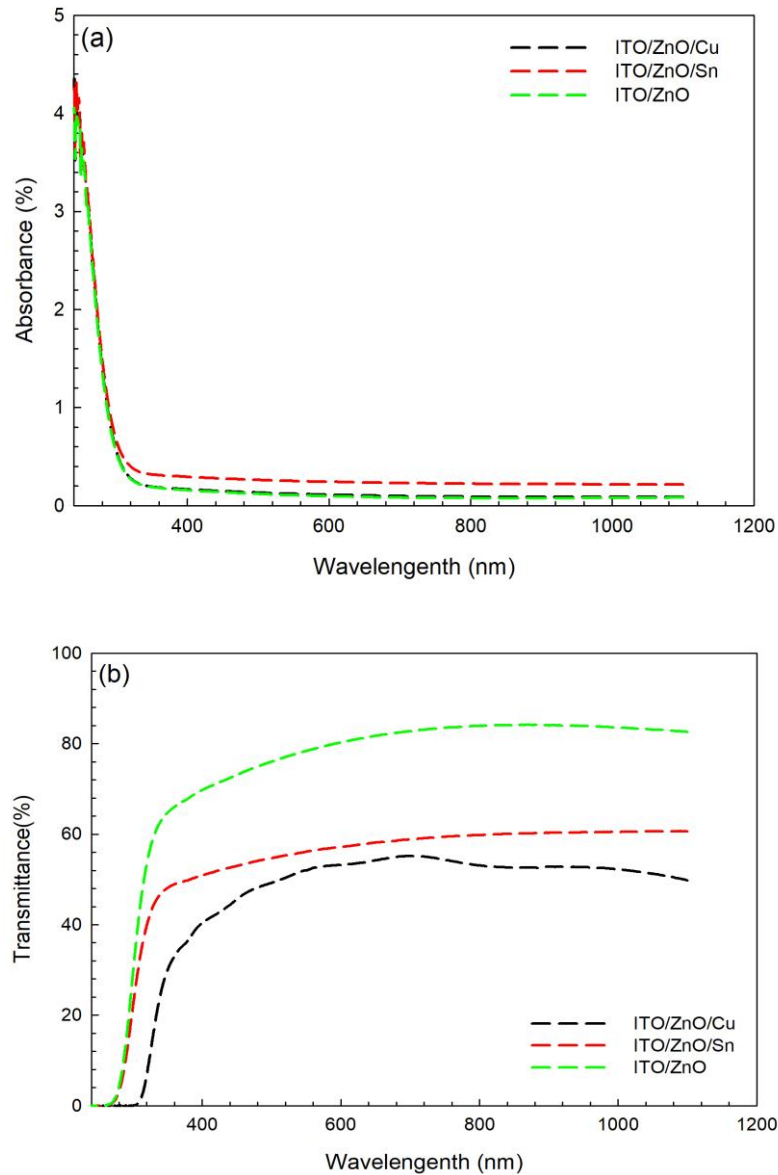


Figure 5. Absorbance and transmittance spectra of (a) ZnO/ITO, (b) Sn doped ZnO/ITO, (c) Cu doped ZnO/ITO films.

Using absorption measurements, the graph of $(\alpha h\nu)^2$ ($\text{eV}\cdot\text{cm}^{-1}$)² as a function of energy was also plotted and the band gap energy (E_g) of the films was calculated, as shown in Figure 6. The bandgap energy values were observed to increase for Sn-doped ZnO thin films, while they decreased for Cu-doped ZnO thin films. These values are consistent with the literature (Kadem et al., 2017).

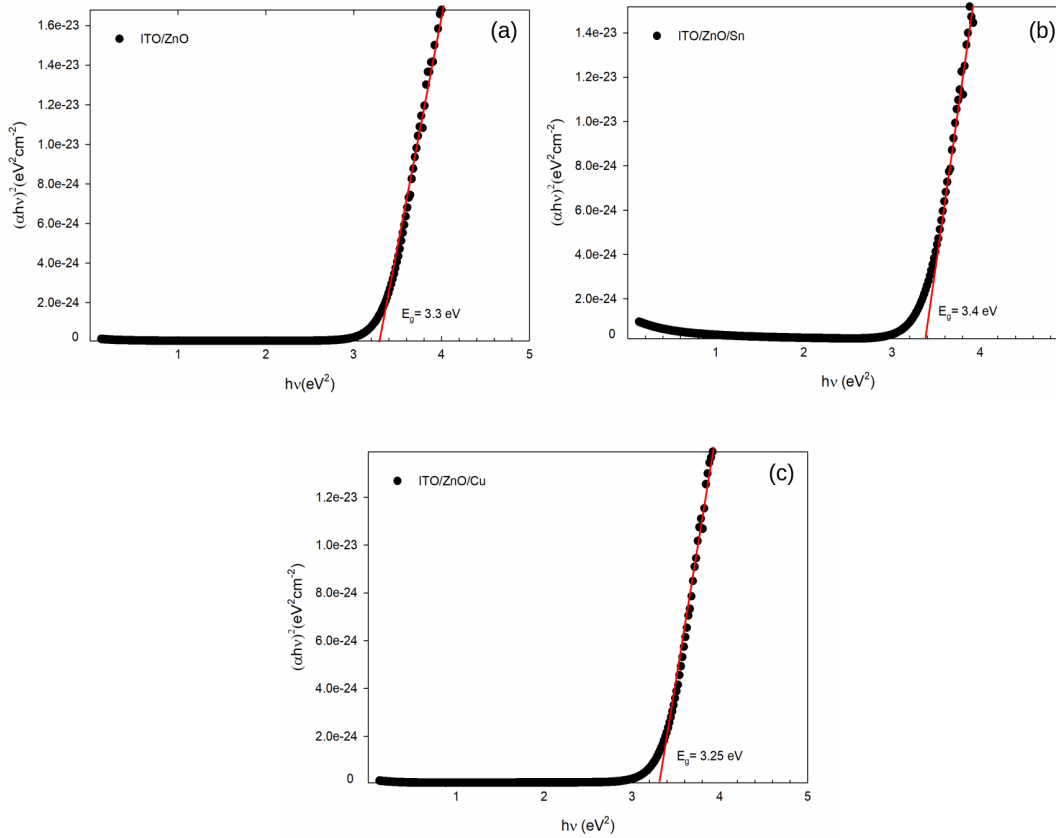


Figure 6. $(\alpha hv)^2$ ($eVcm^{-1}$)² plots of (a) ZnO/ITO, (b) Sn doped ZnO/ITO, (c) Cu doped ZnO/ITO films.

The current-voltage variation was recorded for all samples at room temperature and light between -3V and +3V, as shown in Figure 7 after contact with Ag. ZnO films exhibit behavior that is more similar to that of metals when studying the properties (Current - Voltage) in the dark and the effect of doping on the electrical resistance of ZnO films. All the ZnO thin film exhibits n-type conductivity in this study. However, it does sometimes show semi-conductive properties because it behaves in a manner that is between metals and semiconductors. The log I-V plots of heterostructure are shown in Figure 7. The electrical parameters are given in Table 1. The following relations were used (Sze, 1981);

$$I = I_0 \left[\left(e^{\frac{qV}{nkT}} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

where I_0 is reverse saturation current, q is electronic charge, V is applied voltage, k is Boltzman constant, n is ideality factor and T is temperature (in Kelvin).

$$I_0 = AA^*T^2 e^{\left(\frac{-q\phi_B}{kT} \right)} \quad (6)$$

where A is contact area, A^* is Richardson constant and ϕ_B is barrier height at zero bias. The slope obtained from the I-V graph was used to find the n value and it was found with the Equation 7 obtained from the Equation 6.

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln(I))} \right) \quad (7)$$

barrier height was calculated with Equation (8).

$$\phi_B = \frac{kT}{kq} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \tag{8}$$

Table 1 gives these calculated electrical parameters. The lowest ideality factor was observed in the Cu-doped ZnO thin film, while the highest was seen in the undoped ITO/ZnO thin film. The higher ideality factor value of Sn-doped ZnO films compared to Cu-doped ZnO films can be explained to the presence of natural oxide on the ITO layer and/or high oxygen deficiency (Asghar et al., 2013). Besides, it can be attributed to the improvement in surface morphology and reduction in roughness values with the increase in thickness of the Cu-doped ZnO thin film on the substrate surface. The ZnO/ITO and Sn-doped ZnO/ITO films exhibited an ohmic conduction mechanism and lower resistance than the Cu-doped ZnO/ITO films. The Cu-doped ZnO/ITO films deviated from ohmic behaviour, exhibiting lower resistance with Cu doping and diode properties. The high resistivity of the ZnO-rich thin film is attributed to both grain boundary effects and the semiconducting nature of ZnO. The semiconducting nature of ZnO creates a potential barrier that affects electrical transport, resulting in decreased conductivity. In addition, the increase in the conductivity of Cu-doped ZnO/ITO films may be due to the reduction of oxidations in the structure. The logarithmic current–voltage characteristics of the undoped ZnO/ITO, Sn doped ZnO/ITO and Cu doped ZnO/ITO films are shown in Figure 8. At room temperature for Cu-doped ZnO films is non-linear, indicating the formation of an p-n junction in Cu-doped ZnO/ITO films. In terms of electrical properties, Cu-doped ZnO has been shown to be the superior layer.

Table 1. The electrical parameters of ZnO/ITO, Sn doped ZnO/ITO and Cu doped ZnO/ITO films

Films	I_0 (A)	n	ϕ_B (eV)
Undoped ZnO/ITO	1.43×10^{-7}	4.07	0.789
Sn doped ZnO/ITO	1.01×10^{-5}	4.05	0.761
Cu doped ZnO/ITO	7.13×10^{-8}	3.65	0.695

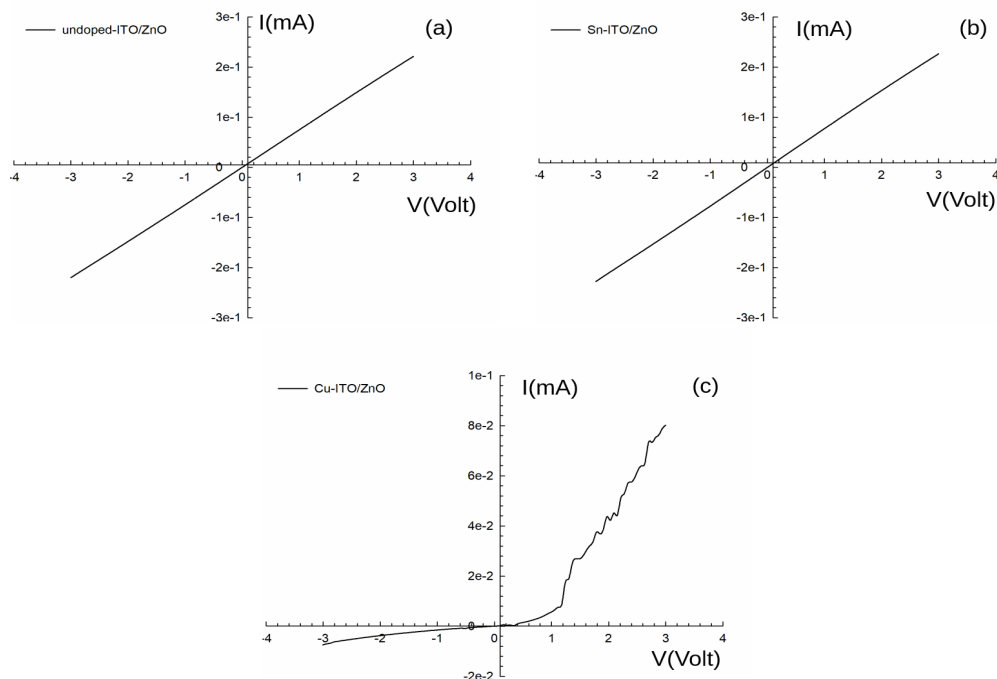


Figure 7. I-V plots of (a) ZnO/ITO, (b) Sn doped ZnO/ITO, (c) Cu doped ZnO/ITO films.

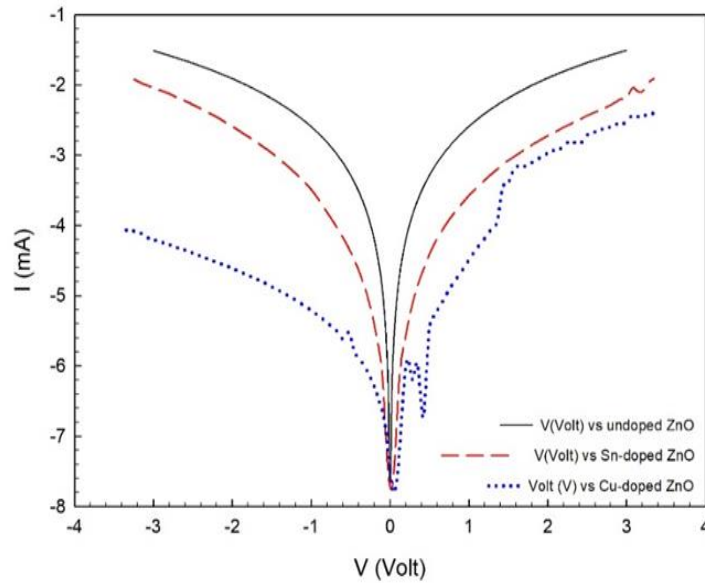


Figure 8. The log I-V plots of (a) ZnO/ITO, (b) Sn doped ZnO/ITO, (c) Cu doped ZnO/ITO films.

4. Discussion

The many desirable optical and electrical properties of ZnO films make it an attractive material for use in sensor development. Doping processes are widely used by researchers to improve the physical and electrical properties of metal oxide semiconductors. In recent years, the SILAR (Sequential Ionic Layer Adsorption and Reaction) method has gained significant popularity compared to other methods in the production of ZnO thin films. This is due to its advantages such as being cost-effective, safe, easy to apply and easy to control various parameters during the synthesis process.

In this study, ZnO, Sn-doped and Cu-doped thin films were successfully grown on ITO substrate using the SILAR technique. In the XRD data analysis results, when the crystallization levels of the films were examined, it was seen that all of the pure ZnO thin films exhibited crystal structure. However, it was determined that Cu doping was more effective in improving the crystal structure of ZnO films than Sn doping. This situation can be examined through studies at different contribution rates. EDS spectra of the produced samples revealed the presence of elements such as Al, Si, O, C and Mg. The presence of Si in the EDS spectra can be attributed to the glass substrate used as the base material in the synthesis process. The presence of Mg is probably due to an undesirable impurity in the film synthesis stage. More suitable production environments can be provided for the removal of such impurities. The band gap energy (E_g) values of the produced thin films are in agreement with the literature.

It was observed that the band gap energy values increased in Sn-doped ZnO thin films and decreased in Cu-doped ZnO thin films. When electrical analyzes were examined, it was determined that Cu doped ZnO/ITO films would be more suitable than other films for solar cells and gas sensor applications.

5. Conclusion

In this study, ZnO/ITO, Sn-doped ZnO/ITO and Cu-doped ZnO/ITO layered heterostructure films were successfully produced using the SILAR technique. All films exhibited wurtzite polycrystalline structure and high crystallization level. Cu doping increased the crystallization level more than Sn doping. While the surface morphology showed nanoflower-like structures with Sn doping, the surface morphology completely changed with Cu doping. With the addition of Cu, films with more homogeneous and fractured surface morphology were obtained. The permeability values of ZnO/ITO

films were increased by 40% and 20% with the addition of Sn and Cu. While the ZnO/ITO band gap value was increased to 3.4 eV with Sn doping, films with a narrower band gap of 3.25 eV were obtained with Cu doping. P-n type conduction feature was imparted to ZnO/ITO films with Cu doping.

References

- Alsultany, F. H., Hassan, Z., & Ahmed, N. M. (2016). Catalyst-free growth of ZnO nanowires on ITO seed layer/glass by thermal evaporation method: effects of ITO seed layer laser annealing temperature. *Superlattices and Microstructures*, 92, 68-79. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2016.01.038>
- Alwadai, N., Mitra, S., Hedhili, M. N., Alamoudi, H., Xin, B., Alaal, N., & Roqan, I. S. (2021). Enhanced-performance self-powered solar-blind UV-C photodetector based on n-ZnO quantum dots functionalized by p-CuO micro-pyramids. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(28), 33335-33344. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c03424>
- Asghar, M., Mahmood, K., Faisal, M., & Hasan, M. A. (2013). Electrical characterization of Au/ZnO/Si Schottky contact. *Journal of Physics: Conference Series*, 439(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/439/1/012030>
- Ashith, V. K., Rao, G. K., Moger, S. N., & Smitha, R. (2018). Effect of post-deposition annealing on the properties of ZnO films obtained by high temperature, micro-controller based SILAR deposition. *Ceramics International*, 44(9), 10669-10676. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.097>
- Chaitra, U., Ali, A. M., Mahesha, M. G., Kompa, A., Kekuda, D., & Rao, K. M. (2021). Property evaluation of spin coated Al doped ZnO thin films and Au/AZO/FTO Schottky diodes. *Superlattices and Microstructures*, 155, 106903. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106903>
- Cruz, M. A., Saldaña-Ramírez, A., Juárez-Ramírez, I., & Torres-Martínez, L. M. (2023). Development of SnO₂-ZnO thin films as a photocatalyst for obtaining alternative fuels through photocatalytic reactions. *Solid State Sciences*, 137, 107112. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2023.107112>
- Devi, K. R., Selvan, G., Karunakaran, M., Raj, I. L. P., Ganesh, V., & AlFaify, S. (2020). Enhanced room temperature ammonia gas sensing properties of strontium doped ZnO thin films by cost-effective SILAR method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 119, 105117. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105117>
- Dhamodharan, P., Manoharan, C., Dhanapandian, S., Bououdina, M., & Ramalingam, S. (2015). Preparation and characterization of spray deposited Sn-doped ZnO thin films onto ITO substrates as photoanode in dye sensitized solar cell. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26, 4830-4839. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-2990-7>
- Gençyılmaz, O. (2018). The effect of different cobalt precursors on the Co doped ZnO films produced by ultrasonic spray pyrolysis. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 13(4), 509-520. <https://doi.org/10.1166/jno.2018.2288>
- Gençyılmaz, O., Akyüz, İ., & Atay, F. (2024). Binary ZnS-ZnO films as an alternative buffer layer for solar cell applications. *Applied Physics A*, 130(4), 227. <https://doi.org/10.1007/s00339-024-07382-1>
- Kadem, B., Banimuslem, H. A., & Hassan, A. (2017). Modification of morphological and optical properties of ZnO thin film. *Karbala International Journal of Modern Science*, 3(2), 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.kijoms.2017.04.003>
- Kaphle, A., & Hari, P. (2018). Enhancement in power conversion efficiency of silicon solar cells with cobalt doped ZnO nanoparticle thin film layers. *Thin Solid Films*, 657, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.05.014>
- Klochko, N. P., Kopach, V. R., Tyukhov, I. I., Zhadan, D. O., Klepikova, K. S., Khrypunov, G. S., ... & Khrypunova, A. L. (2018). Metal oxide heterojunction (NiO/ZnO) prepared by low temperature solution growth for UV-photodetector and semi-transparent solar cell. *Solar Energy*, 164, 149-159. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.054>
- Klochko, N. P., Klepikova, K. S., Kopach, V. R., Tyukhov, I. I., Starikov, V. V., Sofronov, D. S., ... & Khrypunova, A. L. (2019). Development of semi-transparent ZnO/FTO solar thermoelectric

- nanogenerator for energy efficient glazing. *Solar Energy*, *184*, 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.002>
- Kumar, A., Joseph, S., Tsechansky, L., Privat, K., Schreiter, I. J., Schüth, C., & Graber, E. R. (2018). Biochar aging in contaminated soil promotes Zn immobilization due to changes in biochar surface structural and chemical properties. *Science of the Total Environment*, *626*, 953-961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.157>
- Li, L., Gao, S., Zhang, Z., Tang, Y., Zhao, Y., Guo, J., & Yang, P. (2024). Optical control of Cu/ZnO composite film for solar battery. *Chemical Physics Letters*, *839*, 141110. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2024.141110>
- Rajamanickam, S., Mohammad, S. M., Razak, I. A., Abed, S. M., & Muhammad, A. (2024). Enhanced performance of PFO-ZnO nanorods nanocomposite photodiodes grown on ZnO NRs/ZnO/ITO-coated glass. *Optical Materials*, *148*, 114818. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114818>
- Rashid, M. H., Sujoy, S. I., Rahman, M. S., & Haque, M. J. (2024). Aloe vera assisted green synthesis of Ag and Cu co-doped ZnO nanoparticles and a comprehensive analysis of their structural, morphological, optical, electrical and antibacterial properties. *Heliyon*, *10*(3), e25438. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25438>
- Saini, M., Singh, R., Mitra, A., & Som, T. (2020). Photoresponse of pulsed laser deposited ZnO: Cu thin films. *Solar Energy*, *207*, 228-234. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.072>
- Saravanan, K., Sen, S., Sharma, C., Amirthapandian, S., Ganesan, K., Gupta, M., ... & Shekar, N. C. (2023). Room temperature excitonic emission in highly aligned ZnO nanostructures prepared by glancing angle Xe⁺ ion irradiation. *Journal of Luminescence*, *263*, 120059. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2023.120059>
- Solaymani, S., Țălu, Ș., Nezafat, N. B., Dejam, L., Shafiekhani, A., Ghaderi, A., & Zelati, A. (2021). Optical properties and surface dynamics analyses of homojunction and heterojunction Q/ITO/ZnO/NZO and Q/ITO/ZnO/NiO thin films. *Results in Physics*, *29*, 104679. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104679>
- Sze, S. M. (1981). *Physics of semiconductor devices* (2nd ed.). Newyork, USA:Wiley.
- Şahin, B., Aydın, R., Soylu, S., Türkmen, M., Kara, M., Akkaya, A., ... & Ayyıldız, E. (2022). The effect of thymus syriacus plant extract on the main physical and antibacterial activities of ZnO nanoparticles synthesized by SILAR method. *Inorganic Chemistry Communications*, *135*, 109088. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.109088>
- Tang, Z., Fan, Z. Y., Fang, J. L., Zhang, L., Sun, Q. J., Zhang, D., ... & Jiang, X. (2024). Transparent artificial synapses based on Ag/Al-doped ZnO/ITO memristors for bioinspired neuromorphic computing. *Materials Letters*, *354*, 135342. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135342>
- Thobega, M., Maabong-Tau, K., Lefatshe, K., & Muiva, C. (2024). Study of structural, optical and electrical properties of Nickel doped ZnO (Ni-ZnO) nanorods grown by chemical bath deposition. *Physica B: Condensed Matter*, *673*, 415500. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415500>
- Wang, C. F., Liu, N., & Hu, B. (2018). Improved white light emission from ZnS: Mn/ZnO/GaN core-shell nanorods array. *Journal of Luminescence*, *204*, 424-427. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.08.048>
- Wang, C. (2023). Fabrication and optical-electrical characteristics of ZnS/ZnO films by pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*, *780*, 139971. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.139971>
- Xiao, D., Wang, Y., Zhang, D., Liu, Y., Wang, H., Li, Y., ... & Sun, M. (2024). CuO/ZnO hollow nanocages derived from metal-organic frameworks for ultra-high and rapid response H₂S gas sensor. *Ceramics International*, *50*, 15767-15779. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.057>
- Zhang, D., Liu, Y. H., & Zhu, L. (2022). Surface engineering of ZnO nanoparticles with diethylenetriamine for efficient red quantum-dot light-emitting diodes. *Iscience*, *25*, 105111. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105111>



Research Article

Gamma Radiation Shielding Efficiency of High Entropy Alloys: A Comparative Study

Ufuk PERİŞANOĞLU*

Hakkari University, Engineering Faculty, Materials Science and Engineering Department, 30000, Hakkari, Türkiye

Ufuk PERİŞANOĞLU, ORCID No: 0000-0003-4110-2241

*Corresponding author e-mail: ufukperisanoglu@hakkari.edu.tr

Article Info

Received: 07.06.2024
Accepted: 10.07.2024
Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1497606

Keywords

Buildup factor,
Effective atomic number,
Gamma shielding,
Half-value layer,
High entropy alloys,
Mass attenuation coefficient

Abstract: High entropy alloys (HEAs) represent a novel class of materials characterized by their unique composition of four or more principal elements in near-equiatomic ratios, offering exceptional properties for various applications. This study investigates the gamma radiation shielding parameters of selected HEAs, namely FeCoNiCrMn, TaNbHfZrTi, NbMoTaW, AlMoNbV, and NbTaTiV. Mass attenuation coefficients (MAC) were calculated by using EpiXS program over a photon energy range of 0.015-15 MeV and these results were verified using with the WinXCOM software. The results show that the MAC values are highest at low photon energies due to the photoelectric effect, with notable peaks corresponding to the K-shell absorption edges of specific elements. At photon energy of 0.015 MeV, the MAC values for the FeCoNiCrMn, TaNbHfZrTi, NbMoTaW, AlMoNbV, and NbTaTiV alloys are 57.6, 90.4, 98.9, 27.8, and 81.5 cm²/g, respectively. Among these alloys, NbMoTaW exhibits the highest MAC value, whereas AlMoNbV displays the lowest. The half-value layer (HVL) and mean free path (MFP) values were also found thinner for NbMoTaW at all of the photon energies. Additionally, the effective atomic number (Z_{eff}) and exposure buildup factors (EBF) were analyzed. The results demonstrate that NbMoTaW and TaNbHfZrTi, offer superior radiation shielding capabilities compared to conventional shielding materials, with higher usability in environments subjected to gamma radiation. These findings underscore the promise of HEAs in advanced shielding applications, showcasing their ability to enhance safety and performance in sectors with high demands.

**Yüksek Entropili Alaşımların Gama Radyasyonundan Koruma Etkinliği:
Karşılaştırmalı Bir Çalışma**

Makale Bilgileri

Geliş: 07.06.2024
Kabul: 10.07.2024
Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1497606

Anahtar Kelimeler

Birikim faktörü,
Etkin atom numarası,
Gama zırlama,
Kütle azaltma katsayısı,
Yarı değer kalınlığı,
Yüksek entropili alaşımlar

Öz: Yüksek entropili alaşımlar (HEA'lar), yaklaşık eşit oranlarda dört veya daha fazla temel elementin benzersiz bileşimiyle karakterize edilen ve çeşitli uygulamalar için olağanüstü özellikler sunan yeni bir malzeme sınıfını temsil eder. Bu çalışma, FeCoNiCrMn, TaNbHfZrTi, NbMoTaW, AlMoNbV ve NbTaTiV gibi seçili HEA'ların gama zırlama parametrelerini araştırmaktadır. EpiXS programı kullanılarak 0.015-15 MeV enerji aralığında kütle azaltma katsayıları (MAC) hesaplanmış ve bu sonuçlar WinXCOM yazılımı ile doğrulanmıştır. Bulgular, MAC değerlerinin, fotoelektrik etki nedeniyle düşük foton enerjilerinde en yüksek olduğunu ve belirli elementlerin K-soğurma kıyılarına karşılık gelen belirgin pikler gösterdiğini ortaya koymaktadır. 0,015 MeV foton enerjisinde, FeCoNiCrMn, TaNbHfZrTi, NbMoTaW, AlMoNbV ve NbTaTiV alaşımları için MAC değerleri sırasıyla 57.6, 90.4, 98.9, 27.8 ve 81.5 cm²/g'dır. Bu alaşımlar arasında NbMoTaW en yüksek MAC değerini sergilerken, AlMoNbV en düşük değeri göstermektedir. Yarı kalınlık (HVL) ve ortalama serbest yol (MFP) değerleri de tüm foton enerjilerinde NbMoTaW için daha ince bulunmuştur. Ayrıca, etkin atom numarası (Z_{eff}) ve maruz kalma

birikim faktörleri (EBF) de analiz edilmiştir. Sonuçlar, NbMoTaW ve TaNbHfZrTi'nin, geleneksel koruma malzemelerine kıyasla üstün radyasyon koruma yetenekleri sunduğunu ve gama radyasyonuna maruz kalan ortamlarda daha yüksek kullanılabilirlik sağladığını göstermektedir. Bu bulgular, HEA'ların gelişmiş zırhlama uygulamalarında vaat ettiklerinin altını çizerek, yüksek taleplerin olduğu sektörlerde güvenlik ve performansı artırma yeteneklerini ortaya koymaktadır.

1. Introduction

High entropy alloys (HEAs) mark a notable departure from traditional alloy design. These alloys are different because they consist of five or more elements mixed in nearly equal proportions, rather than having a single primary metal with small amounts of other elements added. This design strategy leads to a high mixing entropy. As a result, HEAs exhibit a unique combination of properties, such as increased strength, hardness, and improved resistance to wear and corrosion (Buluc et al., 2017; Filho et al., 2020; Yaykaşlı, et al., 2023a). These alloys are especially valuable for their potential use in environments that face extreme conditions, such as high temperatures and corrosive settings. The distinctive makeup of HEAs contributes to markedly improved properties, including impact resistance, stability at high temperatures, and biocompatibility (Socorro-Perdomo et al., 2021). The wide range of possible alloy combinations also results in an unparalleled variety of configurations, allowing properties to be customized to meet specific engineering requirements. The field has experienced rapid growth, driven by international collaborations and scientific workshops to share recent advances and explore future research avenues. For example, a major international workshop held in China in 2014 aimed to enhance discussions on scientific challenges and identify critical areas for further development of HEAs (Lu et al., 2015).

As knowledge of HEAs deepens, attention has shifted from simply grasping their fundamental properties to investigating their practical uses. These include applications in ballistic protection and potential uses in the aerospace and automotive industries, which capitalize on their superior mechanical properties and resistance to deformation under stress (Filho et al., 2020).

High entropy alloys thus emerge as a promising category of materials that defy conventional metallurgical methods with their innovative properties and extensive potential for application across various high-demand sectors. Continuing the exploration of high entropy alloys (HEAs), these materials are distinguished by their inherent ability to endure harsh operating conditions. A key characteristic of HEAs is their outstanding high-temperature properties, making them ideal for use in turbine blades in jet engines and components in nuclear reactors. These alloys maintain a stable microstructure at high temperatures, preserving their strength and resisting oxidation and wear for long durations (Müller et al., 2019; Ren et al., 2022).

Research has further demonstrated the adaptability of HEAs by incorporating elements such as Yttrium, which significantly boosts mechanical properties by refining the microstructure and improving phase stability. This type of elemental adjustment creates opportunities to tailor alloys for specific performance requirements, offering customized solutions for industries needing materials with highly specialized performance characteristics (Ren et al., 2022). The field of HEAs is also branching into the area of amorphous alloys, applying the high entropy concept to non-crystalline materials. These high entropy amorphous alloys (HEAAs) are attracting interest for their ability to merge the advantages of amorphous materials (i.e high strength and soft magnetic properties) with the thermal stability and resistance to crystallization typical of the high entropy approach (Tunes et al., 2023). Overall, high entropy alloys embody a dynamic area within materials science that consistently extends the limits of alloy design and applications. Their evolution is driven by both theoretical understanding and experimental breakthroughs, opening up promising new pathways for advancements in materials technology.

Recently, many studies have been conducted on the usability of HEAs in nuclear applications. Lu et al. successfully synthesized Ti₂ZrHfV_{0.5}Mo_{0.2} and investigated its suitability for nuclear applications in detail. The results obtained indicate that the displacement damage (dpa: Displacement

per atom) of the synthesized HEA has a small value of 0.03 and is promising as an alternative to currently used nuclear materials (Lu et al., 2019). Jia et al. successfully synthesized TiVNbTa HEA and investigated its suitability for nuclear applications under He bombardment. Their results showed that TiVNbTa refractory alloy has a small enough dpa (0.3) value to be promising for nuclear applications (Jia et al., 2021).

In another study, Zhang et al. (2021) calculated the radiation resistance of Mo0.5NbTiVCr0.25 and Mo0.5NbTiV0.5Zr0.25 refractory alloys with He ion radiation. Both refractory alloys were found to have high radiation resistance and are promising for nuclear applications. Ferreirós et al. (2023) synthesized VNbCrMo refractory alloy using arc melting method and neutron absorption properties were investigated. The results showed that VNbCrMo refractory alloy has the potential to be used for nuclear applications. In other study on boron nitride nanosheet-reinforced WNbCoFeCr HEAs demonstrated significant improvements in structural, physical, mechanical, and radiological shielding properties with the addition of B4C, making them suitable for radiation protection applications (Kavaz et al., 2022). Yayaşlı et al. (2023b) produced a new high-entropy alloy, CoCrFeNiAg, and determined its radiation shielding properties experimentally using a ¹³⁷Cs source and a NaI(Tl) detector system. The results showed that HEA has excellent radiation shielding properties and these properties are promising for use in nuclear technology and the radiation industry. They also showed that the crystal size decreases with increasing alloying time and the synthesized alloy exhibits thermal stability over a wide temperature range.

In this study, the gamma radiation shielding parameters of some HEAs, i.e. “FeCoNiCrMn, TaNbHfZrTi, NbMoTaW, AlMoNbV and NbTaTiV (Shang et al., 2021)” were comprehensively evaluated, MAC, HVL, MFP, Z_{eff} and buildup factors of selected HEAs in the photon energy range of 0.015-15 MeV were obtained and the results were evaluated in terms of radiation shielding.

2. Material and Methods

The mass attenuation coefficient (MAC) quantifies the likelihood of interaction per unit mass for a given shielding material. It is formulated according to the Beer-Lambert law, as shown in Equations 1 and 2 (Rammah et al., 2020).

$$MAC = \mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho t} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (1)$$

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (2)$$

In these equations I_0 represents the incident photon intensity, I denotes the attenuated photon intensity, and t is the thickness of the sample. The linear attenuation coefficient is denoted by μ , while μ/ρ represents the mass attenuation coefficient.

Another shielding parameter related to the linear attenuation coefficient is the mean free path (MFP), which is the average distance a photon travels through a material before interacting. The MFP is determined by Equation 3 (Yıldız Yorgun, 2019).

$$MFP = 1/\mu \quad (3)$$

The half-value layer (HVL) is the thickness of material required to attenuate radiation intensity by half. The HVL can be calculated using Equation 4 (Issa et al., 2020).

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (4)$$

Composite materials, which consist of multiple elements, contain a large number of atoms and electrons at a specific energy level. In such cases, the effective atomic number (Z_{eff}) can be calculated using Equation 5 (Perişanoğlu et al., 2020).

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{\sum_j \frac{A_j}{Z_j} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_j} \quad (5)$$

When gamma rays interact with a material via Compton scattering, secondary photons are produced with energies equal to or lower than the incident photons. These photons deposit their energy into the medium, leading to secondary radiation. This phenomenon can be quantified using the "buildup factor." The Buildup Factor is defined as the ratio of the total radiation value at a specific point within a medium to the contribution of radiation reaching that point without any interaction. There are two types of buildup factors:

Energy Absorption Buildup Factor (EABF) focuses on photon absorption as the quantity of interest. Exposure Buildup Factor (EBF) pertains to the amount of radiation exposure to air after passing through the absorber. These definitions and distinctions are well-documented in the literature (Harima, 1993; Ekinici et al., 2019; Issa et al., 2019). In this study, the EABF and EBF values for the alloys were calculated using the EpiXS program (Hila et al., 2021) employing the Geometric Progression (GP)-Fitting method. Detailed computational steps for these calculations can be found in many previous works (Kavaz, 2019; Abouhaswa & Kavaz, 2020; Kavaz et al., 2020).

3. Results

In this study, the gamma radiation shielding parameters of some selected high entropy alloys FeCoNiCrMn, TaNbHfZrTi, NbMoTaW, AlMoNbV and NbTaTiV (Shang et al., 2021) have been extensively investigated. For this purpose, the mass attenuation coefficients (MAC, cm²/g) of the selected alloys in a wide photon energy range of 0.015-15 MeV were obtained by EpiXS software (Hila et al., 2021). EpiXS is a specialized software program designed for calculating mass attenuation coefficients and other photon interaction parameters, offering precise computational capabilities for radiation shielding studies. The verification of the obtained results was carried out with the results obtained with WinXCOM software (Gerward et al., 2004). WinXCOM is a widely used software tool for calculating photon cross-sections and mass attenuation coefficients, providing reliable and validated results for various materials. The results are listed in Table 1 and the variation of MAC values with photon energy is presented in Figure 1. From Figure is seen that the change in MAC values shows that the matter interacts with the photon in different ways. Since the photoelectric effect is dominant at low energies, MAC values have the highest values. It is seen that MAC values decrease rapidly as the energy increases. However, small sudden peaks occur around 20 keV and 70 keV. The peaks around 20 keV are the K shell absorption edges of Nb and Mo (18.98 and 19.99 keV) and around 70 keV are the K shell absorption edges of Ta, W and Hf (65, 67 and 69 keV).

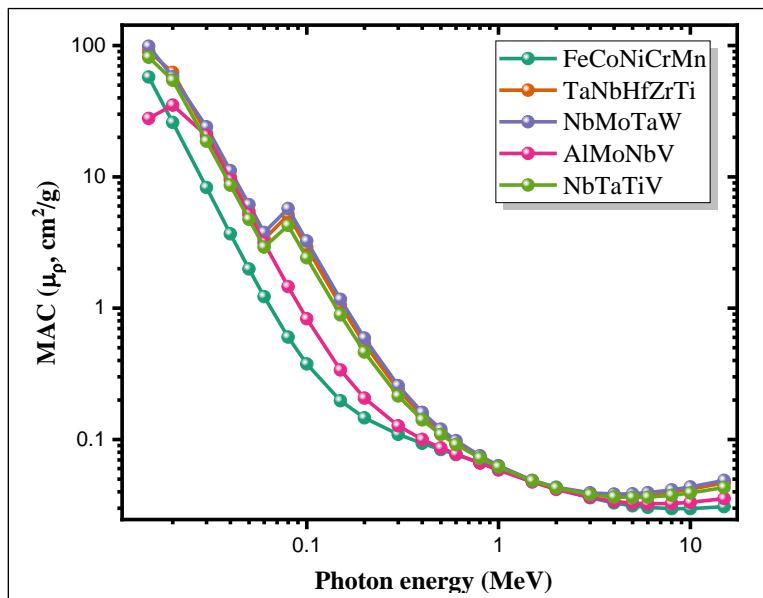


Figure 1. Variation of mass attenuation coefficient (MAC) against photon energy for the HEA samples.

Since the Compton scattering process is active in the medium energy region (Z/E), the MAC values have the lowest values in the 0.4-3 MeV range due to secondary scattering. Beyond 3 MeV, MAC values start to increase again. Since the photon-matter interaction cross-section is proportional to Z^2 in the pair formation process, MAC values increase with the increase in the atomic number of the elements in the alloys. From Table 1, at 0.015 MeV, MAC values are 57.6, 90.4, 98.9, 27.8 and 81.5 cm^2/g for FeCoNiCrMn, TaNbHfZrTi, NbMoTaW, AlMoNbV and NbTaTiV alloys, respectively. NbMoTaW alloy has the highest MAC values, while AlMoNbV has the lowest MAC values.

Figure 2 shows the variation of half value layer (HVL) for selected high entropy alloys. The HVL refers to the half-thickness of a material and is used to assess the radiation shielding capacity of the material. At low energies (up to 0.1 MeV), the HVL values of all alloys are low and very close to each other. As the energy increases (towards 10 MeV), the HVL values of all alloys increase, meaning that at higher energies these materials need to be thicker. The alloy with the highest HVL values is NbMoTaW, while the alloy with the lowest HVL values is AlMoNbV. The NbTaTiV alloy has an average HVL value and shows less HVL increase with increasing energy compared to other alloys. TaNbHfZrTi and FeCoNiCrMn alloys follow a similar trend and have similar HVL values with increasing energy. For high-energy photons, NbMoTaW alloy provides the highest protection, while AlMoNbV alloy is effective at lower energies.

Table 1. Mass attenuation coefficients (μ_p , cm^2/g) for HEA samples found with EpiXS and WinXCOM

Photon energy (MeV)	Mass attenuation coefficient(cm^2/g)									
	FeCoNiCrMn		TaNbHfZrTi		NbMoTaW		AlMoNbV		NbTaTiV	
	WinX	EpiXS	WinX	EpiXS	WinX	EpiXS	WinX	EpiXS	WinX	EpiXS
0.015	57.551	57.617	90.771	90.499	99.398	98.911	27.967	27.863	81.795	81.519
0.02	25.938	25.980	62.305	62.406	69.243	57.728	59.210	35.159	54.433	54.516
0.03	8.269	8.289	21.446	21.464	24.037	24.059	20.574	20.600	18.666	18.683
0.04	3.673	3.684	9.960	9.950	11.189	11.176	9.449	9.462	8.653	8.643
0.05	1.982	1.988	5.497	5.469	6.179	6.150	5.143	5.153	4.773	4.752
0.06	1.219	1.223	3.397	3.352	3.816	3.774	3.132	3.142	2.952	2.919
0.08	0.601	0.603	5.126	5.135	5.726	5.736	1.455	1.460	4.258	4.266
0.1	0.375	0.376	2.901	2.908	3.244	3.247	0.828	0.830	2.421	2.424
0.15	0.197	0.197	1.049	1.052	1.166	1.168	0.338	0.338	0.888	0.890
0.2	0.146	0.146	0.536	0.537	0.590	0.592	0.206	0.207	0.462	0.463
0.3	0.110	0.110	0.239	0.239	0.257	0.257	0.127	0.127	0.214	0.214
0.4	0.094	0.094	0.152	0.152	0.161	0.161	0.100	0.100	0.141	0.141
0.5	0.084	0.084	0.115	0.115	0.120	0.120	0.087	0.086	0.109	0.109
0.6	0.077	0.077	0.095	0.095	0.098	0.098	0.078	0.078	0.092	0.092
0.8	0.067	0.067	0.074	0.074	0.075	0.075	0.066	0.066	0.073	0.072
1	0.060	0.060	0.063	0.063	0.063	0.063	0.059	0.059	0.062	0.062
1.5	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.048	0.047	0.049	0.049
2	0.042	0.042	0.043	0.043	0.043	0.043	0.042	0.042	0.043	0.043
3	0.036	0.036	0.039	0.039	0.039	0.039	0.036	0.036	0.038	0.038
4	0.033	0.033	0.038	0.038	0.038	0.038	0.034	0.034	0.037	0.037
5	0.031	0.031	0.038	0.038	0.039	0.039	0.033	0.033	0.036	0.036
6	0.030	0.030	0.038	0.038	0.039	0.039	0.032	0.032	0.036	0.036
8	0.030	0.030	0.040	0.040	0.041	0.041	0.033	0.033	0.038	0.038
10	0.030	0.030	0.042	0.042	0.044	0.044	0.033	0.033	0.039	0.039
15	0.031	0.031	0.047	0.047	0.049	0.049	0.036	0.036	0.043	0.043

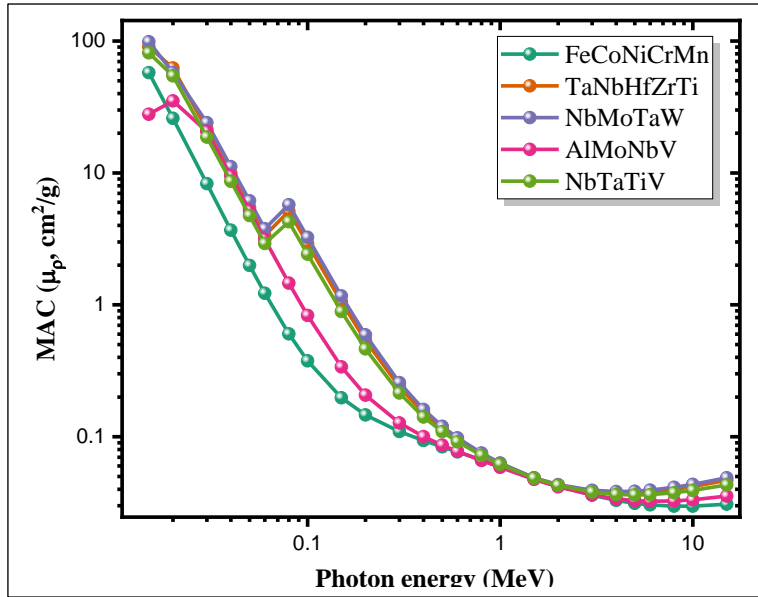


Figure 2. Variation of half value layer (HVL) against photon energy for the HEA samples.

Figure 3 shows the mean free path (MFP) values of the proposed high entropy alloys and conventional shielding materials as a function of photon energy. As with the HVL, at low energies, the MFP values of all materials are low and close to each other. As the energy increases, the MFP values of all materials increase, meaning that at higher energies the photon absorption capacity of these materials decreases. RS520 commercial glass is the conventional material with the best radiation shielding capacity. Conventional shielding materials such as concretes and commercial glasses have moderate MFP values and may be less effective in a given energy range compared to high entropy alloys. NbMoTaW alloy has lower MFP values compared to other high-entropy alloys and conventional materials at all energies, meaning they provide more effective radiation protection. Overall, however, it can be said that all of the selected high-entropy alloys are better than conventional materials in attenuating gamma radiation.

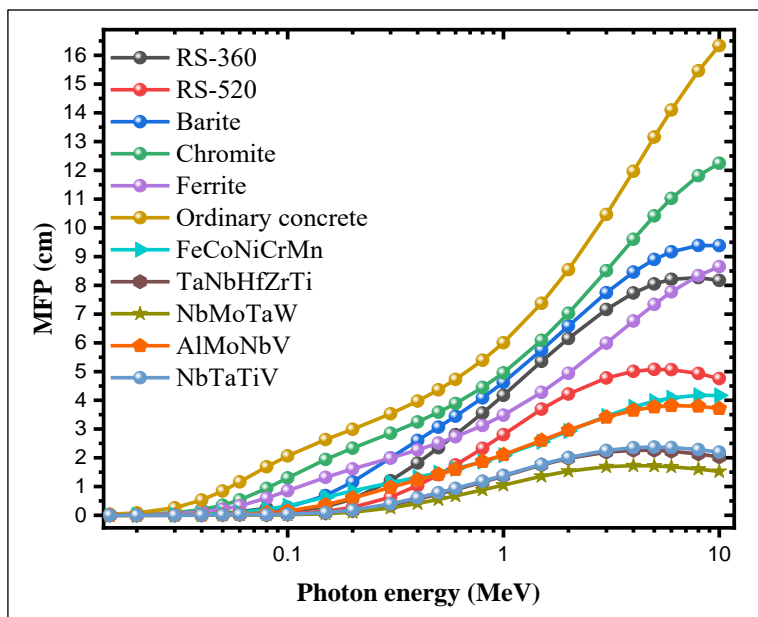


Figure 3. Comparison of MFP values of HEA samples with commonly used shielding materials.

Figure 4 provides a detailed view of how different HEA samples perform in terms of their effective atomic number (Z_{eff}) in the range 0.015-15 MeV of photon energy. In the 0.015-0.1 MeV energy range, Z_{eff} takes the largest values due to the variation of the photoelectric absorption cross-section with Z^{4-5} . Around 20 keV, the Z_{eff} values of Nb and Mo and around 70 keV of Ta, W and Hf show sudden increases due to the K layer absorption edges. At intermediate and high energies, the Z dependence of the photon-matter interaction decreases. Therefore, the Z_{eff} change is slow in these regions. NbMoTaW and TaNbHfZrTi alloys are characterized by high Z_{eff} values in all energy regions. On the other hand, FeCoNiCrMn and NbTaTiV alloys are less effective compared to other alloys with low and constant Z_{eff} values.

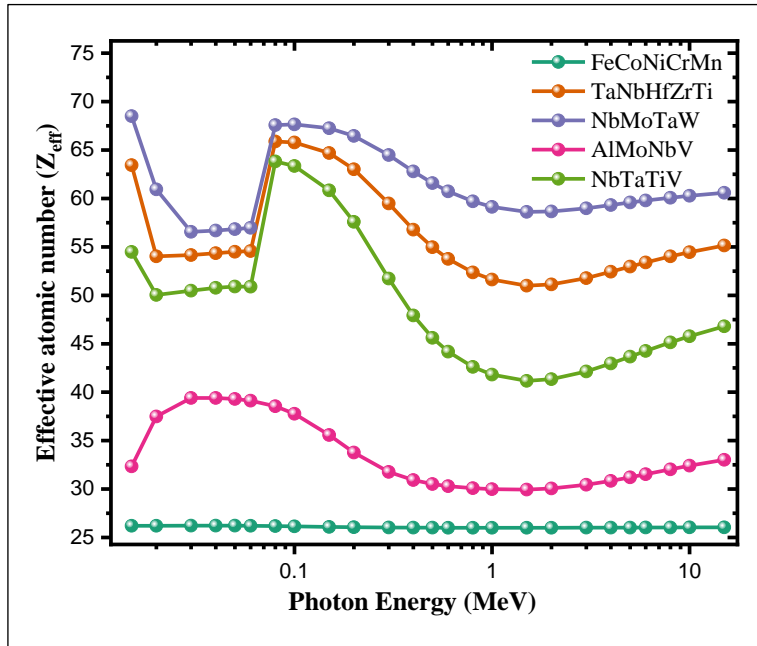


Figure 4. Variation of effective atomic number (Z_{eff}) against photon energy for the HEA samples.

Figure 5 presents the EBF values of five HEAs over a wide range of photon energies at penetration depths of 1-15 mfp. For all samples, the EBF starts from a lower value at the lowest energies, increases to a peak as the energy increases and decreases again at higher energies. Except for FeCoNiCrMn, for the other alloys there is a sharp increase in EBF values at low photon energies (around 0.02 and 0.07 MeV), indicating high interaction and accumulation. These increases are due to the absorption edges of the high atomic number elements in the four alloys. The peak of the EBF shifts to lower energies as the thickness of the material increases. This indicates that for thicker materials, the maximum exposure buildup occurs at lower photon energies. As the material becomes thicker (more MFP), the peak EBF value becomes higher. This means that thicker materials have a greater buildup factor, likely due to more opportunities for photons to scatter within the material. The initial rise, peak, and subsequent fall of the EBF with energy result from the complex interaction between different types of photon interactions with matter, such as photoelectric absorption, Compton scattering, and pair production. At low energies, FeCoNiCrMn alloy has the lowest EBF values. NbMoTaW and TaNbHfZrTi alloys, which have the highest Z_{eff} values in the medium energy range, have the lowest EBF values and are the best radiation absorbers. At high energies, since the photon-matter interaction changes with Z^2 , FeCoNiCrMn and AlMoNbV alloys with the lowest Z_{eff} values have the lowest EBF values. When all radiation shielding parameters are examined, NbMoTaW and TaNbHfZrTi alloys have higher usability as radiation shields.

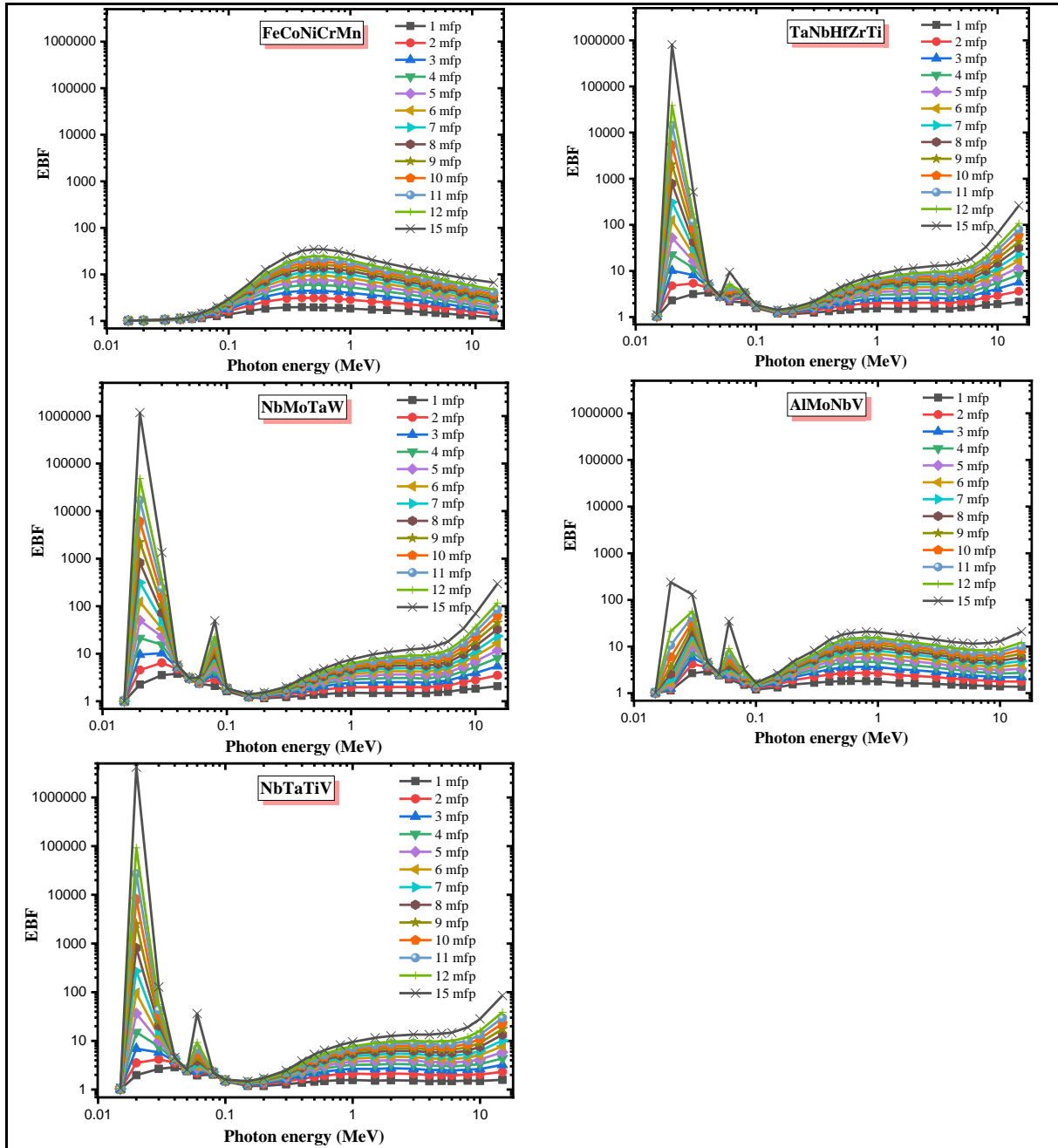


Figure 5. Variation of exposure build-up factors (EBF) against photon energy at different penetration depths for HEA samples.

4. Discussion and Conclusion

This study provides a comprehensive evaluation of the gamma radiation shielding capabilities of selected high entropy alloys (HEAs), namely FeCoNiCrMn, TaNbHfZrTi, NbMoTaW, AlMoNbV, and NbTaTiV. The key findings are as follows:

1. The MAC values were calculated using the EpiXS program across a photon energy range of 0.015-15 MeV and were verified using WinXCOM software. The results indicate that MAC values are highest at low photon energies due to the photoelectric effect, with notable peaks corresponding to the K-shell absorption edges of specific elements. Alloys containing heavy elements were found to have larger MAC values. For 0.015 MeV, the MAC for the FeCoNiCrMn, TaNbHfZrTi, NbMoTaW, AlMoNbV, and NbTaTiV alloys are 57.6, 90.4, 98.9, 27.8, and 81.5 cm²/g, respectively. Among these alloys, NbMoTaW demonstrates the highest MAC value, while AlMoNbV shows the lowest.

2. The HVL and MFP values suggest that thicker HEA samples are required to achieve effective shielding at higher photon energies. Specifically, NbMoTaW showed the highest MAC and lowest HVL values, indicating superior shielding capabilities, while AlMoNbV have the lowest.
3. The effective atomic number (Z_{eff}) and EBF analyses revealed that NbMoTaW and TaNbHfZrTi alloys have higher radiation shielding potential compared to conventional materials. These alloys exhibited higher Z_{eff} values across all energy regions, suggesting better photon interaction and absorption characteristics.
4. Among the studied alloys, NbMoTaW and TaNbHfZrTi demonstrated the best overall performance in gamma radiation shielding. They provide higher usability in environments subjected to gamma radiation, outperforming traditional shielding materials.

The findings from this study underscore the potential of HEAs in advanced shielding applications. Their unique combination of high MAC values at low energies, lower HVL and MFP values at higher energies, and superior Z_{eff} and EBF performance makes them promising candidates for enhancing safety and performance in sectors requiring effective radiation shielding. Furthermore, this study demonstrates the superior radiation shielding capabilities of HEAs by establishing the comparative performance of selected HEAs with conventional shielding materials. This provides an important benchmark for future studies and highlights the superior performance of HEAs.

References

- Abouhaswa, A. S., & Kavaz, E. (2020). Bi₂O₃ effect on physical, optical, structural and radiation safety characteristics of B₂O₃-Na₂O-ZnO-CaO glass system. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 535, 119993. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119993>
- Buluc, G., Chelariu, R., Popescu, G., Sârghi, M., & Carcea, I. (2017). Study on wear resistance FeNiCrMnAl high entropy alloy - Mechanical properties. *Key Engineering Materials*, 750, 34-38. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.750.34>
- Ekinci, N., Kavaz, E., Aygün, B., & Perişanoğlu, U. (2019). Gamma ray shielding capabilities of rhenium-based superalloys. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 174(5-6), 435-451. <https://doi.org/10.1080/10420150.2019.1596110>
- Ferreirós, P. A., von Tiedemann, S. O., Parkes, N., Gurah, D., King, D. J. M., Norman, P., ... & Knowles, A. J. (2023). VNbCrMo refractory high-entropy alloy for nuclear applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 113, 106200. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106200>
- Filho, F. da C. G., da Luz, F. S., da Silva Figueiredo, A. B.-H., Monteiro, S. N., & dos Santos, D. S. (2020). Promising ballistic behavior of CoCrFeMnNi high entropy alloy. *Materials Science Forum*, 1012, 377-382. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1012.377>
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., & Levring, H. (2004). WinXCom—a program for calculating X-ray attenuation coefficients. *Radiation Physics and Chemistry*, 71(3-4), 653-654. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.04.040>
- Harima, Y. (1993). An historical review and current status of buildup factor calculations and applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 41(4-5), 631-672. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(93\)90317-N](https://doi.org/10.1016/0969-806X(93)90317-N)
- Hila, F. C., Asuncion-Astronomo, A., Dingle, C. A. M., Jecong, J. F. M., Javier-Hila, A. M. V., Gili, M. B. Z., ... & Amorsolo, A. V. (2021). EpiXS: A windows-based program for photon attenuation, dosimetry and shielding based on EPICS2017 (ENDF/B-VIII) and EPDL97 (ENDF/B-VI.8). *Radiation Physics and Chemistry*, 182, 109331. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109331>
- Issa, S. A. M., Ahmad, M., Tekin, H. O., Saddeek, Y. B., & Sayyed, M. I. (2019). Effect of Bi₂O₃ content on mechanical and nuclear radiation shielding properties of Bi₂O₃-MoO₃-B₂O₃-SiO₂-Na₂O-Fe₂O₃ glass system. *Results in Physics*, 13, 102165. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102165>
- Issa, S. A. M., Rashad, M., Zakaly, H. M. H., Tekin, H. O., & Abouhaswa, A. S. (2020). Nb₂O₅-Li₂O-Bi₂O₃-B₂O₃ novel glassy system: evaluation of optical, mechanical, and gamma shielding parameters. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(24), 22039-22056. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04707-7>

- Jia, N., Li, Y., Huang, H., Chen, S., Li, D., Dou, Y., ... & Jin, K. (2021). Helium bubble formation in refractory single-phase concentrated solid solution alloys under MeV He ion irradiation. *Journal of Nuclear Materials*, 550, 152937. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.152937>
- Kavaz, E. (2019). An experimental study on gamma ray shielding features of lithium borate glasses doped with dolomite, hematite and goethite minerals. *Radiation Physics and Chemistry*, 160, 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.03.032>
- Kavaz, E., Armoosh, S. R., Perişanoğlu, U., Ahmadi, N., & Oltulu, M. (2020). Gamma ray shielding effectiveness of the Portland cement pastes doped with brass-copper: An experimental study. *Radiation Physics and Chemistry*, 166, 108526. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108526>
- Kavaz, E., Gul, A. O., Basgoz, O., Guler, O., ALMisned, G., Bahceci, E., ... & Tekin, H. O. (2022). Boron nitride nanosheet-reinforced WNiCoFeCr high-entropy alloys: the role of B4C on the structural, physical, mechanical, and radiological shielding properties. *Applied Physics A*, 128(8), 694. <https://doi.org/10.1007/s00339-022-05813-5>
- Lu, Y., Huang, H., Gao, X., Ren, C., Gao, J., Zhang, H., ... & Li, T. (2019). A promising new class of irradiation tolerant materials: Ti2ZrHfV0.5Mo0.2 high-entropy alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(3), 369-373. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.034>
- Lu, Z. P., Wang, H., Chen, M. W., Baker, I., Yeh, J. W., Liu, C. T., & Nieh, T. G. (2015). An assessment on the future development of high-entropy alloys: Summary from a recent workshop. *Intermetallics*, 66, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.06.021>
- Müller, F., Gorr, B., Christ, H.-J., Müller, J., Butz, B., Chen, H., ... & Heilmaier, M. (2019). On the oxidation mechanism of refractory high entropy alloys. *Corrosion Science*, 159, 108161. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108161>
- Perişanoğlu, U., Kavaz, E., Tekin, H. O., Armoosh, S. R., Ekinçi, N., & Oltulu, M. (2020). Comparison of gamma and neutron shielding competences of Fe-Cu- and brass-added Portland cement pastes: an experimental and Monte Carlo study. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 126, 470. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03648-6>
- Rammah, Y. S., Mahmoud, K. A., Kavaz, E., Kumar, A., & El-Agawany, F. I. (2020). The role of PbO/Bi2O3 insertion on the shielding characteristics of novel borate glasses. *Ceramics International*, 46(15), 23357-23368. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.018>
- Ren, H., Chen, R. R., Gao, X. F., Liu, T., Qin, G., Wu, S. P., & Guo, J. J. (2022). Insights on mechanical properties of dual-phase high entropy alloys via Y introduction. *Journal of Alloys and Compounds*, 929, 167374. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167374>
- Shang, Y., Brechtel, J., Pistidda, C., & Liaw, P. K. (2021). Mechanical behavior of high-entropy alloys: A review. In J. Brechtel, & P. K. Liaw (Eds.), *High-Entropy Materials: Theory, Experiments, and Applications* (pp. 435-522). Springer.
- Socorro-Perdomo, P., Florido-Suarez, N., Voiculescu, I., & Mirza-Rosca, J. (2021). Biocompatibility of new high-entropy alloys with non-cytotoxic elements. *Microscopy and Microanalysis*, 27(S1), 1772-1774. <https://doi.org/10.1017/S1431927621006486>
- Tunes, M. A., Vo, H. T., Baldwin, J. K. S., Saleh, T. A., Fensin, S. J., & El-Atwani, O. (2023). Perspectives on novel refractory amorphous high-entropy alloys in extreme environments. *Applied Materials Today*, 32, 101796. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101796>
- Yaykaşlı, H., Eskalen, H., Kavun, Y., Göğebakan, M., & Kaya, A. H. (2023a). Microstructure and thermal and radiation shielding properties of CoCrFeNiAg high entropy alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, . <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08598-7>
- Yaykaşlı, H., Eskalen, H., Kavun, Y., Göğebakan, M., Kaya, A. H., & Yorulmaz, N. (2023b). CoCrFeNiSi high entropy alloy: Synthesis, structural and radiation shielding properties. *Progress in Nuclear Energy*, 165, 104930. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104930>
- Yıldız Yorgun, N. (2019). Gamma-ray shielding parameters of Li2B4O7 glasses: Undoped and doped with magnetite, siderite and Zinc-Borate minerals cases. *Radiochimica Acta*, 107(8), 755-765. <https://doi.org/10.1515/ract-2019-0014>
- Zhang, Z., Han, E.-H., & Xiang, C. (2021). Irradiation behaviors of two novel single-phase bcc-structure high-entropy alloys for accident-tolerant fuel cladding. *Journal of Materials Science & Technology*, 84, 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.12.058>



Research Article

Investigation of Radiation Effects on Cr-Co-Ni Alloys Used in Dental Applications by Monte Carlo Simulation

Doğan DURNA¹, Bünyamin AYGÜN*², Abdulhalik KARABULUT³

¹Ataturk University, Dentistry Faculty, Dentomaxillofacial Radiology, Department, 25700, Erzurum, Türkiye

²Ağrı İbrahim Çeçen University, Vocational School, Electronics and Automation Department, Postal Code, Ağrı, Türkiye

³Ataturk and Ağrı İbrahim Çeçen University, Science Faculty Physics, Department, 25700, Erzurum, Türkiye
Doğan DURNA, ORCID No: 0000-0001-5341-6024, Bünyamin AYGÜN, ORCID No: 0000-0002-9384-1540,
Abdulhalik KARABULUT, ORCID No: 0000-0003-2290-9007

*Corresponding author e-mail: baygun@agri.edu.tr

Article Info

Received: 22.07.2024

Accepted: 20.08.2024

Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1520230](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1520230)

Keywords

Denture,
Implant,
Monte Carlo,
Neutron radiation

Abstract: Radiation is used in dental applications, both in any tumor treatment and oral diagnosis. Especially boron -neutron treatment mostly uses brain and larynx cancer treatment. In recent years, denture restoration has become important in combating tooth decay and tooth loss. Many alloys are used for both restoration and medical purposes, with cobalt-chromium (Co-Cr) alloys seeing increasing use. These alloys are favored because they offer good resistance to corrosion and mechanical wear. Toxicity and radiation resistance are crucial properties of these alloys in oral applications. Individuals with chrome-coated implants and restorations may be exposed to radiation during diagnostic procedures while working in nuclear facilities or undergoing radiotherapy treatments like boron neutron therapy. The epithermal and fast neutron interaction parameters, including effective removal cross-section, half-value layer, mean free path, and transmission number, have been determined for dentures used in medical applications with three types of Co-Cr alloys. These parameters and the emitted secondary radiation were calculated using the effective semi-experimental Monte Carlo simulation software, GEANT4. It was determined that the first type of alloys are best suited for oral restorations in people exposed to radiation.

Dental Uygulamalarda Kullanılan Cr-Co-Ni Alaşımlarında Radyasyonun Etkilerinin Monte Carlo Simülasyonu ile Araştırılması

Makale Bilgileri

Geliş: 22.07.2024

Kabul: 20.08.2024

Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1520230](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1520230)

Anahtar Kelimeler

İmplant,
Monte Carlo,
Nötron radyasyonu,
Protez

Öz: Radyasyon diş hekimliği uygulamalarında hem her türlü tümör tedavisinde hem de ağız yoluyla teşhiste kullanılmaktadır. Özellikle bor-nötron tedavisinde çoğunlukla beyin ve gırtlak kanseri tedavisinde kullanılmaktadır. Son yıllarda diş çürüğü ve diş kaybıyla mücadelede protez restorasyonu önem kazanmıştır. Birçok alaşım hem restorasyon hem de tıbbi amaçlar için kullanılmakta özellikle kobalt-krom (Co-Cr) alaşımlarının kullanımı giderek artıyor. Bu alaşımlar, korozyona ve mekanik aşınmaya karşı iyi bir direnç sundukları için tercih ediliyor. Toksikite ve radyasyon direnci bunların çok önemli özellikleridir. Oral uygulamalarda alaşımlar krom kaplı implantlara ve restorasyonlara sahip kişiler, nükleer tesislerde çalışırken veya bor nötron tedavisi gibi radyoterapi tedavilerine tabi tutulurken teşhis prosedürleri sırasında radyasyona maruz kalabilirler. Üç tip Co-Cr alaşımı ile tıbbi uygulamalarda kullanılan protezler için epitermal ve hızlı nötron etkileşimi parametreleri etkili uzaklaştırma kesiti, yarı değer katmanı, ortalama serbest yol ve iletim sayısı belirlendi. Bu parametreler ve yayılan ikincil radyasyon, etkili yarı deneysel Monte Carlo simülasyonu kullanılarak hesaplandı. GEANT4 yazılımı ile radyasyona maruz kalan kişilerde ağız restorasyonları için birinci tip alaşımların en uygun olduğu belirlendi.

1. Introduction

Neutrons are used in various applications such as nuclear medicine diagnosis and treatment, nuclear power plants, materials science, and space research (Nazarov et al., 2020). Staff working in these areas can be exposed to neutron leaks. If they have any denture implants or restorative chrome coatings, neutrons can interact with these materials, producing secondary radiation that may cause health problems. Cobalt-chromium (Co-Cr) alloys have been used in implant and restorative treatment applications in dentistry for a long time. These alloys contain Cr and Co, along with other metals such as nickel (Ni), manganese (Mn), silicon (Si), molybdenum (Mo), iron (Fe), and tungsten (W) (Kassapidou et al., 2017). These Co-Cr alloys consist of 2–6% Mo, 25–32% Cr, 53–67% Co, and small amounts of W, Al, Si, and other metals. Cr, Mo, and W enhance the alloy's strength.

Furthermore, Cr reacts with O₂ to form a Cr₂O₃ layer that is 1-5 nm thick (Mohamed et al., 2023). Co-Cr alloys are commonly used for patients with missing teeth in new removable dental implants or as chrome coatings (Al-Imam et al., 2016). Co-Cr alloys are inexpensive compared to other gold or palladium alloys, additionally, these alloys have good resistance to corrosion and stretching, making them suitable for long-term use in dental applications. Moreover, these alloys can be used in orthodontics for bands, brackets, and archwires (Han et al., 2018). Co-Cr alloys typically cause low-level allergic effects and irritation, while other metal alloys have a higher risk of causing allergic reactions in oral applications (Kim et al., 2015). Cobalt-chromium (Co-Cr) alloys are coated with a layer of porcelain to enhance their strength and ability to withstand chewing pressure in dental applications (Vaicelyte et al., 2020). Ti alloys are used in implant applications, according to other Co-Cr alloys and stainless steel because Ti alloys have high strength, good corrosion resistance, and no toxicity effects (Abd-Elaziem et al., 2024). Ti6Al4V alloys were produced with the powder metallurgy method for dental applications and cylindrical shapes were characterized by the space holder method. It determined that this implant exhibited almost 40% contact trabecular bone area 200 μm diameter and 120° angle porosity (Robau-Porrúa et al., 2024). Ti-6Al-4V alloy has low density, good corrosion resistance, and excellent compatibility with bones, making it the most preferred alloy in dental applications (Chung, 2017). New titanium alloys, such as Ti-2.8Nb-15Mo and Ti-13Zr-13Nb, have been developed with a low density of 4.5 g/cm³ and good corrosion resistance, making them compatible with complex tooth bone structures (Ananth et al., 2015). Neutron and gamma radiation effects were investigated for medical applications of some Ti alloys using the EpiXS, ESTAR, NGCal, and SRIM programs. Neutron interaction studies were conducted on 25.4 MeV energy thermal and 4 MeV energy fast neutrons of the investigated alloys and cortical bone. Gamma radiation interaction parameters were compared to those of cortical bone with Ti-6Al-4V-2.5Cu and Ti-6Al-4V. As a result, these alloys can be used in biomedical applications such as knee, tooth, elbow joints, and hip, for biomedical applications such as knee, hip, and elbow joints (Hiremath et al., 2023). Radioactive, micro, and mechanical properties of Ti, Ti alloys, and different elements were investigated using alloys made with Al, Sn, V, Ni, Mo, Pb, Zr, Cr, Nb, Fe, and Co through simulation studies. It was determined that Ti alloys containing Mo and Nb have good mechanical, electrical, elastic, tensile stretch, and gamma-ray attenuation properties (Taşgım, 2021).

In neutron areas, working staff who use oral implants, chrome coatings, or tooth wires can experience interactions between these materials and neutrons, resulting in secondary radiation. This radiation can have hazardous effects and may cause various health problems such as tissue destruction, oral infections, and tooth decay. Neutrons are electrically neutral, but they have a spin and magnetic moment, which allows them to affect a material's magnetic structure. Because of their neutral charge, neutrons can penetrate materials and produce secondary radiation such as gamma, alpha, and beta particles, or new radioisotope elements (Apte & Bhide, 2024). Neutron radiation has high penetrating properties in target materials, so neutron damage was investigated on some zirconium alloys. This damage may affect the microstructure and point defect development, as well as change mechanical properties and cause deformations. As a result, neutron radiation affected the interacting zirconium alloys and changed some microstructural and mechanical properties (Onimus et al., 2020).

Neutron attenuation properties such as mean free path, effective removal cross-section, half-value layer, and neutron transmission factor (NTF) were investigated for some high entropy alloys containing elements like Ta, Ti, Nb, Hf, and Zr using Monte Carlo simulation with the GEANT4 code. It was reported that the Nb₂₅Ti₂₅Hf₂₅Ta₂₅ high entropy alloy has better fast neutron absorption

capacity than other alloys. According to the results, this alloy can be used in various neutron applications such as nuclear reactors, nuclear waste storage, and medical applications (Aygün & Karabulut, 2022). Newly developed superalloys were produced using metals such as rhenium (Re), nickel (Ni), iron (Fe), boron carbide (B₄C), boron (B), chromium (Cr), copper (Cu), tantalum (Ta), and tungsten (W). Both gamma and neutron absorption properties were determined using the GEANT4 code, Phy-X/PSD, and WinXcom software. In addition, experimental dose measurements were made to determine the absorption ability. As a result, it was reported that these superalloys can be used in gamma and neutron applications in nuclear medicine (Aygün, 2021). In this study, epithermal and fast neutron interaction parameters, secondary radiation, and newly formed particles were determined for the most commonly used dental applications in five different implant samples. It was found which of these implants is best suited for neutron applications

2. Material and Methods

2.1. Monte Carlo simulation Geant code

The Geant4 (GEometry ANd Tracking) code can be used to simulate any particle or radiation passing through a target material to determine possible interactions. The applications included in Geant 4 can be made at any point radiation source and detector geometry designs. Additionally, new particle isotopes and secondary radiations that may occur during these interactions can be detected. Geant4 includes many different particles with energy levels ranging from low (milli-eV) to high (GeV-TeV), such as hadrons, electrons, and wave or particle radiation, and their interactions with any materials and detectors. Geant4 is used in many areas such as high energy physics, medical physics, nuclear physics, space research, accelerator devices, and the study of the effects of cosmic radiation on satellites. In addition, it is commonly used to design new samples for radiation shielding and to conduct research on new protective drugs (Agostinelli et al., 2003).

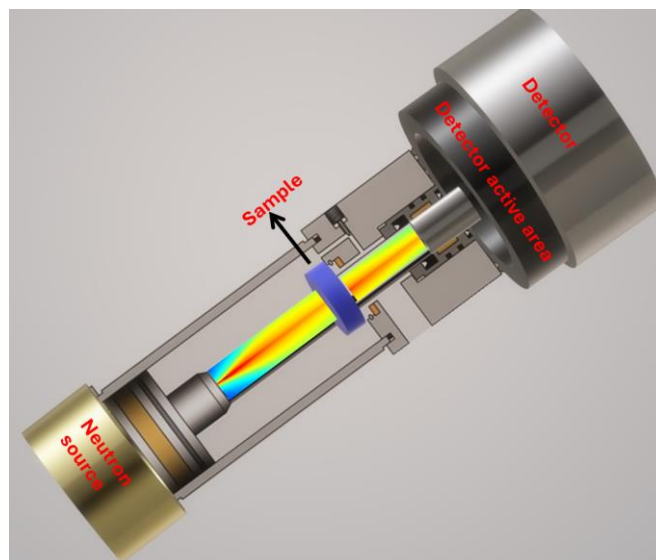


Figure 1. Geant4 simulation geometry.

2.2. Principles of neutron radiation protection

Neutrons have no electrical charge, so they can enter the nucleus of any target material and initiate nuclear reactions such as fission or fusion. These interactions depend on the neutron's energy levels and the type of target nucleus. Neutrons interact with the nucleus of any material, unlike X-rays, which interact with the electron shells of atoms. Therefore, neutrons are very sensitive to light element atoms such as oxygen and hydrogen, and their interaction probability is higher than that of X-rays (Podgoršak, 2009). Neutrons can make interactions such as absorption or energy transfer, elastic, inelastic scattering, neutron capture, fission, or at heavy atoms target materials which high atom

numbers. These interaction possibilities can be expressed with total macroscopic cross-sections as follows:

$$\sigma_T = \sigma_{\text{elastic scattering}} + \sigma_{\text{inelastic scattering}} + \sigma_{\text{proton}} + \sigma_{\text{alpha}} + \sigma_{\text{2neutron}} + \sigma_{\text{neutron+proton}} + \sigma_{\text{gamma}} + \sigma_{\text{fission}} \quad (1)$$

where σ represents the microscopic cross-section, which expresses the probability of any neutron interaction with the nuclei of target material atoms.

$$N_A = \frac{\rho}{A} N_0 \quad (2)$$

$$\sigma_A = \mu / \rho \left(\frac{A}{N_0} \right) \quad (3)$$

$$\mu = N_A \sigma_A \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\rho}{A} N_0 \sigma_A \quad (5)$$

N_A is the number of atoms of the interaction nuclide per (atom/cm³), N_0 is the Avogadro's number (6.02.10²³), ρ is the density of the interaction matter, A is the interaction atom molecular weight, μ is the mass attenuation coefficient, and σ_A is the atomic cross-section (cm²/atom).

If neutrons interact with heavy materials such as concrete or alloys, this interaction can be expressed with a macroscopic cross-section (Σ).

$$\Sigma_{Total} = \Sigma_{\text{coherent scattering}} + \Sigma_{\text{incoherent scattering}} + \Sigma_{\text{absorption cross section}} + \Sigma_{\text{captureabsorption cross section}} + \Sigma_{\text{fission absorption cross section}} + \dots \quad (6)$$

The removal cross-section Σ_R is like a macroscopic cross-section and can be used for neutron attenuation properties, but it doesn't give the neutron-nucleus interaction probability. This parameter can indicate fast neutron energy loss, scattering, and capture interactions, and it is lower than the macroscopic cross-section (El-Khayatt, 2010). This parameter is important for neutron protective studies, moreover, it can be used for composites, alloys, and mixture samples, and it can be calculated as follows.

$$\Sigma_R = \Sigma(\Sigma_{R/\rho})_i \quad (7)$$

$$\rho_i = w_i \rho \quad (8)$$

w_i is the weight percentage and ρ_i is the density of protective material i.

When neutrons pass through any protective material, they may lose half of their numbers or energy. The material thickness at this point is expressed by the Half Value Layer (HVL), which can be calculated as follows.

$$HVL = \ln 2 / \Sigma_R \quad (9)$$

The mean free path expresses the average distance traveled by a neutron before colliding with any atoms in the target material and it can be calculated as follows.

$$\lambda = 1 / \Sigma_R \quad (10)$$

Neutrons are a type of particle radiation that can be captured, elastically or inelastically scattered by a moderator material, thereby stopping them. The stopping power of moderator materials depends on the

number of neutrons passing through the material. If this number is low, the material has a high stopping power because many collisions occur within it. Therefore, the number of incoming and passing neutrons is an important property of a moderator material. This ratio can be expressed as transmission, shown as I/I_0 , where I_0 is the number of incoming neutrons on the material, and I is the number of neutrons passing through the material.

2.3. Sample preparation

Dental alloys consist of Co-Cr metals in a high ratio. These alloys can also contain other metals such as nickel (Ni), iron (Fe), molybdenum (Mo), tungsten (W), silicon (Si), manganese (Mn), titanium (Ti), and sulfur (S). Multi-metal alloys commonly used in dentistry applications are shown in Table 1.

Table 1. Chemical composition ratios and density of the alloy used in dentistry (%)

Element	DA1 ($\rho=8.27$ g/cm ³)	DA2($\rho=9.61$ g/cm ³)	DA3($\rho=8.03$ g/cm ³)	DA4($\rho=8.88$ g/cm ³)	DA5($\rho=7.22$ g/cm ³)
Co	62.0	58.3	35.0	35.7	61.65
Cr	30.0	32.2	32.0	22.0	27.75
Mo	5.0	6.5	4.0	5.0	-
Si	1.0	1.0	0.5	0.3	1.60
Mn	1.5	-	0.5	0.7	0.5
C	0.5	0.5	0.3	0.2	-
Fe	-	-	27.7	6.0	0.5
W	-	1.5	-	5.0	8.45
Ni	-	-	-	23.0	-
Ti	-	-	-	2.0	-
S	-	-	-	0.1	-

DA: Dentistry alloys

Co and Cr metals have specific properties, and these metals are found in the human body in small quantities and are used in biochemical regulations. However, when these metals are used in implants, these metal alloys can release metal ions, which can cause toxic effects on the body (Scharf et al., 2014).

3. Results and Discussion

Any implant intended for use in dental and biomedical applications must have some critical properties such as nontoxicity, strong mechanical strength, corrosion resistance, and no dangerous interactions with radiation. Important parameters such as effective removal cross-section, half-value layer, mean free path and transmission number were calculated using the GEANT4 code according to the geometry in Figure 1 for the implant alloys shown in Table 1 to understand epithermal and fast neutron interactions, and the obtained results are given in Table 2-3. In addition, Table 4-8 presents the secondary radiation and new particles resulting from these neutron interactions.

The effective removal cross-section values for fast neutrons (4.5 MeV) were calculated for all alloy materials, and the results are shown in Table 2 and Figure 2. As seen in Table 2 and Figure 2, all alloy materials have effective removal cross-section values for fast neutrons, meaning that these alloys have the potential to interact with fast neutrons and can stop them. When looking at all the materials, they have effective removal cross-section values in the order of DA2 > DA4 > DA3 > DA1 > DA5. Accordingly, the material with the best neutron stopping capability is the DA2 alloy.

The half-value layer for fast neutrons was calculated using Equation 9, and the mean free path was calculated using Equation 10. The results are given in Table 2.

In neutron shielding studies, it is desired for the material to have a low half-thickness value. This is because materials that provide good shielding should be thin, which is important both volumetrically and in terms of durability (Durna et al., 2023). Especially for implants to be used inside the mouth, having the ability to stop neutrons will be advantageous for patients and individuals exposed to any neutron application. Looking at the half-thickness values given in Table 2, it is seen that the

examined alloys have the ability to stop fast neutrons. It is observed that the alloy with the lowest HVL value for fast neutrons is the DA2 material. The high ERCS value of this material also supports this result. The sample with the highest HVL value is DA5, and its ERCS value is the lowest. According to these HVL values, it was found that DA2 is the best at stopping fast neutrons. A low MFP value of a material indicates that the path neutrons can take within the material before their first collision is short, which also means that the material has good neutron stopping power (Bayram et al., 2023). Looking at the MFP values given in Table 2, it is seen that the DA2 sample has the lowest MFP value, and the DA5 sample has the highest MFP value. According to these values, it can be concluded that the DA2 sample has the best fast neutron stopping power. The ratio of neutrons that interact or pass through a material, NTR, is a guiding factor in neutron shielding studies. Again, looking at Table 2, it is seen that the DA2 sample has the lowest NTR, while the DA5 sample has the highest value. Accordingly, fewer neutrons pass through the DA2 sample, indicating that this material absorbs neutrons better. However, the high value of the DA5 sample shows that its neutron stopping potential is low. The ratio of neutrons that interact with or pass through a material, NTR, is a guiding factor in neutron shielding studies. Again, looking at Table 2, it is seen that the DA2 sample has the lowest NTR, while the DA5 sample has the highest value. Accordingly, fewer neutrons pass through the DA2 sample, indicating that this material absorbs neutrons better. However, the high value of the DA5 sample shows that its neutron stopping potential is low.

Table 2. Dentistry alloy (DA) fast neutron (4.5 MeV) attenuation parameters for 1mm thick, 10^5 neutron

Sample code	Fast Neutron Half value layer (cm)	Fast Neutron Mean free path λ (mm)	Fast Neutron transmission ratio (NTR)	Fast Neutron ERCS (cm^{-1})
DA1	22.42 ± 0.204	32.35 ± 0.33	0.96956	0.0309
DA2	18.88 ± 0.186	27.20 ± 0.26	0.96390	0.0367
DA3	21.32 ± 0.221	30.74 ± 0.30	0.96799	0.0325
DA4	20.68 ± 0.207	29.77 ± 0.276	0.96697	0.0335
DA5	25.29 ± 0.252	36.49 ± 0.354	0.97294	0.0274

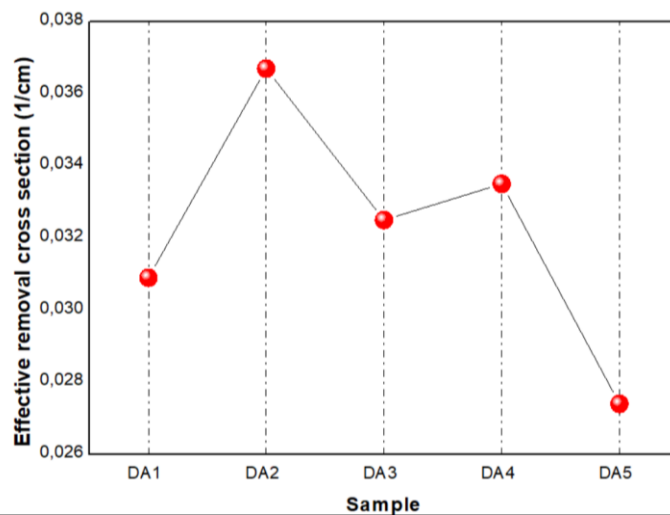


Figure 2. Theoretical 4.5 MeV fast Neutron Effective Removal Cross Sections.

A small half-value layer (HVL) value of a material is related to its ability to stop neutrons. Materials with a small HVL value absorb neutrons more effectively (Mansouri et al., 2020). According to the HVL values given in Table 3, these alloys' resistance to stopping epithermal neutrons is demonstrated. Based on these values, the DA4 sample, which has the lowest HVL value, has the best

stopping performance, while the DA5 sample, which has the highest HVL value, has the lowest stopping power.

The neutron transmission ratio (NTR) is a useful parameter, like other absorption parameters, in neutron shielding studies and predicting interactions. When examining the NTR values in Table 3, it is clear that a low ratio of the number of neutrons passing through the material to the number of neutrons sent onto the material is closely related to the material's ability to stop neutrons. According to the NTR values, the DA4 sample has the lowest NTR value, while the DA5 sample has the highest. Based on this parameter, it is determined that the material that absorbs epithermal neutrons the best is DA4, and the material that absorbs them the least is DA5.

Table 3. Dentistry alloy (DA) epithermal neutron (0.25 eV) attenuation parameters for 1mm thick, 10^5 neutron

Sample code	Epithermal Neutron Half value layer (cm)	Epithermal Neutron Mean free path λ (mm)	Epithermal Neutron Transmission Ratio NTR (I/I_0)	Epithermal Neutron ERCS (cm^{-1})
DA1	7.21 ± 0.78	10.41 ± 0.13	0.90846	0.0960
DA2	6.45 ± 0.64	9.31 ± 0.93	0.89821	0.1073
DA3	7.86 ± 0.76	11.35 ± 0.59	0.91563	0.0881
DA4	6.12 ± 0.61	8.84 ± 0.89	0.89303	0.1131
DA5	8.27 ± 0.82	11.94 ± 0.11	0.91970	0.0837

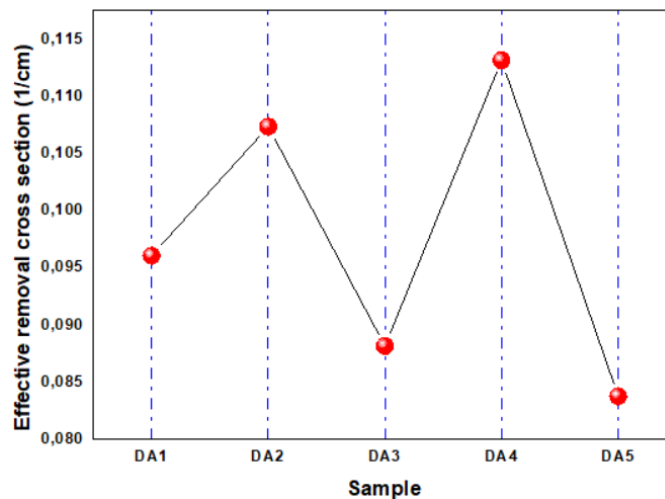


Figure 3. Theoretical 0.25 eV epithermal neutron effective removal cross sections.

Based on the results presented in Table 3 and Figure 3, it has been determined that all DA alloys possess ERCS values. Accordingly, it is observed that these alloys have the potential to interact with epithermal neutrons, meaning they have the capability to stop epithermal neutrons. The material with a higher ERCS value has a greater power to stop neutrons (Kursun et al., 2023). Accordingly, there is a relationship among the ERCS values of all materials, specifically between $DA4 > DA2 > DA1 > DA3 > DA5$. Based on this, the DA4 alloy has the highest stopping power against epithermal neutrons, while the DA5 alloy has the lowest stopping power.

The mean free path facilitates material selection in neutron shielding studies. A small value of this parameter for a material indicates its capacity to stop neutrons. When examining the values given in Table 3, it is evident that the short distances traveled by epithermal neutrons through the alloys without interaction demonstrate these materials' ability to stop epithermal neutrons. The fact that the DA4 sample has the lowest MFP value in the table clearly proves that this alloy has the highest capacity to stop epithermal neutrons. Conversely, the DA5 sample, which has the highest MFP value in the table, has the lowest capacity to stop epithermal neutrons compared to the other alloys.

Tables 4 provide the secondary radiations and radioactive particles resulting from the interaction of the DA1 alloy with both fast and epithermal neutrons. According to these results, it is

understood that the particles produced when this alloy sample interacts with both fast and epithermal neutrons will not have very high energies.

Table 4. Secondary particles and radiations emerge from the DA1 sample by fast and epithermal neutrons

Emerge isotopes and secondary radiations	fast neutrons		epithermal neutrons	
	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)
C12	24	379.36	-	-
C13	1	274.78	-	-
Co59	1807	71.77	3009	0.0500
Co60	2	72.76	4740	257.64
Cr50	50	72.66	24	0.0506
Cr51	-	-	57	831.24
Cr52	857	80.04	677	0.0517
Cr53	91	58.23	251	203.91
Cr54	27	89.37	127	801.13
Fe59	3	103.2	-	-
Mn55	52	88.15	27	0.0598
Mn56	-	-	50	558.01
Mo101	-	-	2	156.55
Mo100	15	28.84	12	0.0716
Mo92	19	44.96	20	0.0406
Mo94	10	43.03	13	0.0255
Mo95	17	60.28	24	0.0331
Mo96	10	26.31	39	81.132
Mo97	7	65.164	15	0.0625
Mo98	23	49.70	37	0.0444
Si28	31	135.25	29	0.0755
Si29	1	10.88	1	0.0502
Si30	2	302.4	-	-
V50	5	163.3	-	-
e-	-	-	2	10.623
gamma	3512	1.019	12810	3.0202
neutron	1224	1.499	-	-
proton	8	3.572	-	-

Tables 5 present the secondary radiations and radioactive particles that can result from the interactions of the DA2 alloy with both fast and epithermal neutrons. According to the calculations, the DA2 sample has the best absorption capability against fast neutrons among all alloy materials. It has been determined that no high-energy radiation or radioactive particles will form as a result of the interaction of this material with fast and epithermal neutrons.

Table 5. Secondary particles and radiations emerge from the DA2 sample by fast and epithermal neutrons

Emerge isotopes and secondary radiations	fast neutrons		epithermal neutrons	
	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)
C12	33	373.17	105	0.1008
C13	1	544.72	3	0.0750
Co59	2020	73.284	3280	0.0505
Co60	1	81.86	5061	255.23
Cr50	55	55.755	35	0.0590
Cr51	-	-	69	798.63
Cr52	1121	74.167	883	0.0518
Cr53	111	71.393	288	229.93
Cr54	27	86.271	159	943.33
Cr55	-	-	1	385.36
Fe59	2	122	-	-
Mo100	25	39.177	17	0.0430
Mo101	-	-	1	150.71
Mo92	21	46.055	31	0.0425
Mo94	21	72.274	25	0.0437
Mo95	15	51.542	38	0.3511
Mo96	24	53.562	43	55.183
Mo97	15	30.694	20	0.1253
Mo98	37	48.616	50	0.0584
Si28	41	187.49	31	0.0603
Si29	1	10.887	1	0.1251
Si30	2	329.93	1	0.0755
V50	8	166.03	-	-
W182	10	17.874	10	0.0293
W183	2	329.93	7	70.591
W184	7	23.015	7	0.0482
W185	-	-	1	314.89
W186	10	26.892	-	-
W187	-	-	12	37.865
e-	-	-	1	12.991
gamma	4061	1.0194	13643	3.0477
neutron	1432	1.5291	-	-
proton	10	3.5823	-	-

Tables 6 present the secondary radiations and radioactive particles that may result from the interactions of the DA3 alloy sample with both fast and epithermal neutrons. According to these tables, the radiation emitted after the interaction of this material with fast and epithermal neutrons does not pose a significant threat to human health. However, prolonged exposure to this level of radiation may still pose health risks.

Table 6. Secondary particles and radiations emerge from the DA3 sample by fast and epithermal neutrons

Emerge isotopes and secondary radiations	fast neutrons		epithermal neutrons	
	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)
C12	7	491.36	58	0.0876
C13	2	129.89	-	-
Co59	1028	70.415	1718	0.0513
Co60	1	76.972	2624	260.48
Cr50	52	63.749	32	0.0629
Cr51	-	-	55	842.19
Cr52	927	82.074	736	0.0520
Cr53	121	75.384	266	201.97
Cr54	28	74.088	139	902.08
Fe54	48	64.384	28	0.0463
Fe55	-	-	4	950.7
Fe56	823	67.85	2478	0.0507
Fe57	21	77.844	146	614.35
Fe58	6	75.941	5	271.8
Fe59	5	138.35	-	-
Mn54	8	189.86	-	-
Mn55	14	62.91	9	0.0334
Mn56	-	-	16	811.66
Mo100	8	41.187	11	0.0337
Mo92	14	41.187	18	0.0433
Mo94	6	22.696	5	0.0397
Mo95	6	26.468	16	0.0570
Mo96	12	55.785	26	75.176
Mo97	11	50.471	15	0.0826
Mo98	25	47.667	17	0.7033
Si28	20	171.59	14	0.0683
Si29	1	76.4	-	-
Si30	1	62.334	1	0.1699
V50	6	241.98	-	-
gamma	3027	1.0985	7598	3.2063
neutron	1173	1.5816	-	-
proton	19	4.0003	-	-

In Table 7, the secondary radiations and particles that will occur for both fast and epithermal neutrons are given for the DA4 alloy, which has the best epithermal neutron stopping capability compared to other alloys. According to these results, the energies of the particles and radiations that will occur are not very high. Especially in epithermal neutron interactions, gamma rays are the only secondary radiation produced, and their energies are very low. According to these results, the DA4 alloy can be easily used in epithermal neutron applications.

Table 7. Secondary particles and radiations emerge from the DA4 sample by fast and epithermal neutrons

Emerge isotopes and secondary radiations	fast neutrons		epithermal neutrons	
	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)
C12	11	314.26	36	0.0884
C13	-	-	1	0.0431
Co58	54	150.63	-	-
Co59	1175	69.387	1835	0.0498
Co60	-	-	2947	273.29
Cr50	46	57.537	20	0.0464
Cr51	-	-	47	827.5
Cr52	667	82.078	547	0.0537
Cr53	77	68.961	195	156.13
Cr54	21	50.772	105	876.11
Fe54	9	115.48	8	0.0652
Fe55	3	252.57	1	958.61
Fe56	221	70.988	610	0.0528
Fe57	7	40.92	42	568.07
Fe58	-	-	1	527.96
Fe59	2	79.886	-	-
Mn55	29	72.463	11	0.0665
Mn56	9	56.162	20	538.68
Mo100	-	-	9	0.0225
Mo92	13	53.151	28	0.0509
Mo94	5	59.79	15	0.0364
Mo95	22	36.441	29	2.3321
Mo96	18	45.886	25	75.683
Mo97	12	40.697	16	0.0353
Mo98	19	43.497	40	1.9996
Ni58	477	68.079	3482	0.0497
Ni59	-	-	153	865.86
Ni60	186	67.73	64	0.0498
Ni61	11	61.623	56	325.37
Ni62	12	45.92	79	0.0423
Ni63	-	-	23	446.16
Ni64	3	88.897	1	0.0295
S32	4	118.56	1	0.1014
Si28	6	120.51	5	0.0504
Si30	-	-	1	0.0130
Ti46	-	-	2	0.0369
Ti47	-	-	3	0.0341
Ti48	53	81.701	53	22.022
Ti49	-	-	28	385.65
Ti50	-	-	6	0.0637
V50	4	127.36	-	-
W182	-	-	45	0.0426
W183	-	-	33	62.41
W184	-	-	24	21.11
W185	-	-	1	98.09
W186	30	21.463	-	-
W187	-	-	49	64.66

Table 7. Secondary particles and radiations emerge from the DA4 sample by fast and epithermal neutrons (continued)

Emerge isotopes and secondary radiations	fast neutrons		epithermal neutrons	
	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)
alpha	6	5.925	-	-
gamma	3495	1.0275	8455	3.312
neutron	1262	1.5949	-	-
proton	60	4.1402	-	-

In Table 8, the secondary radiations and radioactive particles that will occur as a result of the interaction of the DA5 alloy sample with fast and epithermal neutrons are given. According to this, gamma rays, neutrons, and protons are formed due to the interaction of the DA5 alloy with fast neutrons, but their energies are also low. It has been determined that only gamma rays with low energy levels are formed due to the interaction of the DA5 alloy with epithermal neutrons, and new radioactive particles with low energies are also formed.

Table 8. Secondary particles and radiations emerge from the DA5 sample by fast and epithermal neutrons

Emerge isotopes and secondary radiations	fast neutrons		epithermal neutrons	
	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)	Quantity (core/cm ³)	Energy (keV)
Co59	1631	72.506	2667	0.0504
Co60	-	-	4122	256.5
Cr50	34	89.198	20	0.0474
Cr51	-	-	36	796.95
Cr52	729	74.746	560	0.0523
Cr53	81	73.332	232	165.2
Cr54	13	91.719	111	871.78
Fe56	8	69.234	40	0.0544
Fe57	1	135.45	1	654.47
Fe59	3	171.92	-	-
Mn55	11	47.772	9	0.0395
Mn56	-	-	40	420.22
Si28	68	172.87	52	0.0605
Si29	2	102.72	2	0.0438
Si30	1	99.703	-	-
V50	3	280	-	-
W180	-	-	1	0.0378
W182	37	17.813	44	0.0343
W183	17	14.407	41	67.554
W184	38	19.405	24	10.897
W185	-	-	3	124.9
W186	29	14.781	-	-
W187	-	-	51	60.847
gamma	3183	997.18	11227	2.9973
neutron	1107	1.5368	-	-
proton	6	3.5969	-	-

All results indicated that all DA alloys have absorption capacities against fast and epithermal neutrons. Among all DA alloys, the DA2 alloy sample has the best absorption performance for fast neutrons. When examining the chemical composition of this alloy given in Table 1, it is seen that it has both the highest density and a higher content of Co and Cr compared to the other alloys. This is because Co and Cr elements have an effective absorption coefficient against fast neutrons (Sriwongsa et al., 2020). Similarly, the DA4 alloy sample has the best absorption capacity against epithermal neutrons. The probable reason for this, when looking at Table 1, is that it has the highest density after the DA2 sample and, unlike the other samples, contains Ni and Ti elements because Ni and Ti elements have an effective absorption capability for epithermal neutrons (Aygün & Karabulut, 2022).

4. Conclusion

In this study, particularly in the field of dentistry, the interactions of implant alloys, used to replace decayed and completely lost teeth, with fast and epithermal neutrons and the secondary radiations and particles formed during these interactions were examined. Important attenuation parameters such as HVL, NTR, ERCS, and MFP, which are neutron interaction parameters, were theoretically calculated using the Geant4 code. It was determined that all dental alloy samples have absorption ability against both epithermal and neutron radiation. These alloys are used in both dentistry and many medical applications. If a person uses these alloy implants or prostheses, and is in an area where neutron radiation applications are located, these interactions may occur, leading to new radiation and radioactive particles, which can have hazardous effects on health. So, the interactions of these alloys with neutrons and the new radiation produced with radioactive particles must be understood. According to these results, it was found that the DA2 alloy sample has better absorption capacity against fast neutron radiation, while the DA4 alloy sample has better absorption capacity against epithermal neutron radiation compared to the other alloys. In addition to these absorption parameters, it was determined that none of the alloy samples produced or contained any high-energy secondary radiation or radioactive particles that could be harmful to people's health. Radiation absorption dose limits vary depending on the type and energy of the radiation. Every organ has specific radiation dose limits for acute radiation effects, for instance, 1 Sv (1000 mSv). This is a high dose level, but in this study, the second radiation dose value was lower than this level. It is suggested that the DA2 alloy sample can be used for implants and other medical therapies in any neutron applications.

References

- Abd-Elaziem, W., Darwish, M. A., Hamada, A., & Daoush, W. M. (2024). Titanium-based alloys and composites for orthopedic implants applications: A comprehensive review. *Materials & Design*, 241, 112850. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112850>
- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., ... & Zschesche, D. (2003). GEANT4 - A simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250-303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- Al-Imam, H., Benetti, A. R., Özhayat, E. B., Pedersen, A. M. L., Johansen, J. D., Thyssen, J. P., ... & Gotfredsen, K. (2016). Cobalt release and complications resulting from the use of dental prostheses. *Contact Dermatitis*, 75(6), 377-383. <https://doi.org/10.1111/cod.12649>
- Ananth, H., Kundapur, V., Mohammed, H. S., Anand, M., Amarnath, G. S., & Mankar, S. (2015). A review on biomaterials in dental implantology. *International Journal of Biomedical Science: IJBS*, 11(3), 113-120.
- Apte, K., & Bhide, S. (2024). Advanced radiation shielding materials: In S. Verma, & A. K. Srivastava (Eds.), *Basics of radiation* (pp. 1-23). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95387-0.00013-3>
- Aygün, B. (2021). Neutron and gamma radiation shielding Ni based new type super alloys development and production by Monte Carlo Simulation technique. *Radiation Physics and Chemistry*, 188, 109630. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109630>

- Aygün, B., & Karabulut, A. (2022). Investigation of epithermal and fast neutron shielding properties of some high entropy alloys containing Ti, Hf, Nb, and Zr. *Eastern Anatolian Journal of Science*, 8(2), 37-44.
- Bayram, S., Aygün, B., Karadayi, M., Alaylar, B., Güllüce, M., & Karabulut, A. (2023). Determination of toxicity and radioprotective properties of bacterial and fungal eumelanin pigments. *International Journal of Radiation Biology*, 99(11), 1785-1793. <https://doi.org/10.1080/09553002.2023.2204957>
- Chung, D. D. L. (2017). Carbon-matrix composites. In *Carbon composites, composites with carbon fibers, nanofibers and nanotubes* (pp. 387-466). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804459-9.00007-5>
- Durna, D., Aygün, B., Genişel, M., & Singh, V. P. (2023). Investigation of the neutron radiation protective properties of chlorophyll and carotenoid. *Radiation Physics and Chemistry*, 208, 110873. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110873>
- El-Khayatt, A. M. (2010). Calculation of fast neutron removal cross-sections for some compounds and materials. *Annals of Nuclear Energy*, 37(2), 218-222. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.10.022>
- Han, X., Sawada, T., Schille, C., Schweizer, E., Scheideler, L., Geis-Gerstorfer, J., ... & Spintzyk, S. (2018). Comparative analysis of mechanical properties and metal-ceramic bond strength of Co-Cr dental alloy fabricated by different manufacturing processes. *Materials*, 11(10), 1801. <https://doi.org/10.3390/ma11101801>
- Hiremath, G. B., Singh, V. P., Patil, P. N., Ayachit, N. H., & Badiger, N. M. (2023). Investigation of the nuclear radiation parameters of some Ti alloys for biomedical applications. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 179 (3-4), 301-314. <https://doi.org/10.1080/10420150.2023.2265020>
- Kassapidou, M., Stenport, V. F., Hjalmarsson, L., & Johansson, C. B. (2017). Cobalt-chromium alloys in fixed prosthodontics in Sweden. *Acta Biomaterialia Odontologica Scandinavica*, 3(1), 53-62. <https://doi.org/10.1080/23337931.2017.1360776>
- Kim, T. W., Kim, W. I., Mun, J. H., Song, M., Kim, H. S., Kim, B. S., Kim, M. B., & Ko, H. C. (2015). Patch testing with dental screening series in oral disease. *Annals of Dermatology*, 27(4), 389-393. <https://doi.org/10.5021/ad.2015.27.4.389>
- Kursun, C., Gao, M., Guclu, S., Gaylan, Y., Parrey, K. A., & Yalcin, A. O. (2023). Measurement on the neutron and gamma radiation shielding performance of boron-doped titanium alloy $Ti_{50}Cu_{30}Zr_{15}B_5$ via arc melting technique. *Heliyon*, 9(11), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21696>
- Mansouri, E., Mesbahi, A., Malekzadeh, R., Ghasemi Janghjo, A., & Okutan, M. (2020). A review on neutron shielding performance of nano - composite materials. *International Journal of Radiation Research*, 18(4), 611-622. <http://dx.doi.org/10.52547/ijrr.18.4.611>
- Mohamed, L. Z., Elsayed, A. H., Elkady, O. A., & Abolkassem, S. A. (2023). Physico-mechanical, microstructure, and chemical properties of Si/Ti/Nb additions to CoCrMoW medium entropy alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 9897-9914. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.198>
- Nazarov, K. M., Muhametuly, B., Kenzhin E. A., Kichanov, S. E., Kozlenko, D. P., Lukin, E. V., & Shaimerdenov, A. (2020). New neutron radiography and tomography facility TITAN at the WWR-K reactor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A (NIM-A)*, 982, 164572. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164572>
- Onimus, F., Doriot, S., & Béchade, J. L. (2020). Radiation effects in zirconium alloys. In R. J. M. Konings, & R. E. Stoller (Eds.), *Comprehensive nuclear materials* (pp. 1-56). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11759-X>
- Podgoršak, E. B. (2009). Interactions of neutrons with matter. In *Radiation physics for medical physicists. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering* (pp. 429-49). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00875-7_9
- Robau-Porrúa, A., González, J. E., Rodríguez-Guerra, J., González-Mederos, P., Navarro, P., De La Rosa, J. E., ... & Torres, Y. (2024). Biomechanical behavior of a new design of dental implant: Influence of the porosity and location in the maxilla. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 3255-3267. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.091>

- Scharf, B., Clement, C., Zolla, V., Perino, G., Yan, B., Gokhan Elci, S., ... & Santambrogio, L. (2014). Molecular analysis of chromium and cobalt-related toxicity. *Scientific Reports*, 4, 5729. <https://doi.org/10.1038/srep05729>
- Sriwongsa, K., Glumglomchit, P., Wananuraksakul, T., Pimprakhon, A., Hanchana, T., & Ravangvong, S. (2020). Simulation of shielding parameters of some high entropy alloys containing energies for gamma ray and fast neutron. *Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi*, 19, 97-105.
- Taşgın, Y. (2021). Investigation of microstructural and mechanical properties of different titanium alloys for gamma radiation properties and implant applications. *Journal of Material Engineering and Performance*, 30, 6203-6223. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05830-0>
- Vaicelyte, A., Janssen, C., Le Borgne, M., Grosgeat, B. (2020). Cobalt–chromium dental alloys: Metal exposures, toxicological risks, CMR classification, and EU regulatory framework. *Crystals*, 10(12), 1151. <https://doi.org/10.3390/cryst10121151>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Yeni Potansiyel Şeker-Ferrosenil İmin Katalizörler Sentezi ve Spektroskopik Yöntemlerle Karakterizasyonu

Cansu ÖZKARA, Özer IŞILAR, Adnan BULUT*

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Bölümü, 71450, Kırıkkale, Türkiye
Cansu ÖZKARA, ORCID No: 0009-0000-3410-5714, Özer IŞILAR, ORCID No: 0000-0001-7547-2537,
Adnan BULUT, ORCID No: 0000-0001-9322-0325

*Sorumlu yazar e-posta: adnbnlt@kku.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 20.04.2024
Kabul: 08.08.2024
Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1471479

Anahtar Kelimeler

Ferrosen,
Schiff bazı,
Şeker

Öz: Şekerler doğal stereoizomerlerdir ve polihidroksikarbonil bileşikleri olarak tanımlanabilirler. Yeni türevlerine geçiş, bize yeni saflaştırılabilen şeker türevi diastereomerler vermektedir. Enantiyoselektif tepkimelerin molekülün tek yüzeyinden, yani "re-face" ya da "si-face" yönünden olması hedeflenir. Şekerin büyüklüğü (sterik engeli) ve kiral yapısı, asimetrik tepkimelerde enantiyoseçiciliği sağlayabilir. Bu amaç doğrultusunda şeker türevi kiral Schiff bazları sentezlenmiştir ve spektroskopik yöntemler (¹H NMR, ¹³C NMR ve IR) ile karakterize edilmiştir. Sentetik bölümde ilk olarak amino şekerler üç basamakta elde edilmiştir. Bunlar sırası ile serbest hidroksili tosilleme, azür türevine çevirme ve amino şeker sentezleridir. Sentetik bölümün son basamağında ferrosen-2-karboksaldehit ile sentezlenen amino şekerler kondenzasyon tepkimesi ile literatürde bilinmeyen ferrosen-şeker türevi kiral imin türevlerine çevrilmiştir.

New Potential Sugar-Ferrocenyl Imine Catalysts Synthesis and Their Characterizations via Spectroscopic Methods

Article Info

Recieved: 20.04.2024
Accepted: 08.08.2024
Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1471479

Keywords

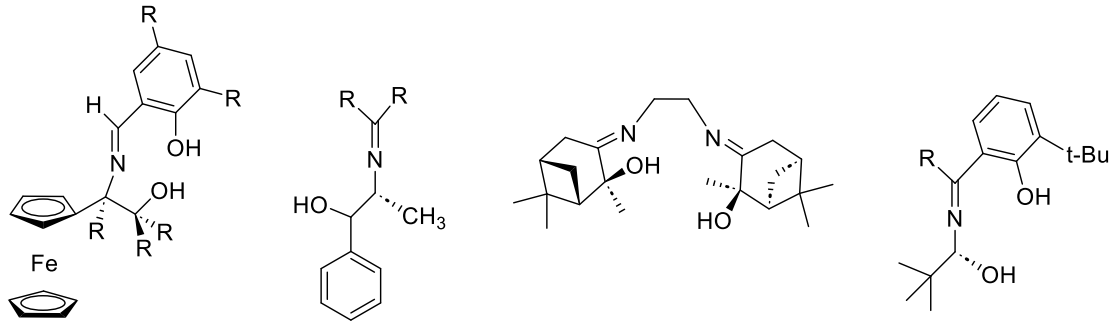
Ferrocene,
Schiff base,
Sugar

Abstract: Sugars are natural stereoisomers and can be defined as polyhydroxycarbonyl compounds. The derivatization of them gives us new purifiable sugar diastereomers. Enantioselective reactions are aimed to occur on a single surface of the molecule, that is, "re-face" or "si-face". The size (steric effect) and enantiopurity of sugar can enable us to achieve this goal. For this purpose, the sugar-derived chiral Schiff bases were synthesized and characterized by spectroscopic methods (¹H NMR, ¹³C NMR, and IR). In the synthetic part, amino sugars were obtained in three steps. These are, tosylating the free hydroxyl, converting it into azide derivatives, and reduction to amino sugars, respectively. In the last step of the synthetic section, ferrocene-2-carboxaldehyde and amino sugars were converted into novel ferrocene-sugar-imine derivatives by condensation reaction.

1. Giriş

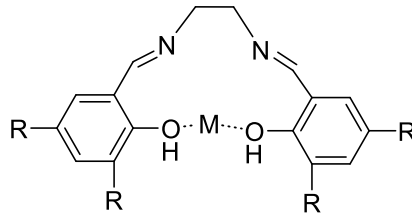
Enantiyosaf bileşiklerin materyal ve ilaç kimyasındaki önemi, sentezleri için yapılan araştırmaları son 50 yılda giderek önemini ve hızını artırmıştır (Morrison, 1985; Noyori, 1994). 2001 yılında Nobel Kimya Ödülü Ryoji Noyori, K. Barry Sharpless ve William S. Knowles'a bu alana yaptıkları katkılarından dolayı verilmiştir. Bu alanda birçok makale yapılmış olsa da hala çözülmesi gereken problemler mevcuttur. Ucuz katalizör sentezi ve birçok tepkimeyi katalizleyecek katalizör sentezi bu sorunlardan birkaçıdır. Yeni saf enantiyomer sentezi gerek materyal kimyası (Wang ve ark., 2020) ve gerekse sentetik organik kimya için önemini korumaktadır. Rasemik karışım içeren bileşikler

saf stereoizomere kıyasla daha az veya ters aktivite göstermektedir. Bu konuda ilaç kimyasında birçok trajedi mevcuttur (Kim & Scalli, 2011). Rasemik karışımları rezolüsyonu pahalı ve verimi düşük tepkimelerdir. Doğada ve canlılarda enantiyosaf tepkimeler mevcut olsa da tepkime balonunda enantiyosaf bileşikler elde etmek kolay değildir. Bu yüzden birçok doğadaki bileşik ilaç olarak kullanımı daha güvenli olduğu söylenebilir. Tepkime ortamında enantiyosafılığı yüksek stereoizomerler elde etmek için kiral yönlendiriciler kullanmak gerekir (Ojima, 2000; Aitken & Kilenyi, 2012). Kiral yönlendiricileri kabaca kiral ligand ve organokatalizörler olarak ikiye ayırabiliriz. Her ne kadar kiral ligand katalizörlerinin metal kullanım sorunu olsa da yüksek verim ve enantiyoseçiciliği yakalayabildiği için asimetrik sentezlerde kullanımı devam etmektedir. Tepkimelerde organokatalizör kullanımı ise, metal gibi istenmeyen kimyasal atık vermediği için giderek önemini asimetrik tepkimelerde artırmaktadır (Kuroki & Iseki, 1999; Xiang & Tan, 2020). Asimetrik sentezlerde alternatif yöntemler olarak rasemik rezolüsyon (Keith ve ark., 2001), kiral yardımcımlar (chiral auxiliaries) (Chung & Rhee, 2003), kiral reaktif ve kiral substrat kullanımı verilebilir. Karbohidratlar diğer adı ile şekerler büyük kiral iskelete sahip polihidroksi bileşiklerdir. Bu özelliğinden yararlanarak birçok şeker iskeletli kiral katalizörler sentezlenmiştir (Wojaczynska ve ark., 2021). Literatürde asimetrik katalizör olarak kullanılan birçok sentezlenmiş kiral imin bulunmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Bazı imin iskeletli katalizörler.

Karşıma en sık çıkan imin katalizörlerinden birisi de “Salen” türevleridir (Şekil 2). Özellikle metal-ligand türevleri, birçok tepkimede asimetrik olarak kataliz özelliği göstermiştir (Cozzi, 2004).



Şekil 2. Çok yönlü (privileged) metal-Salen kiral katalizörü.

Bu çalışma ile yeni kiral ferrosen-şeker-imin (Schiff bazı) sentezlenmiş ve böylece asimetrik tepkimelerde kullanıma potansiyeli olan katalizörler literatüre sunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

Başlangıç şekerlerinin tamamı Sigma-Aldrich firmasından satın alınmıştır. Elde edilen ürünlerin saflaştırma işlemleri flaş kolon kromatografisi ile silika jel 60 kullanılarak (Merck, 230-400 mesh ASMT) yapıldı. İnce tabaka kromatografisi ile reaksiyon takibi Merck F254 plakaları ile yapıldı. 254 nm’de UV lambası ile veya renklendiriciler (molibdik asit gibi) kullanılarak İTK’da izlendi. İnfrared spektrumlarında seçilmiş sinyaller rapor edildi. NMR analizleri için 400 MHz’lik NMR cihazı (Bruker Ultrashield Superconducting 400 MHz) kullanılmıştır.

2.1. 3-*O-p*-Toluensülfonil-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-allofuranoz (2) Sentezi

1.0 g (0.0038 mol) 1,2:5,6-Di-*O*-izopropiliden- α -D-allofuranoz (1) 4.3 mL piridinde çözüldü. Üzerine 0.73 g (0.0038 mol) *p*-TsCl (*p*-toluensülfonilchlorür) tek seferde eklendi. İki gün karıştırıldı. İnce tabaka kromatografisi ile 10:1 toluen:metanol sisteminde izlendi. Tepkimenin bittiği anlaşıldığında su-buz karışımına döküldü. Katı şeker süzüldü ve kurumaya bırakıldı. 0.80 g beyaz renkli katı ürün elde edildi (Verim: %57) Erime noktası: 175 °C (Richardson, 1972).

¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): δ 7.80 (d, J = 8.3 Hz, 2H, Ar-H), 7.28 (d, J = 8.2 Hz, 2H, Ar-H), 5.69 (d, J = 3.1 Hz, 1H, Anomerik), 4.58 (m, 2H, H-Şeker), 4.19 - 4.02 (m, 2H, H-Şeker), 3.86 (dd, J = 8.5, 6.7 Hz, 1H, H-Şeker), 3.71 (dd, J = 8.5 - 6.5 Hz, 1H, H-Şeker), 2.38 (s, 3H, Ar-CH₃), 1.46 (s, 3H, İp-Me), 1.25 (s, 3H, İp-Me), 1.22 (s, 3H, İp-Me), 1.21 (s, 3H, İp-Me). ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 145.19 (Aromatik C), 133.16 (Aromatik C), 129.67 (Aromatik C), 128.35 (Aromatik C), 113.60 (C-Şeker), 109.91 (C-Şeker), 103.82 (C-Şeker), 77.97 (C-Şeker), 74.67 (C-Şeker), 65.19 (C-Şeker), 26.65 (İp-C), 26.59 (İp-C), 26.06 (İp-C), 25.07 (İp-C), 21.67 (Ar-CH₃).

2.2. 3-Deoksi-3-azido-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-glukofuranoz (3) Sentezi

0.45 g (0.00108 mol) 3-*O-p*-Toluensülfonil-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-allofuranoz (2) 10 ml DMF (*N,N*-dimetilformamit) içinde çözüldü. Üzerine 1.156 g (0.01779 mol) NaN₃ eklendi. 153 °C'de geri soğutucu altında 4 saat karıştırıldı. Tepkime bittikten sonra ürünün bulunduğu balonun üzerine 20 ml doymuş NH₄Cl eklendi. Balon oda sıcaklığına ulaştıktan sonra önce 6x25 ml CHCl₃ ile ekstraksiyon işlemi yapıldı. Na₂SO₄ ile kurutuldu. Evaporatörde düşük basınç altında konsantre edildi. 0.25 g sarı jelimsi ürün elde edildi (Verim: %83) (Nayak & Whistler, 1969).

¹H-NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 5.79 (d, J = 3.6 Hz, 1H, Anomerik), 4.56 (d, J = 3.6 Hz, 1H, H-Şeker), 4.22 - 4.13 (m, 1H, H-Şeker), 4.07 (dd, J = 8.7, 6.1 Hz, 1H, H-Şeker), 4.03 (m, 2H, H-Şeker), 3.92 (dd, J = 8.7, 4.7 Hz, 1H, H-Şeker), 1.45 (s, 3H, İp-Me), 1.37 (s, 3H, İp-Me), 1.30 (s, 3H, İp-Me), 1.26 (s, 3H, İp-Me). ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 109.60 (C-Şeker), 105.05 (C-Anomerik), 80.49 (C-Şeker), 73.05 (C-Şeker), 67.66 (C-Şeker) 26.88 (İp-Me), 26.66 (İp-Me), 26.20 (İp-Me), 25.16 (İp-Me). IR (cm⁻¹): 2987, 2105 (N₃), 1373, 1213, 1164, 1018, 845.

2.3. 5-*O-p*-Toluensülfonil-1,2-*O*-izopropiliden- α -D-ksilofuranoz sentezi (5)

1.0 g (0.0053 mol) 1,2-*O*-İzopropiliden- α -D-ksilofuranoz (4) 7.6 mL piridinde -5 °C'de (tuz-buz karışımı) çözüldü. Üzerine damla damla 10 ml piridin'de çözülmüş *p*-TsCl eklendi. İnce tabaka kromatografisi ile 10:1 toluen:metanol sisteminde izlendi. Bir gece bu sıcaklıkta karıştırıldı ve deney bittikten sonra 20 ml saf su ve 20 ml CHCl₃ ile ekstraksiyon yapıldı. Evaporatörde düşük basınç altında konsantre edildi. 1.41 g beyaz katı ürün elde edildi (Verim: %77) Erime noktası: 135 °C (Sharma & Gopinath, 2003).

¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 7.74 (d, J = 8.3 Hz, 2H, Ar-H), 7.30 (d, J = 8.1 Hz, 2H, Ar-H), 5.81 (d, J = 3.6 Hz, 1H, Anomerik), 4.45 (d, J = 3.6 Hz, 1H, H-Şeker), 4.32 - 4.21 (m, 3H, H-Şeker), 4.06 (dd, J = 13.5, 8.6 Hz, 1H, H-Şeker), 2.39 (s, 3H, Ar-H), 2.17 (d, J = 5.1 Hz, 1H, H-Şeker), 1.40 (s, 3H, İp-Me), 1.23 (s, 3H, İp-Me). ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 145.27 (C-Ar), 132.18 (C-Ar), 130.00 (C-Ar), 128.01 (C-Ar), 104.94 (C-Anomerik), 84.99 (C-Şeker), 74.26 (C-Şeker), 65.98 (C-Şeker), 26.76 (İp-Me), 26.18 (İp-Me), 21.81 (Toluen-Me).

2.4. 5-Deoksi-5-azido -1,2-*O*-izopropiliden- α -D-ksilofuranoz sentezi (6)

0.92 g (0.0026 mol) 5-*O-p*-Toluensülfonil-1,2-*O*-izopropiliden- α -D-ksilofuranoz (5) 19 ml DMF içinde çözüldü. Üzerine 2.86 g (0.0439 mol) NaN₃ eklendi. 150 °C'de dört saat karıştırıldı. Tepkime bittikten sonra ürünün bulunduğu balonun üzerine 20 ml saf eklendi. Balon oda sıcaklığına ulaştıktan sonra önce 6x25 ml CHCl₃ ile sonra 4x75 ml saf su ile ekstraksiyon işlemi yapıldı. Na₂SO₄ ile kurutuldu. Evaporatörde düşük basınç altında konsantre edildi. 0.45 g beyaz renkli katı ürün elde edildi (Verim: %80). Erime noktası: 70 °C (McDevitt & Lansbury, 1996).

¹H-NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 5.88 (d, J = 3.6 Hz, 1H, Anomerik), 4.46 (d, J = 3.6 Hz, 1H, H-Şeker), 4.21 (tt, J = 8.5, 4.2 Hz, 1H, H-Şeker), 4.16 (s, 1H, H-Şeker), 3.53 (dd, J = 6.1, 3.5 Hz, 2H, H-

Şeker), 3.08 (s, 1H, HO-Şeker), 1.43 (s, 3H, İp), 1.25 (s, 3H, İp). ¹³C-NMR (101 MHz, CDCl₃) δ 111.78 (C-(CH₃)₂), 104.54 (C-Anomerik), 85.07 (C-Şeker), 78.48 (C-Şeker), 74.51 (C-Şeker), 49.12 (N3-C), 26.67 (İp-Me), 26.02 (İp-Me). IR (cm⁻¹): 3446 (OH), 2943, 2099 (-N₃), 1661, 1375, 1215, 1071, 1013, 859.

2.5. 3-*O*-*p*-Toluensülfonil-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-galaktofuranoz (8) sentezi

1.0 g (0.0038 mol) 1,2:5,6-di-*O*-İzopropiliden- α -D-galaktofuranoz (7) 4.3 mL piridin içerisinde çözüldü. Üzerine 0.73 g (0.0038 mol) *p*-TsCl tek seferde eklendi. İki gün karıştırıldı. İnce tabaka kromatografisi ile 10:1 toluen:metanol sisteminde izlendi. Tepkimenin bittiği anlaşıldığında su-buz karışımına döküldü. Katı şeker süzüldü ve kurumaya bırakıldı. 0.85 g beyaz renkli katı ürün elde edildi (Verim: %52) Erime noktası: 156 °C.

¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 7.80 (d, *J* = 8.2 Hz, 2H), 7.32 (d, *J* = 8.1 Hz, 2H), 5.46 (d, *J* = 4.8 Hz, 1H), 4.58 (dd, *J* = 7.8, 2.4 Hz, 1H), 4.28 (dd, *J* = 5.1, 2.6 Hz, 1H), 4.24 – 4.17 (m, 2H), 4.12 – 4.01 (m, 2H), 2.42 (s, 3H), 1.48 (s, 3H), 1.35 (s, 3H), 1.32 (s, 3H), 1.28 (s, 3H). ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 144.76 (s), 132.85 (s), 129.74 (s), 128.05 (s), 109.52 (s), 108.86 (s), 96.09 (s), 70.50 (s), 70.39 (s), 70.34 (s), 68.22 (s), 65.86 (s), 25.94 (s), 25.78 (s), 24.88 (s), 24.32 (s), 21.56 (s).

2.6. 3-Deoksi-3-azido-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-gulofuranoz (9) sentezi

0.45 g (0.00108 mol) 3-*O*-*p*-Toluensülfonil-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-galaktofuranoz (8) 10 ml DMF içinde çözüldü. Üzerine 1.156 g (0.01779 mol) NaN₃ eklendi. 150 °C'de dört saat karıştırıldı. Tepkime bittikten sonra ürünün bulunduğu balonun üzerine 20 ml saf eklendi. Balon oda sıcaklığına ulaştıktan sonra önce 6x25 ml CHCl₃ ile sonra 4x75 ml saf su ile ekstraksiyon işlemi yapıldı. Na₂SO₄ ile kuruldu. Evaporatör de düşük basınç altında konsantre edildi. 0.30 g sarı jelimsi ürün elde edildi (Verim: %87).

¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 5.47 (d, *J* = 5.1 Hz, 1H), 4.57 (dd, *J* = 7.8, 2.6 Hz, 1H), 4.28 (dd, *J* = 5.1, 2.6 Hz, 1H), 4.14 (dd, *J* = 7.8, 1.8 Hz, 1H), 3.86 (ddd, *J* = 7.6, 5.4, 1.9 Hz, 1H), 3.46 (dd, *J* = 12.8, 7.8 Hz, 1H), 3.28 (dd, *J* = 12.8, 5.4 Hz, 1H), 1.47 (s, 3H), 1.38 (s, 3H), 1.27 (s, 3H), 1.26 (s, 3H). ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 109.61 (s), 108.80 (s), 96.34 (s), 71.15 (s), 70.79 (s), 70.38 (s), 66.99 (s), 50.66 (s), 26.02 (s), 25.93 (s), 24.87 (s), 24.42 (s).

2.7. 3-Deoksi-3-amino-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-glukofuranoz (10)'un sentezi

0.5 g (1.75 mmol) 3-Deoksi-3-azido-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-glukofuranoz (3) –10 °C'de çift boyunlu balonda 15 mL kurutulmuş THF içinde azot gazı altında çözüldü. 15 dakika karıştırıldıktan sonra üzerine 0.27 g (7.00 mmol) LiAlH₄ eklendi. 4 saat karıştırıldıktan sonra doymuş NH₄Cl ile hidroliz edildi. 3 defa 25 mL CH₂Cl₂ ile ekstrakte edildi. Na₂SO₄ ile kuruldu ve vakumda çözücü uzaklaştırıldı. Sarı jelimsi ürün elde edildi (0.34 g. %74 verim).

¹H-NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 5.78 (d, *J* = 3.6 Hz, 1H), 4.31 (d, *J* = 3.6 Hz, 1H), 4.18 – 4.07 (m, 1H), 4.04 (dd, *J* = 8.2, 6.2 Hz, 1H), 3.91 (ddd, *J* = 13.1, 8.7, 4.2 Hz, 2H), 3.45 (d, *J* = 3.2 Hz, 1H), 1.42 (s, 3H), 1.32 (s, 3H), 1.28 (s, 3H), 1.21 (s, 3H). ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 111.10, 108.93, 104.80, 86.30, 81.27, 72.71, 67.79, 57.10, 26.62, 26.58, 25.93, 25.05.

2.8. 5-Deoksi-5-amino-1,2-*O*-izopropiliden- α -D-ksilofuranoz (11)'un sentezi

0.5 g (2.32 mmol) 5-Deoksi-5-azido-1,2-*O*-izopropiliden- α -D-ksilofuranoz (5) –10 °C'de çift boyunlu balonda 15 mL kurutulmuş THF içinde azot gazı altında çözüldü. 15 dakika karıştırıldıktan sonra üzerine 0.35 g (9.28 mmol) LiAlH₄ eklendi. 4 saat karıştırıldıktan sonra doymuş NH₄Cl ile hidrolize edildi. 3 defa 25 mL CH₂Cl₂ ile ekstrakte edildi. Na₂SO₄ ile kurutulduktan sonra düşük basınç altında çözücü uzaklaştırıldı. Renksiz jelimsi ürün elde edildi (0.23 g 53 % verim).

¹H-NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 5.90 (d, *J* = 3.6 Hz, 1H), 4.42 (d, *J* = 3.6 Hz, 1H), 4.24 (d, *J* = 2.8 Hz, 1H), 4.06 (dd, *J* = 5.1, 3.2 Hz, 1H), 3.43 (m, 3H), 3.09 (dd, *J* = 13.3, 1.8 Hz, 1H), 1.41 (s, 3H), 1.25 (s, 3H). ¹³C-NMR (101 MHz, CDCl₃) δ 111.35, 105.02, 86.10, 78.20, 77.18, 40.87, 26.80, 26.13.

2.9. 3-Deoksi-3-amino-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-gulofuranoz (12)'un sentezi

0.5 g (1.75 mmol) 3-Deoksi-3-azido-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-gulofuranoz (9) -10°C 'de çift boyunlu balonda 15 mL kurutulmuş THF içinde azot gazı altında çözüldü. 15 dakika karıştırıldıktan sonra üzerine 0.27 g (7.00 mmol) LiAlH_4 eklendi. 4 saat karıştırıldıktan sonra doymuş NH_4Cl ile hidrolize edildi. 3 defa 25 mL CH_2Cl_2 ile ekstrakte edildi. Na_2SO_4 ile kurutulduktan sonra düşük basınç altında çözücü uzaklaştırıldı. Renksiz jelimsi ürün elde edildi (0.37 g, % 82 verim).

^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 5.56 (d, $J = 5.2$ Hz, 1H), 4.61 (dd, $J = 7.8, 2.2$ Hz, 1H), 4.31 (dd, $J = 5.2, 2.2$ Hz, 1H), 4.22 (dd, $J = 7.8, 1.8$ Hz, 1H), 3.72 – 3.68 (m, 1H), 2.97 (dd, $J = 13.1, 7.7$ Hz, 1H), 2.85 (dd, $J = 13.1, 4.8$ Hz, 1H), 1.55 (s, 3H), 1.44 (s, 3H), 1.33 (s, 3H), 1.32 (s, 3H). ^{13}C NMR (101 MHz, CDCl_3) δ 109.08, 108.34, 96.34, 71.69, 70.74, 70.56, 69.39, 42.28, 26.02, 25.92, 24.87, 24.30.

2.10. Şeker-ferrosenil imin (13) sentezi

0.5 g (1.09 mmol) 3-Deoksi-3-amino-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-glukofuranoz (10) ile 0.23 g (1.09 mmol) ferrosenkarboksaldehit 15 mL mutlak etanol içinde çözüldü. 4 saat geri soğutucu altında kaynatıldı. Daha sonra düşük basınç altında etanol uzaklaştırıldı. 0.71 g imin elde edildi. Koyu kırmızı jelimsi ürün elde edildi (Verim %96) (Onar, 2014).

^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 8.11 (s, 1H-imin), 5.97 (s, 1H-anomerik), 4.69 (s, 1H-şeker), 4.46 (s, 1H-şeker), 4.30 (broad s, 3H(2H-Fc, 1H-şeker)), 4.19 (s, 1H-şeker), 4.15 (s, 5H-Ferrosen), 4.04 (broad s, 3H(2H-Fc, 1H-şeker)), 3.80 (s, 1H-şeker), 1.49 (s, 3H-İp-Me), 1.37 (s, 3H-İp-Me), 1.24 (s, 3H-İp-Me), 1.22 (s, 3H-İp-Me). ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ 163.88 (C=O), 111.59, 109.13, 105.69, 85.77, 81.85, 79.96, 75.66, 72.92, 70.84, 70.52, 70.06, 69.64, 69.15 (5C, s-Fc), 67.43, 67.16, 27.06, 26.95, 26.30, 25.53.

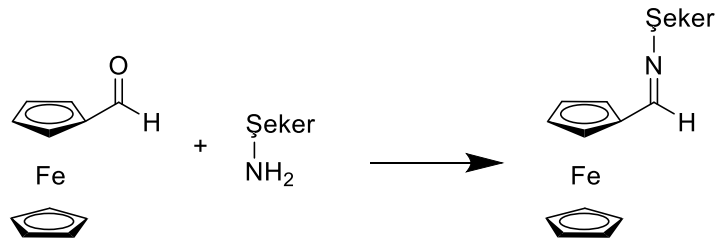
2.11. Şeker-ferrosenil imin (15) sentezi

0.5 g (1.09 mmol) 3-Deoksi-3-amino-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-gulofuranoz (12) ile 0.23 g (1.09 mmol) ferrosenkarboksaldehit 15 mL mutlak etanol içinde çözüldü. 4 saat geri soğutucu altında kaynatıldı. Daha sonra düşük basınç altında etanol uzaklaştırıldı. 0.69 g imin elde edildi. Koyu kırmızı jelimsi ürün elde edildi (Verim %94) (Onar, 2014).

^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 8.10 (s, 1H-imin), 5.47 (s, 1H-anomerik), 4.60 (bs, 1H-şeker), 4.54 (s, 2H-Fc), 4.27 (s, 2H-Fc), 4.15 (s, 5H-Fc), 4.03 (bs, 1H-şeker), 3.67 (bs, 1H-şeker), 3.51 (bs, 1H-şeker), 1.50 (s, 3H-İp-Me), 1.43 (s, 3H-İp-Me), 1.26 (s, 3H-İp-Me), 1.25 (s, 3H-İp-Me). ^{13}C -NMR (101 MHz, CDCl_3) δ 163.66, 109.08, 108.50, 96.39, 80.22, 71.81, 70.81, 70.60, 70.45, 70.34, 69.62, 69.19, 68.76, 68.20, 67.10, 61.35, 26.12, 26.07, 25.01, 24.50.

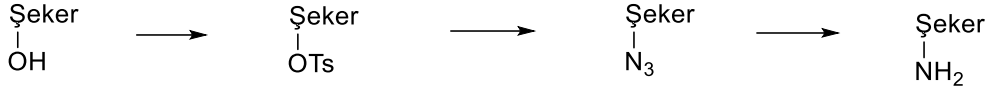
3. Bulgular

Çalışmamızda ana hedef yeni ferrosenil-şeker türevi kiral imin katalizörlerinin sentezlenmesi ve aldehitlere asimetrik etil katılmasında katalizör olarak test edilmesidir. Hedef kiral ferrosenil-şeker imin katalizörleri Şekil 3'deki yöntemle sentezlenmiştir.



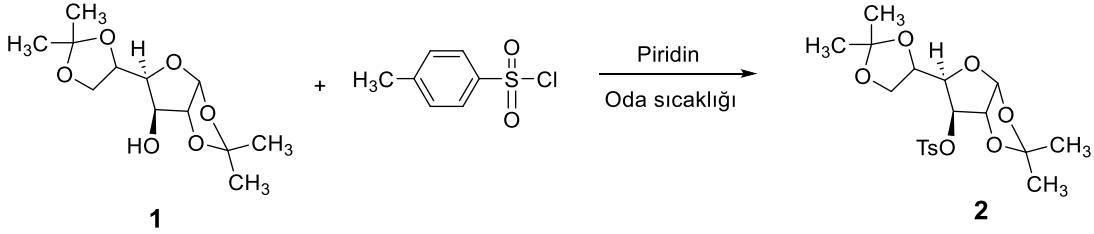
Şekil 3. Kiral ferrosenil-şeker imin katalizör sentezi.

Sentetik yöntemle göre amino-şekerlerin sentezi için azür-şekerler ve azür-şekerler için ise tosil-şeker bileşikleridir.



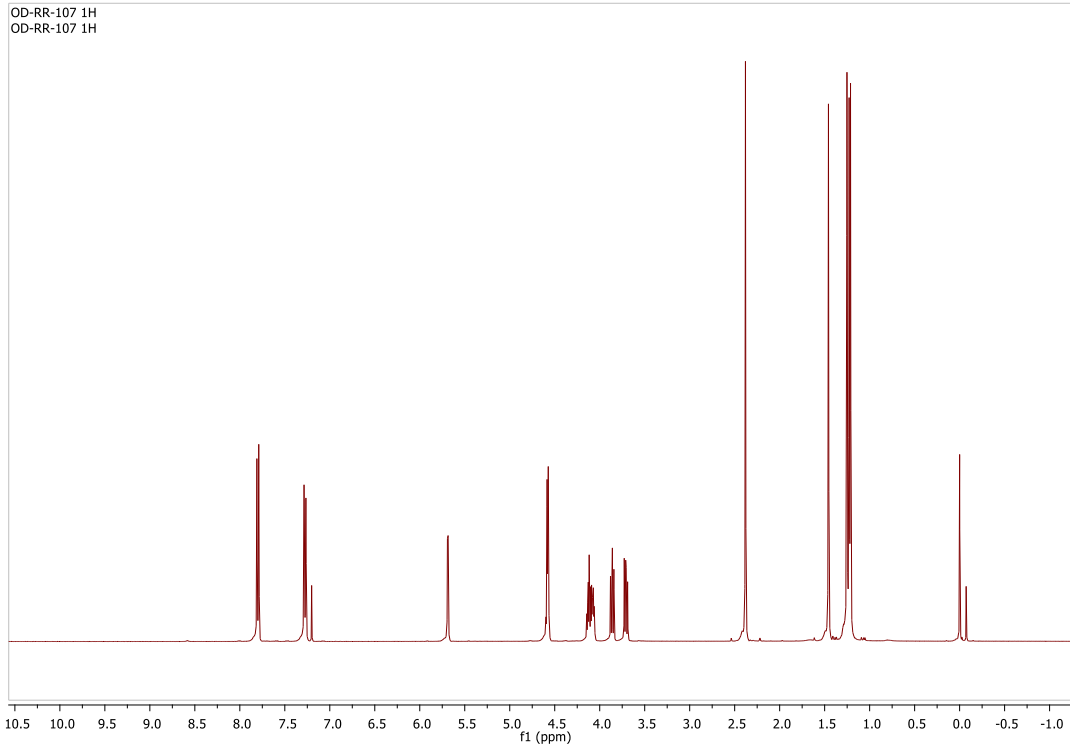
Şekil 4. Amino-şeker sentezi.

İlk tosil türevine dönüştürülen şeker, (1) numaralı bileşik olmuştur. Oda sıcaklığında aşırı miktarda *p*-TsCl kullanılarak piridin içinde yapılmıştır (Şekil 5). Ürün olarak 3-*O*-*p*-toluensülfonil-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-allofuranoz (2) saf bir şekilde elde edilmiştir.



Şekil 5. 3-*O*-*p*-toluensülfonil-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-allofuranoz sentezi.

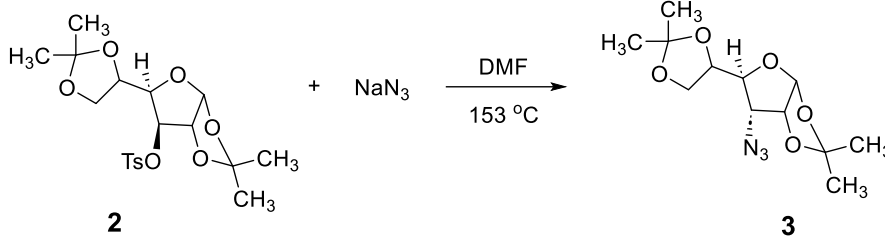
2 numaralı bileşiğin ¹H NMR spektrumu serbest hidroksilin (3-OH) tamamının tosil esterlerine dönüştüğünü açıkça göstermektedir. Karbohidratların sentezinde saflık derecesi anomerik hidrojen ile kontrol edilmektedir. Bileşik 2'nin ¹H-NMR spektrumundaki anomerik hidrojenin (5.69 ppm) tek çeşit olması (tek çiftli pik olması) bileşiğin saf olduğunu göstermektedir. Anomerik karbondaki hidrojenin tek çeşit olması bize başlangıç bileşiğinin kalmadığını ispatlamaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. 3-*O*-*p*-toluensülfonil-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-allofuranoz (2)'un ¹H-NMR spektrumu.

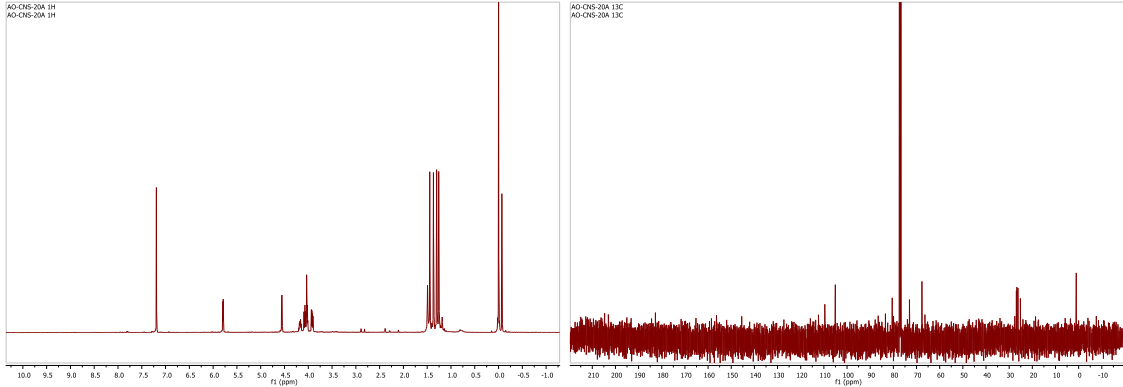
7.3 ve 7.7 ppm'lerdeki sinyaller ikilinin ikilisi (dd) olarak beklenildiği gibi yarılmıştır ve fenil grubundaki hidrojenlere ait sinyallerdir. 5.69 ppm'deki sinyal ise anomerik karbondaki hidrojene aittir, o da beklenildiği gibi ikili (d) olarak sinyal vermiştir. 2.45 ppm'deki sinyal ise tosil grubunun metiline aittir ve tekli (s) olarak sinyal vermiştir.

Bileşik 2'nin (3-*O-p*-toluensülfonil-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-allofuranoz) daha sonra NaN_3 ile azür türevine (3) yer değiştirme tepkimesi ($\text{S}_{\text{N}}2$) ile çevrilmiştir. Tepkime yaklaşık $153\text{ }^\circ\text{C}$ 'de DMF (*N,N*-dimetilformamit) içinde yapılmıştır. NaN_3 miktarı fazla kullanılmış ve tepkime bileşik 2'nin tamamı azür türevine, 3-deoksi-3-azido-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-glukofuranoz'a (3) dönüşmüştür (Şekil 7). DMF içinde NaN_3 'ün çözünürlüğü düşük olduğundan ötürü fazla miktarda kullanılmıştır. Daha düşük sıcaklıklardaki denemelerde ise tosil grubunun tamamen azür grubuna dönmediği görülmüştür.



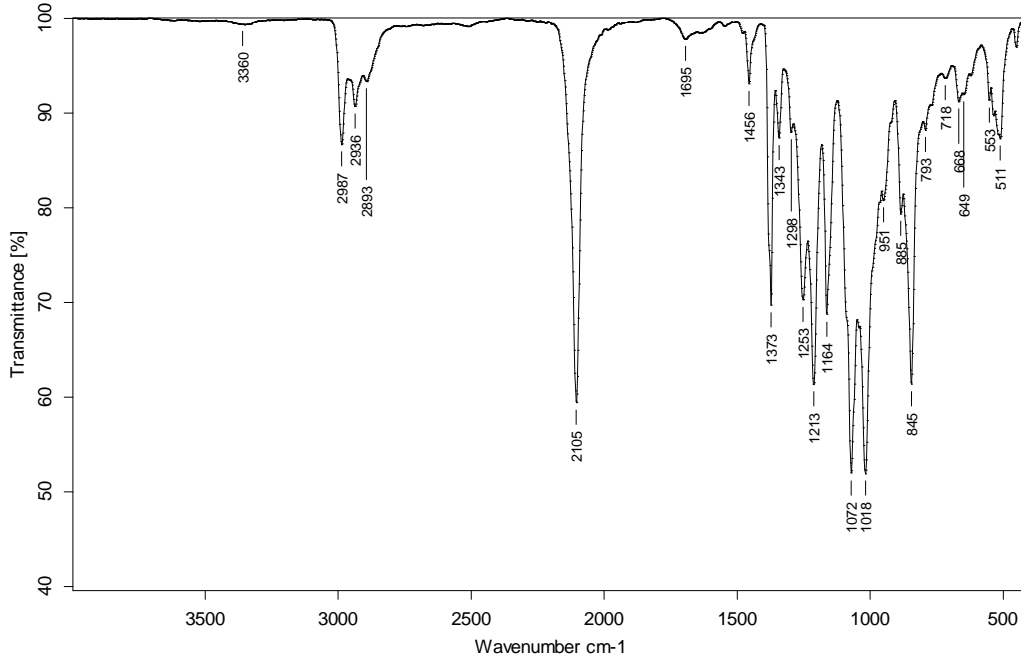
Şekil 7. 3-deoksi-3-azido-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-glukofuranoz (3) sentezi.

Elde edilen azür-gluko türevi (3) bileşiğin 3 numaralı karbondaki stereokimya değiştiği için bileşiğin ismi de değişmiştir ve allo şekeri değil gluko türevi olarak adlandırılmıştır (Jary ve ark., 1969). ^1H -NMR spektrumu incelendiğinde tosil grubuna ait sinyallerin tamamen kaybolduğu net bir şekilde gözükmemektedir (Şekil 8).



Şekil 8. 3-deoksi-3-azido-1,2:5,6-di-*O*-izopropiliden- α -D-glukofuranoz (3)'ün ^1H -NMR ve ^{13}C -NMR spektrumu.

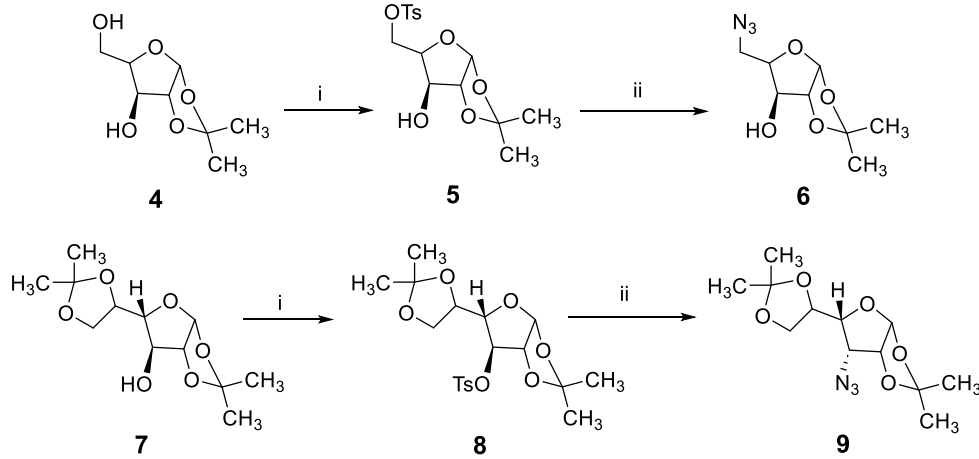
Başlangıç maddesinde (2) ^1H -NMR spektrumunda 7.3 ve 7.7 ppm'deki sinyaller (Şekil 6) toluen grubunun feniline aittir ve ürünün (3) ^1H -NMR spektrumunda tamamen kaybolduğu görülmektedir. Ayrıca tosil grubunun 2.45 ppm'deki metil hidrojenlerine ait tekli sinyali de beklenildiği gibi kaybolmuştur. Anomerik karbondaki hidrojen ise beklenildiği gibi ikili (d) olarak gözükmemektedir ve ürünün (3) saf olduğunun bir göstergesidir. Bileşik 3'ün infrared (IR) spektrumu bileşiğin N_3 grubuna çevrildiğini açıkça göstermektedir (Şekil 9).



Şekil 9. 3-deoksi-3-azido-1,2:5,6-di-O-izopropiliden- α -D-glukofuranoz IR spektrumu.

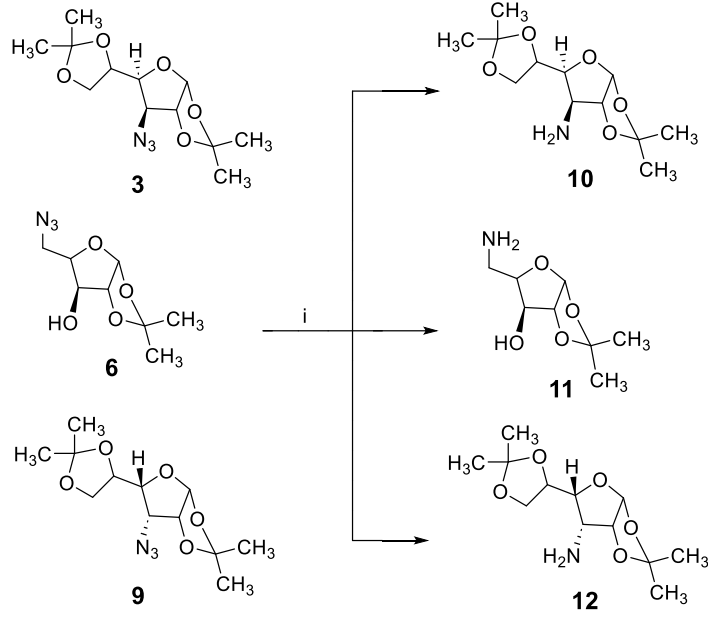
3-deoksi-3-azido-1,2:5,6-di-O-izopropiliden- α -D-glukofuranoz (3)'ün IR spektrumunda bulunan 2105 cm^{-1} de bulunan keskin sinyal N_3 grubuna aittir. Ayrıca bu spektrum 3200 cm^{-1} üzerinde geniş ve büyük bir sinyal olmaması serbest hidroksil grubunun olmadığını da ispatlamaktadır.

Çalışmanın devamında 3 no'lu azido-şeker türevinin sentetik yolu ile aynı metotlar kullanarak 6 ve 9 no'lu şekerlerin azür türevleri sentezlenmiştir (Şekil 10). Bileşik 5'in sentezinde başlangıç maddesi olan bileşik 4, seçici olarak tosil esterlerine $-5\text{ }^\circ\text{C}$ 'de çevrilmiştir. Bu seçicilik, alkollerin birinin primer diğerinin sekonder alkol olmasından kaynaklanmaktadır. Tepkime sonunda düşük sıcaklıkta sadece primer alkoller tosil esterlerine dönüşmektedir.



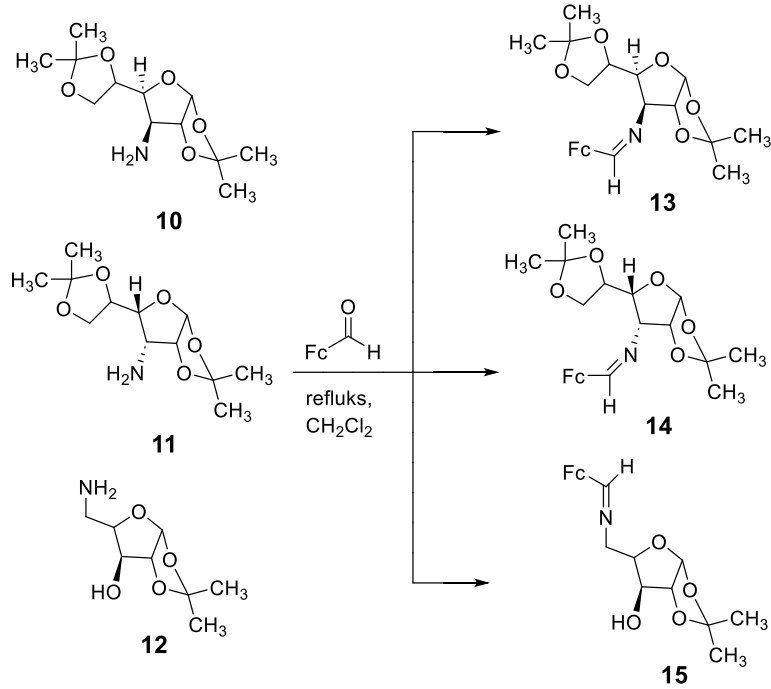
Şekil 10. 6 ve 9 no'lu azido şekerlerin sentezi. i) p-TsCl-piridin oda sıcaklığı, ii) NaN_3 -DMF $153\text{ }^\circ\text{C}$.

Sentezlenen azür-şekerler; 3-deoksi-3-azido-1,2:5,6-di-O-izopropiliden- α -D-glukofuranoz (3), 5-deoksi-5-azido-1,2-O-izopropiliden- α -D-ksilofuranoz (6) ve 3-deoksi-3-azido-1,2:5,6-di-O-izopropiliden- α -D-gulofuranoz (9) LiAlH_4 indirgeni kullanılarak amino türevi şekerler elde edilmiştir (Şekil 11).



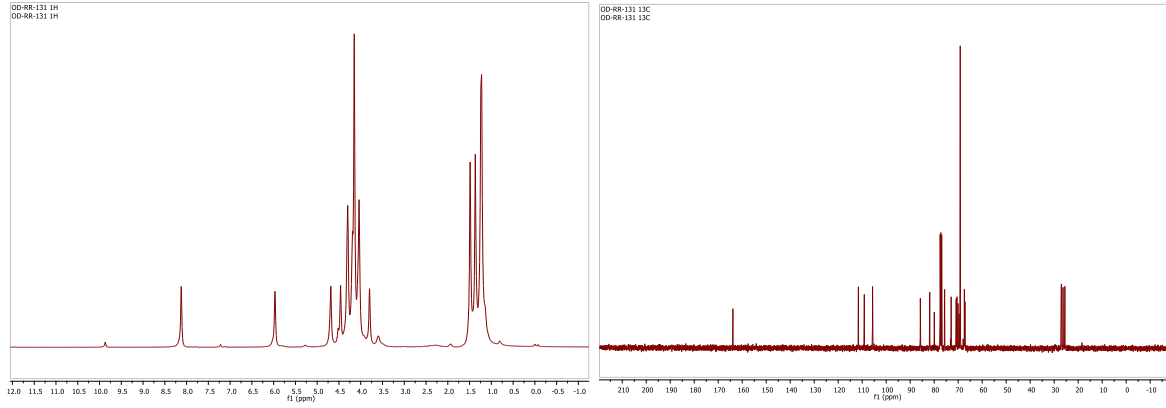
Şekil 11. Amino şeker sentezleri. i) LiAlH₄-Dietileter -10°C.

Sentetik bölümün son basamağında kiral ferrosenil-şeker amin türevleri (10, 11 ve 12) ile ferrosen karboksaldehit diklorometan içinde reflüks edilmiştir ve kiral ferrosen-şeker imin türevleri sentezlenmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Kiral ferrosenil-şeker imin türevleri sentezi.

13 ve 15 no'lu iminler, ferrosen karboksaldehit ile 10 ve 12 no'lu aminlerden %95'den yüksek saflık derecesinde elde edilmiştir ve yapıları spektroskopik yöntemlerle karakterize edilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. 13 no'lu ferrosenil-şeker imin'in ¹H-NMR ve ¹³C-NMR spektrumları.

14 no'lu imin ise aynı metot ile 11 no'lu aminden sentezlenmiştir. Bu bileşiğin (14) ¹H-NMR spektrumu incelendiğinde, numune içinde aldehit oranının %5'in altında olduğu görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışma ile yapısında şeker ve ferrosen iskelet yapılarını içeren yeni imin türevleri (13-15) sentezlenmiş ve spektroskopik yöntemler ile karakterize edilmiştir. Bu kiral iminler yeni kiral bileşiklerin sentezinde kullanılabilirler. Ayrıca sentezlenen iminler enantiyoseçici tepkimelerde kiral ligand veya kiral organokatalizör olarak kullanılabilir yapısal potansiyele sahiptir. Çalışmada sentezlenen 13-15 no'lu iminler hem ferrosen hem de şeker iskeleti içeren ilk Schiff bazlarıdır. Gelecekte yeni tepkimelerde kiral katalizör olarak testlerinin yapılması planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 114Z688 no'lu proje ile desteklenmiştir. TÜBİTAK'a verdiği destekten dolayı teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Aitken, R. A., & Kilenyi, S. N. (2012). *Asymmetric synthesis*. Springer Netherlands.
- Chung, Y.-M., & Rhee, H.-K. (2003). Silica-supported dendritic chiral auxiliaries for enantioselective addition of diethylzinc to benzaldehyde. *Comptes Rendus Chimie*, 6(7), 695-705. [https://doi.org/10.1016/S1631-0748\(03\)00125-5](https://doi.org/10.1016/S1631-0748(03)00125-5)
- Cozzi, P. G. (2004). Metal-Salen Schiff base complexes in catalysis: practical aspects. *Chemical Society Reviews*, 33, 410-421. <https://doi.org/10.1039/B307853C>
- Jary, J., Kefurtova, Z., & Kovar, J. (1969). Amino sugars. XX. Synthesis of 3-amino- and 6-amino-deoxyhexoses of the gluco and allo configuration. *Collection of Czechoslovak Chemical Communications*, 34, 1452-1458. <https://doi.org/10.1135/cccc19691452>
- Keith, J. M., Larrow, J. F., & Jacobsen, E. N. (2001). Practical considerations in kinetic resolution reactions. *Advanced Synthesis & Catalysis*, 343, 5-26. [https://doi.org/10.1002/1615-4169\(20010129\)343:1%3C5::AID-ADSC5%3E3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1615-4169(20010129)343:1%3C5::AID-ADSC5%3E3.0.CO;2-I)
- Kim, J. H., & Scalli, A. R. (2011). Thalidomide: The tragedy of birth defects and the effective treatment of disease. *Toxicological Sciences*, 122(1), 1-6. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfr088>
- Kuroki, Y., & Iseki, K. (1999). A chiral triaminosulfonium salt: design and application to catalytic asymmetric synthesis. *Tetrahedron Letters*, 40(47), 8231-8234. [https://doi.org/10.1016/S0040-4039\(99\)01724-4](https://doi.org/10.1016/S0040-4039(99)01724-4)
- McDevitt, J. P., & Lansbury, P. T. (1996). Glycosamino acids: New building blocks for combinatorial synthesis. *Journal of American Chemical Society*, 118(16), 3818-3828. <https://doi.org/10.1021/ja9525622>
- Morrison, J. D. (1985). *Asymmetric synthesis*. Academic Press: New York.

- Nayak, U. G., & Whistler, R. L. (1969). Nucleophilic displacement in 1,2:5,6-di-O-isopropylidene-3-O-(p-tolylsulfonyl)-D-glucofuranose. *Journal of Organic Chemistry*, 34(12), 3819-3822. <https://doi.org/10.1021/jo01264a017>
- Noyori, R. (1994). *Asymmetric catalysis in organic synthesis*. John Wiley: New York.
- Ojima, I. (2000). *Catalytic asymmetric synthesis*. Wiley-VCH: New York.
- Onar, K. (2014). *Yeni kiral imin katalizörleri ile benzaldehite asimetric dietilçinko katılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye.
- Richardson, A. C. (1972). Amino sugars via reduction of azides: Derivatives of 3-Amino-3-deoxy-d-glucose and 2-Amino-2-deoxy-d-altrose. *General Carbohydrate Method*, 36, 218-223. doi.org/10.1016/B978-0-12-746206-6.50043-6
- Sharma, G. V. M., & Gopinath, T. (2003). Radical cyclisation approach for the synthesis of (+)dihydrocanadensolide, (+)dihydrosporothriolide and their C-3 epimers from d-xylose. *Tetrahedron*, 59(34), 6521-6530. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(03\)01068-8](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(03)01068-8)
- Wang, R., Chen, H., Yan, W., Zheng, M., Zhang, T., & Zhang, Y. (2020). Ferrocene-containing hybrids as potential anticancer agents: Current developments, mechanisms of action and structure-activity relationships. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 190, 112109. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2020.112109>
- Wojaczynska, E., Steppeler, F., Iwan, D., Scherrmann, M.-C., & Marra, A. (2021). Synthesis and applications of carbohydrate-based organocatalysts. *Molecules*, 26(23), 7291. <https://doi.org/10.3390/molecules26237291>
- Xiang, S.-H., & Tan, B. (2020). Advances in asymmetric organocatalysis over the last 10 years. *Nature Communications*, 11, 3786. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17580-z>



Research Article

Roman Domination in Mycielski Graphs: A Study of Some Graphs and a Heuristic Algorithm

Derya DOĞAN DURGUN¹, Emre Niyazi TOPRAKKAYA^{*2}

¹Manisa Celal Bayar University, Arts and Science Faculty, Mathematics, 45110, Manisa, Türkiye

²Manisa Celal Bayar University, Institute of Natural and Applied Sciences, Mathematics, 45110, Manisa, Türkiye

Derya DOĞAN DURGUN, [ORCID No: 0000-0002-9099-5448](https://orcid.org/0000-0002-9099-5448),

Emre Niyazi TOPRAKKAYA, [ORCID No: 0000-0003-1818-4330](https://orcid.org/0000-0003-1818-4330)

*Corresponding author e-mail: toprakkayaemre@gmail.com

Article Info

Received: 25.02.2024

Accepted: 30.05.2024

Online August 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1442759](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1442759)

Keywords

Algorithm,
Graph Theory,
Roman Domination

Abstract: Let $G = (V, E)$ be a graph. A function $f: V \rightarrow \{0,1,2\}$, if $\forall u$ for which $f(u) = 0$ is adjacent to $\exists v$ for which $f(v) = 2$, is called a Roman dominating function, and called in short terms RDF. The weight of an RDF f is $f(V) = \sum_{v \in V} f(v)$. The Roman domination number of a graph G , denoted by $\gamma_R(G)$, is the minimum weight of an RDF on G . This paper presents the results for Roman domination numbers of the Mycielski graphs obtained through Mycielski's construction of the comet, double comet, and comb graphs. An algorithm to determine the Roman domination number of any given graph is also provided.

Mycielski Graflarda Roma Baskınlığı: Bazı Grafların ve Bir Sezgisel Algoritmanın Çalışması

Makale Bilgileri

Geliş: 25.02.2024

Kabul: 30.05.2024

Online Ağustos 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1442759](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1442759)

Anahtar Kelimeler

Algoritma,
Graf Teorisi,
Roma Baskınlığı

Öz: $G = (V, E)$ bir graf olsun. $f(u) = 0$ olan her u tepesinin, $f(v) = 2$ olan en az bir v tepesine bitişik olması koşulunu karşılayan bir Roma baskınlık fonksiyonu (RDF) $f: V \rightarrow \{0, 1, 2\}$. Bir RDF f 'in ağırlığı $f(V) = \sum_{v \in V} f(v)$. Bir G grafinin Roma baskınlık sayısı, $\gamma_R(G)$ ile gösterilir, G 'de bir RDF'nin minimum ağırlığıdır. Bu çalışmada, Mycielski'nin kuyruklu yıldız, çift kuyruklu yıldız ve tarak graflarını oluşturmasıyla elde edilen Mycielski graflarının Roma baskınlık sayılarına ilişkin sonuçlarını sunmaktadır. Ayrıca, herhangi bir grafin Roma baskınlık sayısını belirleyen bir algoritma sağlanmıştır.

1. Introduction

Let $G = (V, E)$ be a simple graph. $V(G)$ is the notation for the vertex set of a graph, and $E(G)$ is for the graph's edge set. The order of a graph means the number of the vertices of a graph, denoted by $|V| = n$. $N(v) = \{u \in V(G) | uv \in E(G)\}$ is the open neighborhood of a vertex v , and closed neighborhood of it is $N[v] = N(v) \cup \{v\}$. The degree of a vertex v is the number of edges incident to v , denoted by $deg(v)$. For a set $S \subseteq V$, $N(S) = \cup_{v \in S} N(v)$, and $N[S] = N(S) \cup S$. A set S of vertices is a dominating set if every vertex in the graph is either in S or adjacent to at least one vertex in S . The

domination number, denoted as $\gamma(G)$, is the smallest possible size of a dominating set that can dominate all the vertices of G . Such a set of G is called a $\gamma(G)$ – set.

In this paper, we consider an algorithm for the Roman domination number, defined by Ian Stewart (Stewart, 1999). Roman dominating function (RDF) on a graph $G = (V, E)$ is a function $f: V \rightarrow \{0, 1, 2\}$ satisfying the condition that every vertex u for which $f(u) = 0$ is adjacent to at least one vertex v for which $f(v) = 2$ (Dreyer, 2000). The weight of an RDF is the value $w(f) = \sum_{v \in V} f(v)$. The Roman domination number of a graph is the minimum weight of an RDF on G , denoted by $\gamma_R(G)$. $\gamma_R(G)$ – function is a Roman dominating function of G with weight $\gamma_R(G)$ (Henning & Hedetniemi, 2003). A Roman dominating function f on a vertex set V can be represented by the ordered partition (V_0, V_1, V_2) of V , where $V_i = \{v \in V \mid f(v) = i\}$ and $f(v) \in \{0, 1, 2\}$ (Chambers et al., 2009). Its weight is $w(f) = |V_1| + 2|V_2|$. If someone needs additional details about the parameters of domination, as well as the associated terminologies, can refer to the information provided in the literature (Haynes et al., 1998; West et al., 2001).

Cockayne et al. who proposed the Roman dominating function on graphs ask the following questions: “What are the algorithmic, complexity, and approximation properties of Roman domination?” and, “Can you construct a polynomial algorithm for computing the value $\gamma_R(G)$ for any interval graph G ?” (Cockayne et al., 2004). Liedloff et al. showed that there are linear-time algorithms for obtaining the Roman domination number in interval graphs and cographs. They also introduced a dynamic programming algorithm for solving the same problem specifically in interval graphs (Liedloff et al., 2008).

In the context of corporate structures, different departments, whether large or small, have their distinct chain of command. For smooth and efficient operations, employees and managers must communicate effectively. To simplify the chain of command, each employee should fall under the supervision of at least one manager. For instance, consider the organizational chart of a company, where each person is represented by a vertex. If an employee is supervised by a manager, connect the corresponding vertices with an edge. In graphs with this property, a selected group of employees (S) or the complement set of managers ($V(G) - S$) can serve as dominating sets, reflecting the organizational hierarchy. We explore a variant of domination, known as Roman domination.

This manuscript extends our previous research, which we initially shared as a preprint (Durgun & Toprakkaya, 2021). In this paper, the Roman domination number of some Mycielski graphs is given. Additionally, an algorithm is presented to obtain the Roman domination number.

2. Roman Domination Numbers of Mycielski Graphs of Some Graphs

In this section, theorems for Roman domination numbers of the Mycielski graphs obtained by Mycielski’s construction of the comet, double comet, and comb graphs are given. Mycielski graph of a graph G is the graph $\mu(G) = (V', E')$ with vertex set $V' = V \cup \{v' : v \in V\} \cup \{w\}$ and edge set $E' = E \cup \{vu' : vu \in E\} \cup \{v'w : v', w \in V'\}$.

Theorem 2.1. Let $G = C_{t,r}$ be a comet graph where $t \geq 2$ and $r \geq 1$. Then the Roman domination number of $\mu(G)$ is equal to

$$\gamma_R(\mu(C_{t,r})) = \begin{cases} \left(2\frac{t}{3} + 1\right) + 2 & t \equiv 0 \pmod{3} \\ 2\left\lceil\frac{t}{3}\right\rceil + 2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

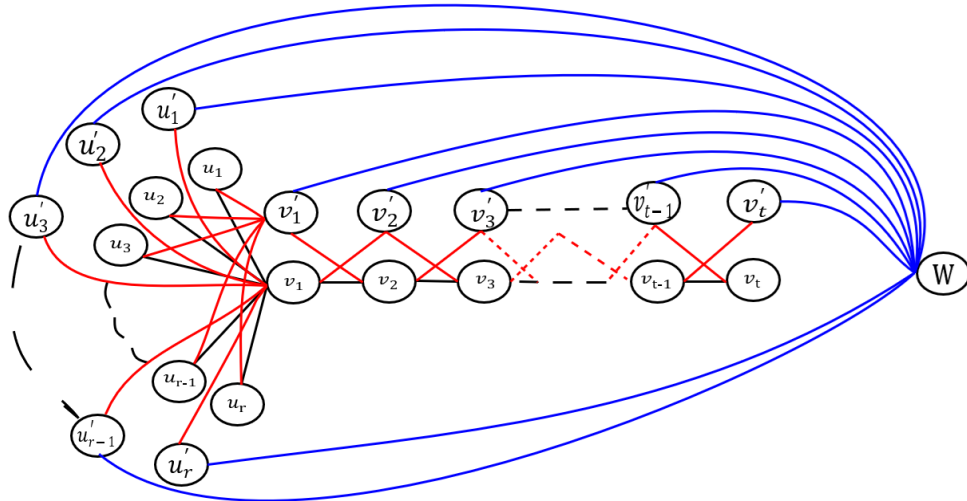


Figure 1. Mycielski of a comet graph.

Proposition 2.2. $\gamma_R(\mu(C_{t,r})) = \gamma_R(C_{t,r}) + 2$

Theorem 2.3. For $p = n - a - b$ and $p \neq 2$, let $G = DC(n, a, b)$ be a double comet graph. The Roman domination number of $\mu(G)$ is equal to

$$\gamma_R(\mu(DC(n, a, b))) = \begin{cases} 2\left(\frac{p}{3} + 1\right) + 2 & p \equiv 0 \pmod{3} \\ 2\left\lfloor \frac{p}{3} \right\rfloor + 2 & p \equiv 1 \pmod{3} \\ \left(2\left\lfloor \frac{p}{3} \right\rfloor + 1\right) + 2 & p \equiv 2 \pmod{3} \end{cases} \quad (2)$$

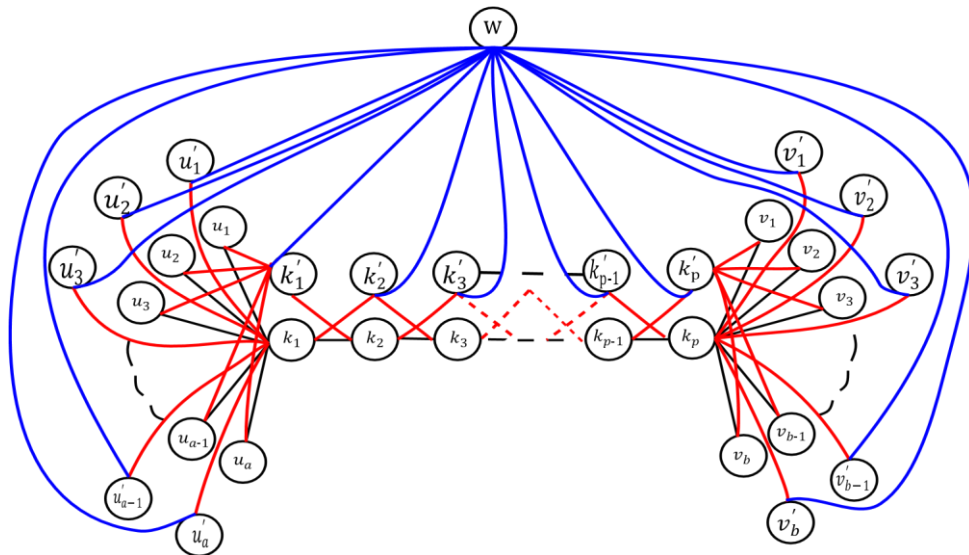


Figure 2. Mycielski of a double comet graph.

Proposition 2.4. $\gamma_R(\mu(DC(n, a, b))) = \gamma_R(DC(n, a, b)) + 2$

Observation 1. We take $p \neq 2$, unlike the definition of the double comet graph, because in the case of $p = 2$, the graph is a Special Roman graph (Kazemi, 2012). Accordingly, when $p = 2$, the value of $\gamma_R(\mu(DC(n, a, b)))$ is equal to $\gamma_R(DC(n, a, b)) + 1$.

Theorem 2.5. Let $G = P_n^+$ be a comb graph. The Roman domination number of $\mu(G)$ is equal to

$$\gamma_R(\mu(P_n^+)) = \begin{cases} 4\frac{n}{3} + 2 & n \equiv 0 \pmod{3} \\ \left(4\left\lfloor\frac{n}{3}\right\rfloor + 2\right) + 2 & n \equiv 1 \pmod{3} \\ \left(4\left\lfloor\frac{n}{3}\right\rfloor - 1\right) + 2 & n \equiv 2 \pmod{3} \end{cases} \quad (3)$$

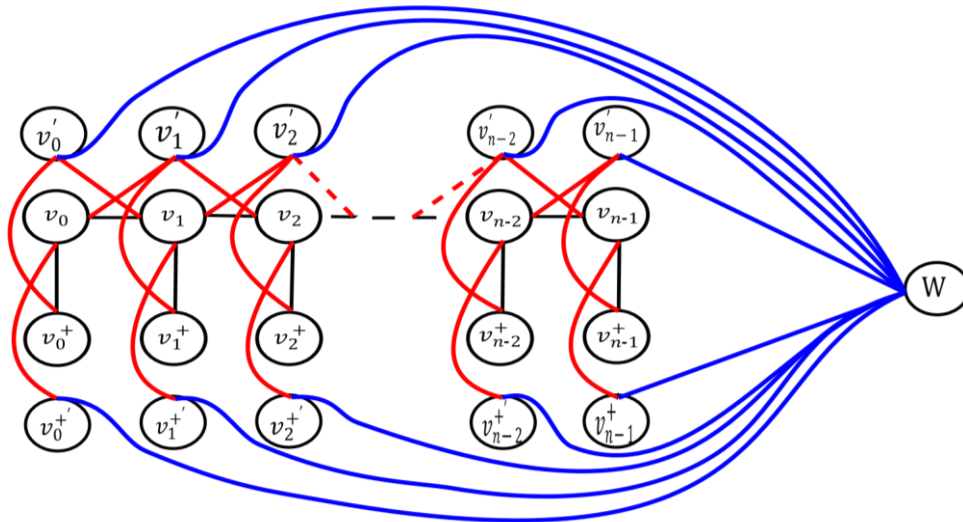


Figure 3. Mycielski of a comb graph.

Proposition 2.6. $\gamma_R(\mu(P_n^+)) = \gamma_R(P_n^+) + 2$

3. An Algorithm for Computing the Roman Domination Number

In this section, we present Algorithm 1 for computing $\gamma_R(G)$ of a graph G .

Our method for sorting the vertices of a graph involves analyzing their degrees, the degree sum of adjacent vertices, and the sum of all vertex degrees. This algorithm repeatedly partitions the graph into smaller sections until it's fully sorted. Once completed, it returns the Roman domination number.

To implement this algorithm for a graph G , its adjacency matrix is entered as data and, the number of vertices is stored in a variable. The while loop runs until the counter reaches the total number of vertices in G . Initially, each vertex dominates itself, so every element in the 'roman domination' matrix variable is assigned the value of 1.

Within the while loop, the matrix 'degree' stores the degrees of each vertex in the graph. The algorithm calculates the sum of the degrees of all vertices, assigning this value to the variable 'deg sum'. Additionally, it calculates the sum of the degrees of adjacent vertices for each vertex and stores this in the 'neighbor deg' matrix. On lines 13-14 of the algorithm, it checks whether the graph's vertices are isolated. If they are, the value 'deg sum + 1' is assigned to the sum of their adjacent vertices' degrees to keep them separate from others. The indices of the graph's vertices are stored in the 'index' matrix, ordered in descending order according to their vertex degrees. In rows 16-24, the algorithm sorts vertices according to their neighbor deg values if their degrees are equal, replacing the 'index' values accordingly. If the value in the first column of the 'index' variable is not zero, the value '2' is written in the corresponding place in the 'roman domination' matrix, indicating that the vertex held in the 'index' variable is included in V_2 . The algorithm then deletes the vertex and its adjacent vertices from the graph's adjacency matrix, incrementing the counter by '1'. As the while loop runs again, it repeats these operations on smaller partitions until the counter reaches the total number of vertices.

Upon the termination of the while loop, the summation of all values within the 'roman domination' matrix is calculated and subsequently assigned to the 'gamma roman' variable. This

resultant value is then returned as the output. An alternative approach would be to extract the values contained within the 'roman domination' matrix to identify the vertices belonging to V_0 , V_1 , and V_2 .

Algorithm 1: Roman Domination Algorithm

Input: An undirected graph $G = (V, E)$

Output: Roman domination number of the graph G

```

1 begin
2    $i = |V|$ ;
3    $a = 1$ ;
4    $\text{gamma\_roman} = 0$ ;
5    $\text{roman\_domination} =$  A matrix of dimension  $1 \times i$  consisting of 1's;
6   while  $a < i$  do
7      $\text{deg\_sum} = 0$ ;
8     for  $m = 1$  to  $i$  do
9        $\text{degree}[m] = |N(m)|$  ;
10       $\text{deg\_sum} = \sum \text{degree}[m]$ ;
11     for  $m = 1$  to  $i$  do
12        $\text{neighbor\_deg}[m] = \sum_{u \in N(m)} \text{deg}(u)$ ;
13       if  $\text{neighbor\_deg}[m] = 0$  then
14          $\text{neighbor\_deg}[m] = \text{deg\_sum} + 1$ ;
15      $\text{index} =$  the variable holding the indices of the vertices in  $V$  sorted in descending
        order according to the  $\text{degree}[m]$  values;
16     for  $m = 1$  to  $i - 1$  do
17       if  $\text{index}[m] \neq 0$  then
18         for  $n = m + 1$  to  $i$  do
19           if  $\text{index}[n] \neq 0$  then
20             if  $\text{degree}[\text{index}[m]] = \text{degree}[\text{index}[n]]$  then
21               if  $\text{neighbor\_deg}[\text{index}[m]] > \text{neighbor\_deg}[\text{index}[n]]$  then
22                  $\text{memo} = \text{index}[m]$ ;
23                  $\text{index}[m] = \text{index}[n]$ ;
24                  $\text{index}[n] = \text{memo}$ ;
25     if  $\text{index}[1] \neq 0$  then
26        $\text{roman\_domination}[\text{index}[1]] = 2$ ;
27     for each vertex  $v \in \text{Adj}(\text{index}[1])$  in  $V$  do
28        $\text{roman\_domination}[v] = 0$ ;
29     Delete  $\text{index}[1]$  vertex in  $V$  and each vertex  $v \in \text{Adj}(\text{index}[1])$  in  $V$  ;
30      $a = a + 1$ ;
31   for  $m = 1$  to  $i$  do
32      $\text{gamma\_roman} = \text{gamma\_roman} + \text{roman\_domination}[m]$ ;
33   Return  $\text{gamma\_roman}$ ;
    
```

Figure 4. Roman Domination Algorithm.

Example 3.1. The figures below illustrate a step-by-step demonstration of our algorithm. Our algorithm uses a simple example of G graph as input.

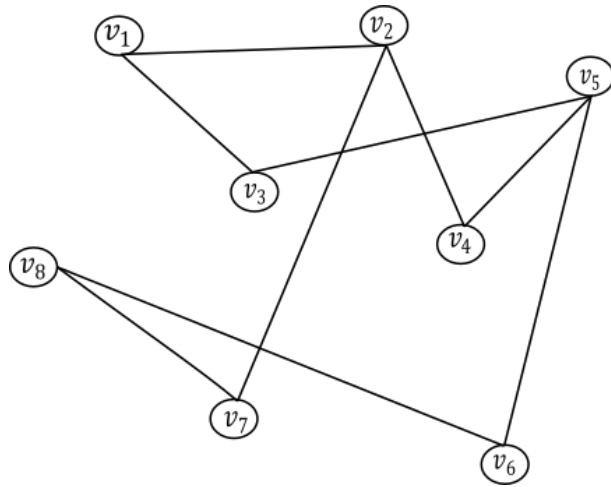


Figure 5. Input graph G and initial conditions of V_1, V_2 . $V_2 = \emptyset$ and $V_1 = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}$.

Table 1. Initial situation of the graph

a	i	$index$	$roman\ domination$	$gamma\ roman$
1	8	[0 0 0 0 0 0 0 0]	[1 1 1 1 1 1 1 1]	0

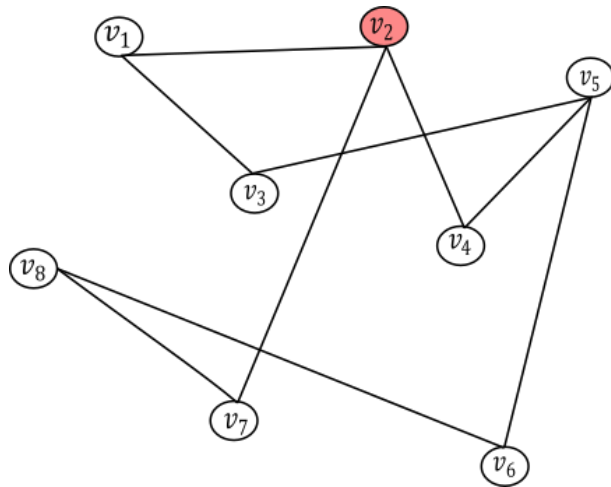


Figure 6. First cycle of the algorithm $V_2 = \{v_2\}$, $V_1 = \{v_1, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}$.

Table 2. First Iteration

a	i	$index$	$roman\ domination$	$gamma\ roman$
1	8	[2 5 4 1 3 6 7 8]	[1 2 1 1 1 1 1 1]	0

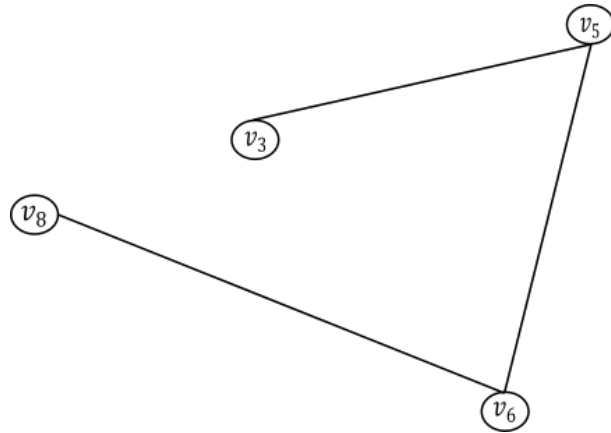


Figure 7. The reduced graph at the beginning of the second cycle $V_2 = \{v_2\}$, $V_1 = \{v_3, v_5, v_6, v_8\}$.

Table 3. Situation at the beginning of the second cycle

<i>a</i>	<i>i</i>	<i>index</i>	<i>roman domination</i>	<i>gamma roman</i>
2	8	[2 5 4 1 3 6 7 8]	[0 2 1 0 1 1 0 1]	0

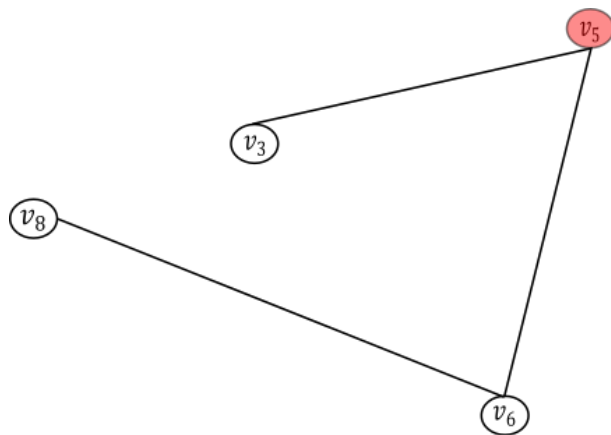


Figure 8. Second cycle of the algorithm $V_2 = \{v_2, v_5\}$, $V_1 = \{v_3, v_6, v_8\}$.

Table 4. Second Iteration

<i>a</i>	<i>i</i>	<i>index</i>	<i>roman domination</i>	<i>gamma roman</i>
2	8	[5 6 3 8 0 0 0 0]	[0 2 1 0 2 1 0 1]	0



Figure 9. The reduced graph at the beginning of the third cycle $V_2 = \{v_2, v_5\}$, $V_1 = \{v_8\}$.

Table 5. Situation at beginning of the third cycle

<i>a</i>	<i>i</i>	<i>index</i>	<i>roman domination</i>	<i>gamma roman</i>
3	8	[5 6 3 8 0 0 0 0]	[0 2 0 0 2 0 0 1]	0

In the end, our algorithm exits the loops by doing no changes in the *roman domination* matrix when only isolated vertices left because the *index*[1] variable will be equal to 0 in every cycle. Then it calculates the result of the equation $\gamma_{R(G)} = \min\{|V_1| + 2|V_2|\}$ and returns the value, $\gamma_{R(G)} = 5$.

Table 6. Situation at the end

<i>a</i>	<i>i</i>	<i>index</i>	<i>roman domination</i>	<i>gamma roman</i>
8	8	[0 0 0 0 0 0 0 0]	[0 2 0 0 2 0 0 1]	5

3.1. Correctness of the Roman domination algorithm

The algorithm's correctness will be proven by demonstrating the dominance and minimality properties. Loop invariants and mathematical reasoning will be used to prove these properties.

Proof. Consider the input graph $G = (V, E)$ and set of vertices D selected by the algorithm. At the outset, all vertices in the Roman domination matrix of G are initially dominated by 1. During each iteration of the while loop, the algorithm chooses the remaining vertex with the highest degree, except in the case of equality when it also looks for the neighbor degree. The algorithm then updates the Roman domination values of the selected vertex and its adjacent vertices, setting the former to 2 and the latter to 0. This process continues until all vertices are removed. At each iteration, the algorithm sets the Roman domination value of the selected vertex to 2, which is greater than the value of any previously unselected vertex (which is 1). The algorithm terminates when all vertices have been removed from G . At this point, the set of vertices D selected by the algorithm dominates all other vertices. Every vertex has either been selected and given a Roman domination value of 2, or has been adjacent to a selected vertex, or has a Roman domination value of 1, and therefore dominates itself. Thus, we have demonstrated that the Dominance Property holds.

Let's assume there's a vertex, $v \in D$, that, if removed from D , would result in a new set D' that doesn't dominate all other vertices. Since v is in D , it must've been picked by the algorithm at some point during iteration k . If we were to remove v from D , no vertex adjacent to v would have its Roman domination value set to 0 in subsequent iterations. This means there's a vertex, u , adjacent to v where *roman domination*[u] = 2. However, this contradicts the algorithm's procedure, which ensures that the Roman domination value of any vertex adjacent to the selected vertex is set to 0. Therefore, our assumption was incorrect, and the set of vertices selected by the algorithm is minimal.

Applying the Dominance Property and Minimality Property, it can be inferred that the Roman Domination Algorithm accurately calculates the Roman domination number for any input graph. This algorithm guarantees that the chosen vertex set dominates all other vertices and is the smallest possible set.

□

3.2. Complexity of the Roman domination algorithm

The Roman Domination Algorithm's time complexity increases quadratically with the number of vertices in the input graph, which can cause performance issues when dealing with large graphs. However, for simple, undirected, and planar graphs, the overall time complexity can be estimated as $O(|V|) + O(|V| \log |V|)$. Planar graphs have a limited degree, which enables quick degree calculation in linear time, resulting in a lower time complexity compared to the general case where degree calculation has a complexity of $O(|V|^2)$.

In practice, the time complexity of the Roman Domination Algorithm for planar graphs is dominated by the sorting term $O(|V| \log |V|)$ due to the necessity of sorting the vertices based on their degrees.

4. Conclusion

Our algorithm has undergone thorough testing on various established graph categories, including paths, cycles, and trees. Moreover, we have conducted tests on graph classes that have been

explored in the context of Roman domination numbers, as well as on their Mycielski graph counterparts. In addition, we have tested our algorithm on any graph generated by the Watts-Strogatz model using the MATLAB program, and we have validated the accuracy of our results through manual verification. In a recent publication, we conducted extensive calculations for different classes of graphs, with different numbers of vertices (Durgun & Toprakkaya, 2023). Our findings provided conclusive evidence regarding the algorithm's effectiveness.

It has been crafted to handle intricate data structures with ease, delivering top-notch results every time. By following our intuitive, user-friendly instructions and leveraging our helpful visual aids, our algorithm empowers users to interpret and analyze complex data structures with greater ease, ultimately resulting in more informed decisions and increased productivity.

References

- Chambers, E. W., Kinnersley, B., Prince, N., & West, D. B. (2009). Extremal problems for Roman domination. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 23(3), 1575-1586. <https://doi.org/10.1137/070699688>
- Cockayne, E. J., Dreyer Jr, P. A., Hedetniemi, S. M., & Hedetniemi, S. T. (2004). Roman domination in graphs. *Discrete Mathematics*, 278(1-3), 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.disc.2003.06.004>
- Dreyer, P. A. (2000). *Applications and variations of domination in graphs*. (PhD), Rutgers University, New Jersey.
- Durgun, D. D., & Toprakkaya, E. N. (2021). Roman domination of the Comet, Double Comet, and Comb Graphs. *arXiv preprint arXiv:2102.07902*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.07902>
- Durgun, D. D., & Toprakkaya, E. N. (2023). Roman domination on some graphs. *Journal of Modern Technology and Engineering*, 8(2), 96-104.
- Haynes, T. W., Hedetniemi, S., & Slater, P. (1998). *Fundamentals of domination in graphs*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482246582>
- Henning, M. A., & Hedetniemi, S. T. (2003). Defending the Roman Empire - A new strategy. *Discrete Mathematics*, 266(1-3), 239-251. [https://doi.org/10.1016/S0012-365X\(02\)00811-7](https://doi.org/10.1016/S0012-365X(02)00811-7)
- Kazemi, A. P. (2012). Roman domination and Mycielski's structure in graphs. *Ars Combinatoria*, 106, 277-287.
- Liedloff, M., Kloks, T., Liu, J., & Peng, S. (2008). Efficient algorithms for Roman domination on some classes of graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 156(18), 3400-3415. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2008.01.011>
- Stewart, I. (1999). Defend the Roman Empire!, *Scientific American*, 281(6), 136-138. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican1299-136>
- West, D. B. (2001). *Introduction to graph theory*. Prentice Hall Upper Saddle River.



Research Article

Logistic and CSG Growth Models for Predicting Life Expectancy

Begüm ÇIĞŞAR^{*1}, Deniz ÜNAL², Abdel-Hack BIO BOULOU², Bassel ALSHAHABY²

¹Independent Researcher, Adana, Türkiye

²Çukurova University, Faculty of Art and Science, Statistics Department, Adana, Türkiye

Begüm ÇIĞŞAR, [ORCID No: 0000-0002-8453-985X](#), Deniz ÜNAL, [ORCID No: 0000-0002-4095-3039](#),
Abdel-Hack BIO BOULOU, [ORCID No: 0000-0001-9054-0390](#), Bassel ALSHAHABY, [ORCID No: 0000-0002-4568-8959](#)

* Corresponding author e-mail: begumcigsar@gmail.com

Article Info

Received: 06.02.2024
Accepted: 01.07.2024
Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1432156](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1432156)

Keywords

CSG model,
Growth models,
Life expectancy,
Life tables,
Logistic model

Abstract: The tables that allow calculating the probability of death at a certain age by recording the number of births/deaths in a population are called life tables. The concept of life expectancy, which is a measure that determines how long a creature will live, is also determined by mortality rates obtained from life tables. It is also possible to model the expected lifetime with some nonlinear mathematical functions. One of the functions that is often used in modeling mortality rates is the logistic growth function. This study aims to propose a model that can be used as an alternative to the logistic growth model and to interpret the mortality rates of countries. In this study, the life expectancy of males and females in Türkiye, Singapore, Norway, and China was modeled using the logistic and the CSG growth model, which was newly introduced to the literature. When modeling the life expectancy of countries, the adjusted graph was drawn following the data of each growth model. Then, the performances of the logistic growth model and the CSG growth model were compared with R^2 , $RMSE$, and $MAPE$ statistical criteria. As a result of the comparison, it was revealed that the CSG growth model is more suitable than the logistic model for estimating life expectancy for overall data and for each gender. The originality of this study is the CSG model which is a new nonlinear model that predicts life expectancy effectively for related datasets.

Yaşam Beklentisi Tahmininde Lojistik ve CSG Modelleri

Makale Bilgileri

Geliş: 06.02.2024
Kabul: 01.07.2024
Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1432156](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1432156)

Anahtar Kelimeler

Büyüme modelleri,
CSG modeli,
Lojistik model,
Yaşam beklentisi,
Yaşam tabloları

Öz: Bir popülasyondaki doğum/ölüm sayıları kullanılarak belirli bir yaştaki ölüm olasılığının hesaplanmasını sağlayan tablolara yaşam tabloları denir. Bir canlının ne kadar yaşayıp yaşamayacağını ölçüsü olan yaşam beklentisi, yaşam tablolarından elde edilen ölüm oranıyla hesaplanmaktadır. Beklenen yaşam süresini, lineer olmayan fonksiyonlarla modellemek mümkündür. Ölüm oranlarının modellenmesinde sıklıkla kullanılan fonksiyonlardan biri lojistik büyüme modelidir. Bu çalışma ile lojistik büyüme modeline alternatif olarak kullanılacak literatüre yeni kazandırılan bir model kullanarak Türkiye, Singapur, Norveç ve Çin'e ait ölüm oranlarını yorumlamak amaçlanmıştır. Ülkelerin total ve cinsiyete göre yaşam beklentileri lojistik ve CSG büyüme modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Ülkelerin yaşam beklentileri tahmin edilirken her büyüme modelinin tahmini grafiklerle desteklenmiştir. Daha sonra lojistik ve CSG büyüme modellerinin performansları R^2 , $RMSE$ ve $MAPE$ istatistikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda CSG büyüme modelinin yaşam

beklentisi tahmininde hem total veri hem de cinsiyetler açısından lojistik büyüme modeline göre daha iyi tahminde bulunduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmanın özgünlüğü, çalışmada kullanılan veri kümeleri için yaşam beklentisini etkili bir şekilde tahmin edebilen yeni bir doğrusal olmayan büyüme modelinin sunulmasıdır.

1. Introduction

To establish a detailed population structure favorable to both economic and social decision-making, life tables are created (Bowers et al., 1997; Namboodiri & Suchindran, 2013). In their simplest form, life tables are tables containing data on the survival of living and non-living things (telephones, computers) as a function of time and age. Data from these tables are used in the estimation of life expectancy at any age or mortality rates using mathematical growth models (Dinçer, 1998; Şençelikel & Öner, 2017). As these models are mathematical functions, it should be noted that they enable forward-looking estimation of life expectancies (Taylan & Yapar, 2013). There are many different approaches to studies on life expectancy. For example, Aje et al. (2024) used the ARIMA model in their study on life expectancy at birth for men in developing countries. Levantesi et al. (2023), proposed a new clustering method to forecast the healthy life expectancy of countries which allows for the clustering of different countries according to similarities in their healthy life expectancy.

Given their importance in establishing mortality tables and predicting life expectancy, mathematical growth models are the subject of constant study (Burton et al., 2021). Classical models such as the Gompertz model and the logistic model are the most frequently used, as illustrated by the studies of İskender (2021) in the prediction of population and gender, Gavrilov & Gavrilova (2019) in the prediction of mortality in elderly US citizens, and Lee et al. (2021) in the estimation of life expectancy in a chemical plant. Hifzan et al. (2024) used Gompertz and logistic functions to estimate mature size in Katjang X Boer goats. In this study, the coefficient of determination was used to compare the models. Both models have been found to be ideal for estimating body length. Thus, the Gompertz model predicts body weight and height at withers better than the logistic model, which is fitted for chest circumference. Although these functions give successful results, growth models that can always give better results are tried to be suggested in the literature. There are many studies in the literature on comparisons of models. So that, Makgopa et al. (2024) made a summary by reviewing dozens of articles about growth models for animal production industry. As a result, they stated that Gompertz, logistic and Brody are the most used models, respectively. In another study, Santos et al. (2024) proposed a model based on combining models frequently used in the literature. In this study, comparisons between models were made using body weight data of Norfolk rabbits. They showed that the proposed model and the Von Bertalanfy model gave better results than the Gompertz and Richards models according to the goodness of fit criterion. However, they also emphasized that further studies are needed on this subject. Other researchers, however, have developed their models. For example, Weon & Je (2009) and Carla & Sumathi (2021) have established mathematical growth models based on the Weibull distribution.

However, these mathematical models generally present problems related to prediction accuracy (Panik, 2014). It's therefore important to address the issue of choosing the model with optimal goodness of fit thus favoring prediction results closer to reality. In this study, the logistic growth model used in the literature and the Sloboda Gompertz Combined Growth Model (CSG), which is a new model introduced in the literature, are used to estimate life expectancy (Ünal & Çiğşar, 2021). For that purpose, general and gender-specific life expectancies, from the first month to over 100 years, obtained in four different countries, namely Türkiye, Singapore, Norway, and China, have been used. The most important factors taken into account in the selection of the countries used in the study are preference of the first and last quartile of the world quality of life rankings and the availability of reliable data. Particular attention was paid to the fact that the data were produced by the official statistical institutions of the countries. The performance of these models is compared using the statistical criteria of R^2 , $RMSE$, and $MAPE$, and the model-data fit is illustrated graphically.

2. Material and Methods

The logistic growth and CSG functions are those used in this study. Remember that these are sigmoidal (S) functions, and in this case were applied to analyze life table data from four countries. Let the life expectancy at aged x be represented by T_x , then the expected value of this value (i.e., $E(T_x)$) gives us the life expectancy for age x and denoted by e_x^0 .

Logistic Growth Model: The logistic model is a growth model frequently used to describe population growth (Schacht, 1980; Arosio, 2015; İskender, 2021; Prasad, 2022). For logistic growth, population size at time t can be given as (Tsoularis & Wallace, 2002; Longhi et al., 2017; Windarto et al., 2018):

$$y(t) = \frac{y_\infty}{1 + a e^{-bt}} \quad (1)$$

The value $y_\infty = y(t)$ in the equation represents the asymptotic magnitude, in other words, the maximum magnitude. a is any constant and b represents the growth in the positive or negative direction and $b \neq 0$.

CSG Growth Model: The CSG model procure the population growth at time t from the instantaneous change in the expression:

$$\frac{dy(t)}{y(t)} = \beta \cdot \ln\left(\frac{y_\infty}{y_t}\right) + (1 - k) \cdot b_1 \cdot t^{-b_2} \ln \ln\left(\frac{y_\infty}{y_t}\right) \quad (2)$$

Here $k \in R$ is in the range $0 \leq k \leq 1$. If the instantaneous variation is resolved, we achieve the expression

$$y(t) = y_\infty \cdot \exp \exp(-c_1 \cdot e^{-\beta t}) \exp \exp\left(-c_2 \cdot e^{-(1-k) \cdot b_1 \cdot \frac{t^{1-b_2}}{1-b_2}}\right) \quad (3)$$

If we write $e^c = (-c_1) \cdot (-c_2)$ where c_1 and c_2 are random constants and $\gamma = 1 - b_2$, $m = \frac{-b_1}{b_2 - 1}$, the CSG growth model is defined by the following function (Ünal & Çığsar, 2021).

$$y(t) = y_\infty \cdot e^{-c_1 \cdot e^{-\beta t}} e^{-c_2 \cdot e^{-m \cdot (1-k) \cdot t^\gamma}} \quad (4)$$

2.1. Datasets

The life tables for each country were analyzed using the latest datasets published by the countries' official statistical agencies as of October 2022 (Singapore Department of Statistics (DOS), Statistics Norway (SSB), National Bureau of Statistics of China (NBS), Turkish Statistical Institute (TÜİK)).

Analyses were performed considering the life expectancy e_x^0 column for $l+$ ages due to the dramatic difference in mortality rates between 0 and l year of age.

The graphs were produced using the MATLAB program, and the CSG and logistic models were compared using the R^2 , $RMSE$, and $MAPE$ criteria.

2.2. Statistical criteria

Metrics are tools which are used to measure the performance of models in general, focusing on the difference between real and fitted values. In this study, $MAPE$, R^2 and $RMSE$ criteria were used in model comparisons. Their mathematical formulas are listed below, considering \hat{y}_i as the predicted value, y_i as the observed value and \bar{y}_i as the mean:

$$MAPE = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (5)$$

It is a form of measurement that focuses on the difference between the real values and the fitted values and expresses it proportionally. Since this value calculates an error, minimal value of *MAPE* is preferred.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

It calculates the performance of the fitted model using real values and averages. It is assumed that the closer the *R*² value is to 1, the better the model fits.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (7)$$

RMSE takes into account the square root of the mean difference between the real values and the predicted values. For a model with good performance, it is preferable for *RMSE* to take values approaching 0 (Barnston, 1992; Chai & Draxler, 2014).

3. Results

In this section, logistic and CSG models were applied to life expectancy data from four countries, both overall and separately for each gender. Model-data fit was compared for each country using the *R*², *RMSE* and *MAPE* criteria, and graphs were plotted for each country.

Table 1. Statistical results for models

	Logistic			CGS		
	Overall	Female	Male	Overall	Female	Male
NORWAY						
<i>R</i> ²	0.9890	0.9881	0.9899	<i>R</i> ²	0.9959	0.9954
RMSE	0.1127	0.1164	0.1117	RMSE	0.0668	0.0707
MAPE	4.9111	5.0009	4.9061	MAPE	2.7430	2.8708
CHINA						
<i>R</i> ²	0.9967	0.9967	0.9965	<i>R</i> ²	0.9983	0.9983
RMSE	0.0390	0.0372	0.0414	RMSE	0.0277	0.0265
MAPE	1.0182	0.9483	1.1277	MAPE	0.7309	0.6825
SINGAPORE						
<i>R</i> ²	0.9923	0.9912	0.9922	<i>R</i> ²	0.9971	0.9965
RMSE	0.0870	0.0905	0.0913	RMSE	0.0523	0.0561
MAPE	3.1098	3.1236	3.5397	MAPE	1.8123	1.8783
TÜRKİYE						
<i>R</i> ²	0.9969	0.9967	0.9958	<i>R</i> ²	0.9996	0.9988
RMSE	0.0491	0.0499	0.0600	RMSE	0.0189	0.0302
MAPE	1.5824	1.5211	2.1210	MAPE	0.6022	0.9463

In both logistic and CSG life expectancy modeling, the *R*² values were 99% in all countries, indicating that the data is well explained by these two models. However, the *R*² values with the CSG model were consistently higher than those with the logistic model. Likewise, Table 1 also shows that all *RMSE* and *MAPE* values for the CSG model for the entire population are lower than those of the logistic model. Therefore, it can be said that the CSG model outperforms the logistic model in predicting life expectancy for the general population of these countries. The same observations can also be made for predicting life expectancy for men and women. Table 1 indicates that the CSG model performs better for all three criteria.

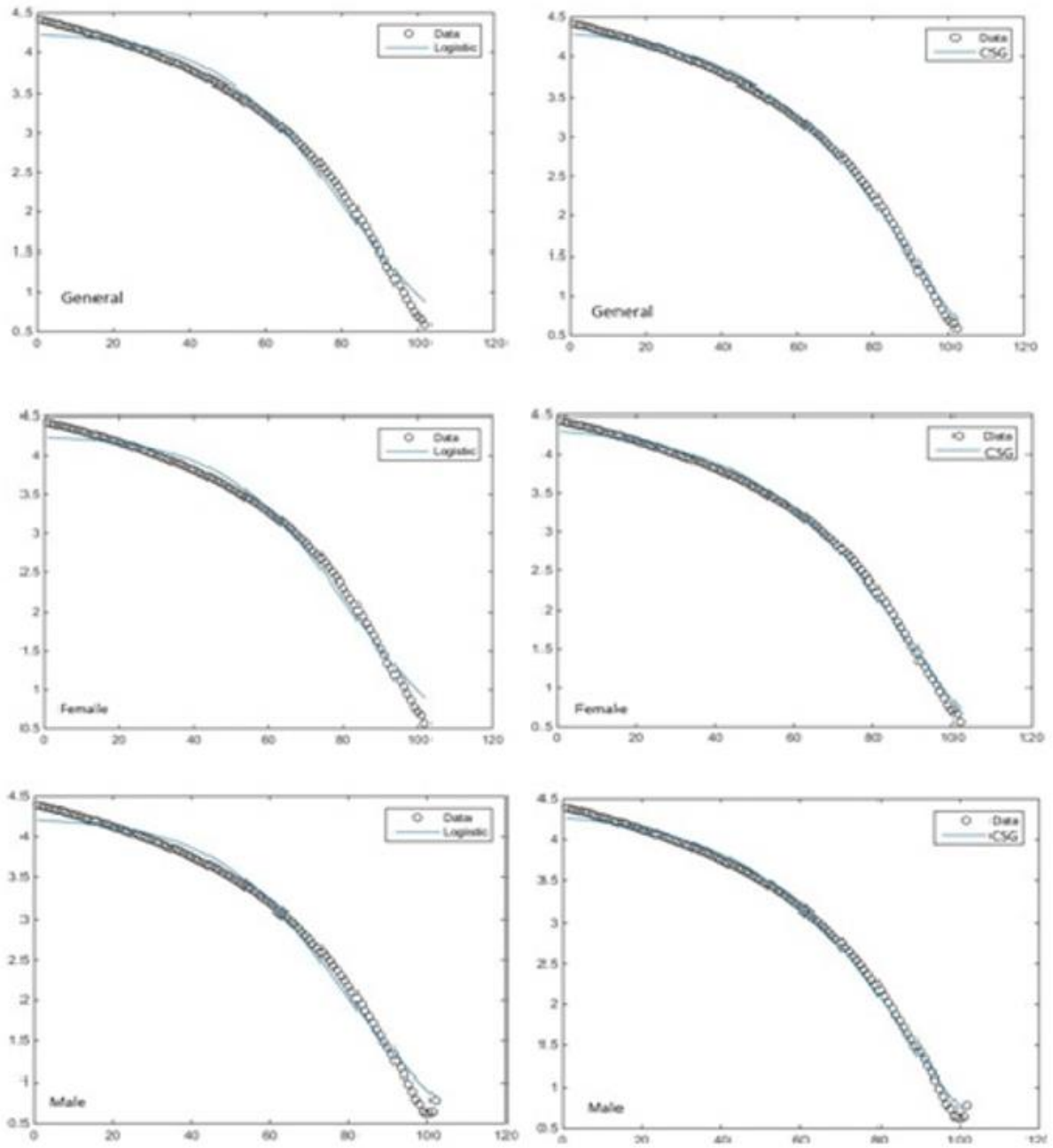


Figure 1. Norway model-data fit plot.

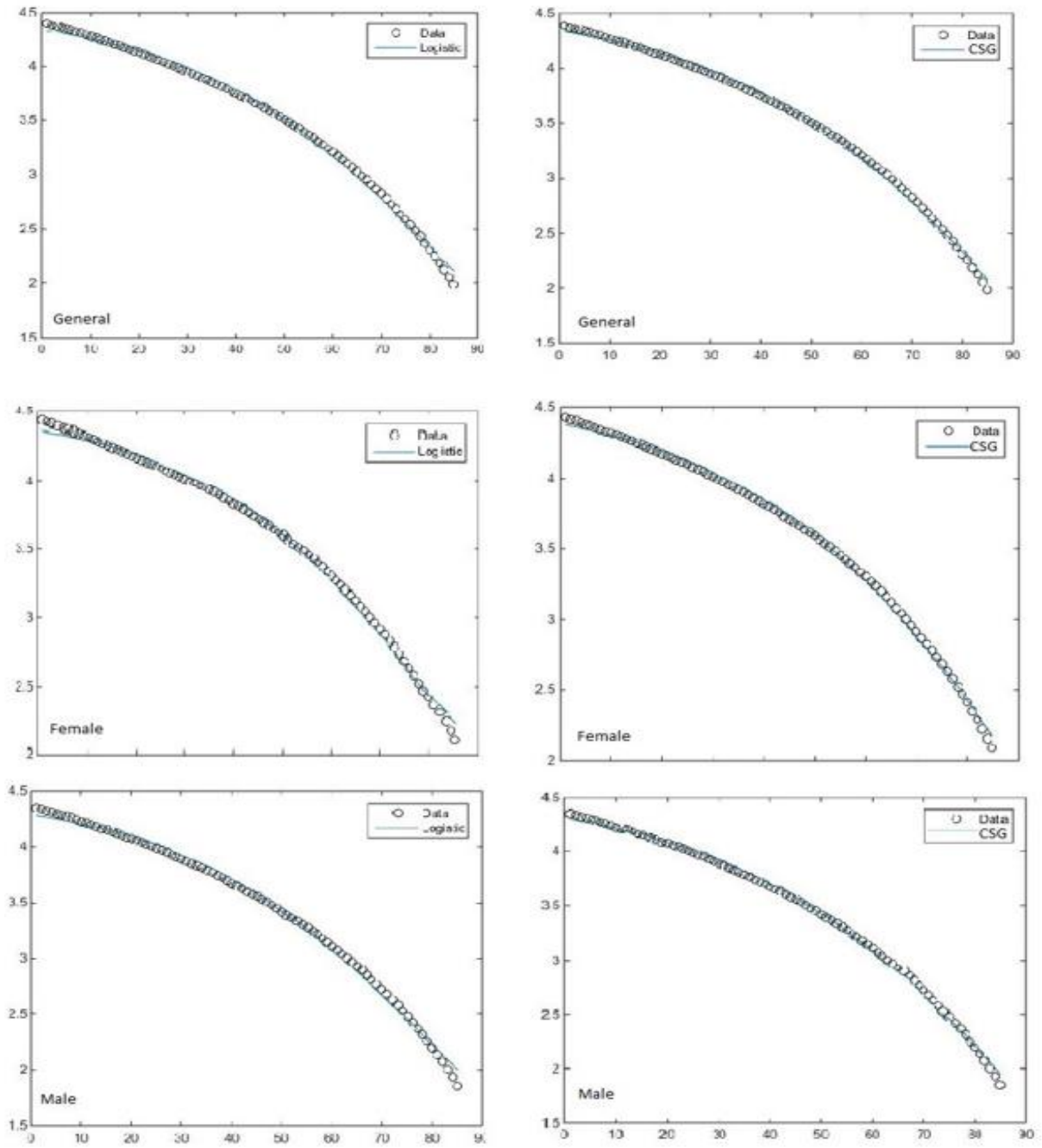


Figure 2. China model-data fit plot.

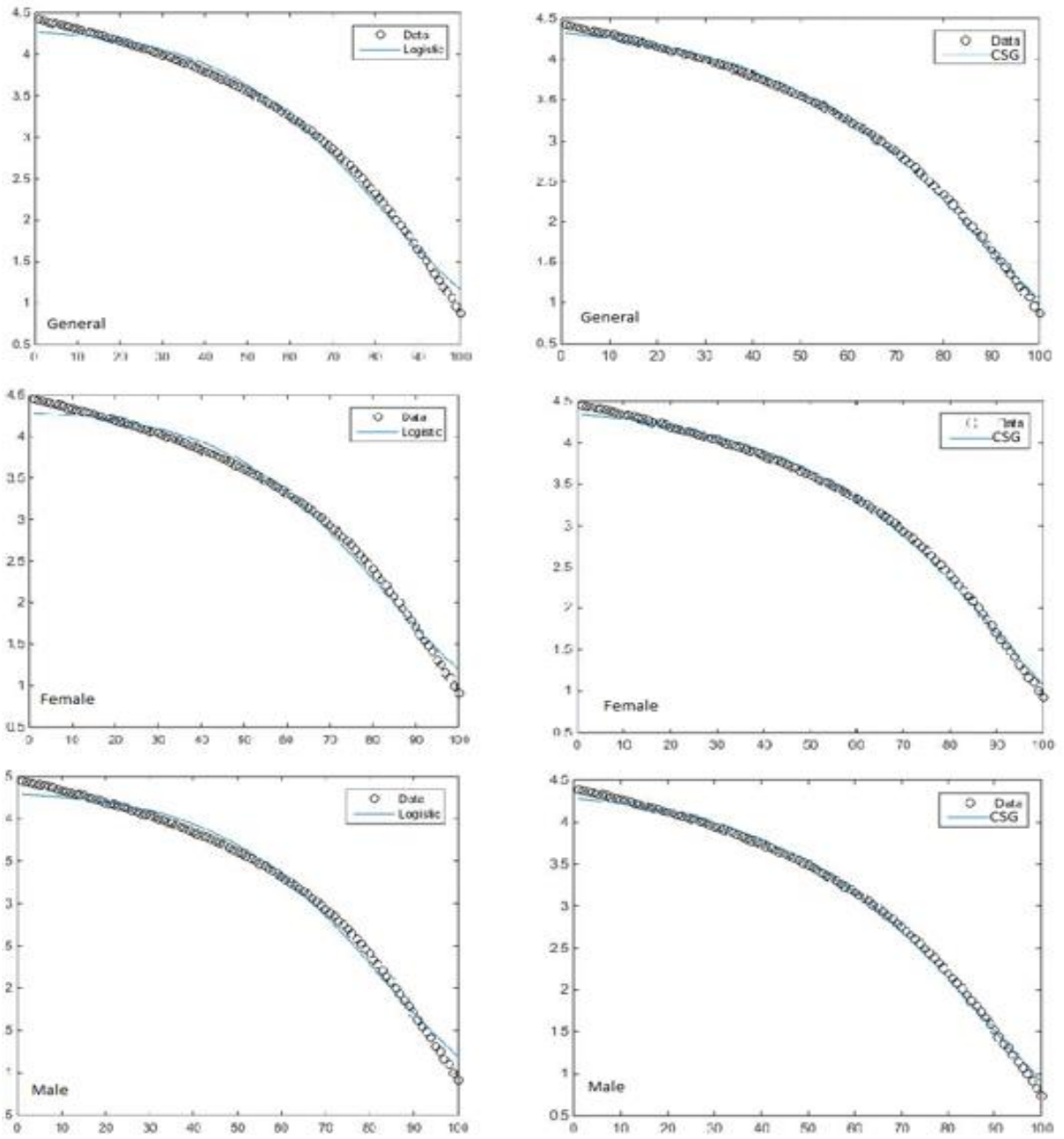


Figure 3. Singapore model-data fit plot.

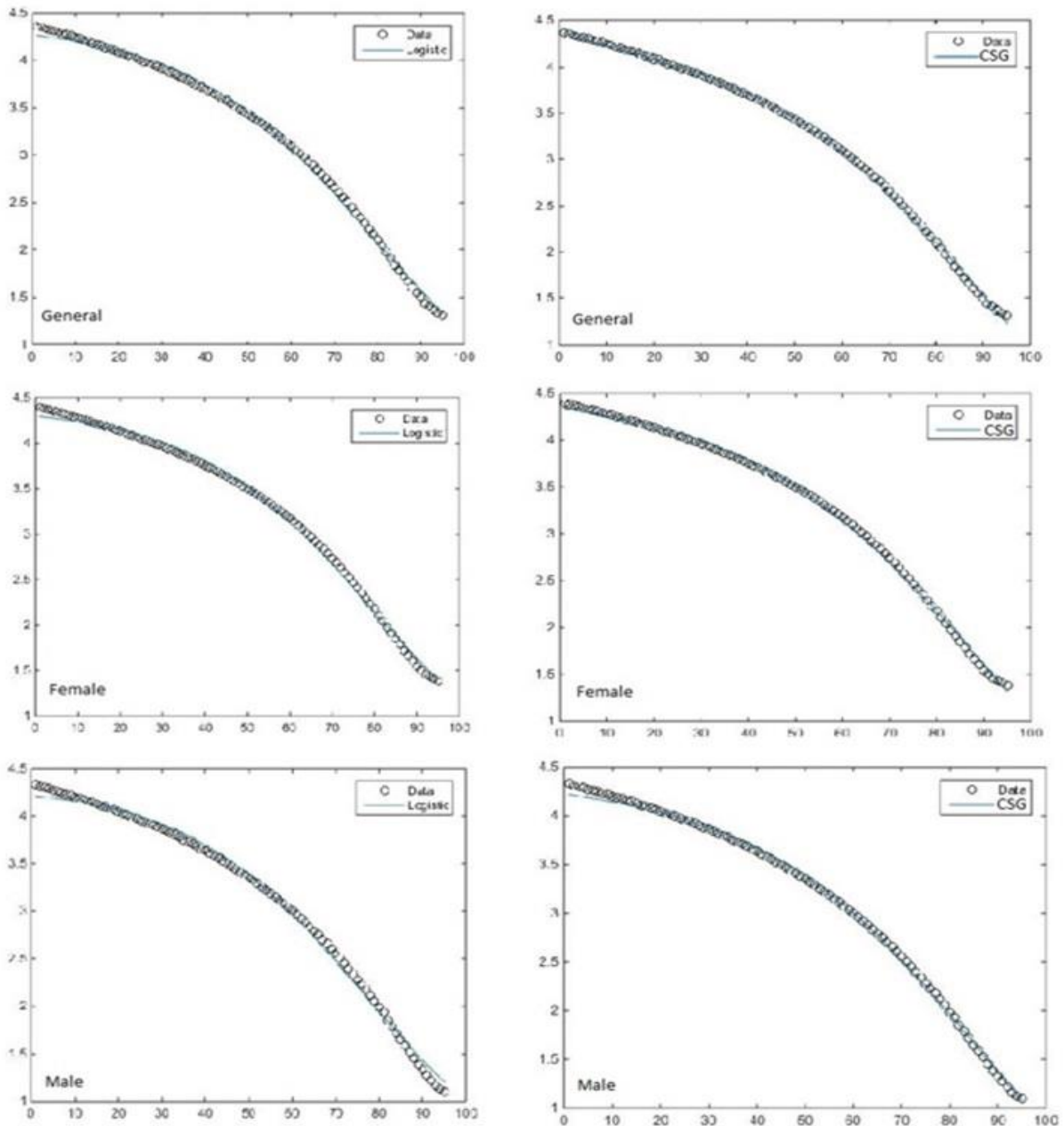


Figure 4. Türkiye model-data fit plot.

Graphs 1, 2, 3, and 4 present the results of logistic growth (all figures on the left) and CSG growth (all figures on the right) for the general population of each country, as well as their distribution by gender. The analysis of these graphs generally shows discrepancies between actual values and predicted values in the logistic model, both for general data and gender-specific data. At the same time, the two types of values are in perfect harmony in the CSG model, except for a few cases where a slight discrepancy is observed, which is much smaller than the discrepancies in the logistic model (as in the case of the 1-10 age group in Turkish men). This demonstrates that the CSG model fits the data of the four countries better than the logistic model, supporting the results obtained with the R^2 , $RMSE$, and $MAPE$ criteria mentioned earlier.

4. Discussion and Conclusion

Mortality tables provide information about the life expectancy of individuals in a country calculated from precise mathematical models. The present study conducts an assessment and

comparison of two mathematical models used to estimate and predict the lifespan of individuals in a population. These models are the logistic model, developed over a century ago, and the recently introduced CSG model (Ünal & Çığsar, 2021). The objective is to determine whether older and newer models yield similar results when applied to current realities. These two models were chosen because of their non-linear structure, making them suitable for life expectancy data (which is also non-linear). The data is derived from mortality tables of four countries with different conditions and income levels (Singapore, China, Norway, and Türkiye).

The logistic model is recognized as one of the most suitable models that better describe and predict the data from mortality tables. This model has undergone numerous parameterizations and re-parameterizations over time, making it much more robust. Pham (2011) conducted a study on the mortality rate in the United States using data collected over six decades (1946-2005). The Gompertz, Gompertz-Makeham, logistic, log logistic, loglog, and Weibull models were used in this study. The different results show, with the lowest mean square error for the general population and for both genders (0.00996, 0.054, 0.01 respectively), that the logistic model is the most suitable among the six models for the mortality table data and in predicting life expectancy in the United States during this period. Vanfleteren et al. (1998) also drew the same conclusions by applying the three-parameter logistic model, the Gompertz model, and the Weibull model to survival data obtained from 77 cohorts of *Caenorhabditis elegans* in axenic culture. The logistic model showed better results and was more suitable for the mortality data. Trappey & Wu (2008) also conducted studies on models capable of best predicting the short life cycles of products. Among the simple logistic model, the Gompertz model, and the time-varying extended logistic models, the time-varying extended logistic models came out as the best in predicting the data. This model fits the data 70% better than the Gompertz and simple logistic models. The performance of the models was evaluated using the mean absolute deviation and the root mean square error. Many other studies in the literature also demonstrate that the logistic model provides better results compared to classical models such as the Gompertz model and the Weibull model (Chen, 2007; Huishuo et al., 2020). Despite the literature emphasizing the efficiency of the logistic model as one of the best models to fit living mortality data and life expectancy estimation, in our study it was determined that a new model introduced in the literature outperforms the logistic model using all criteria.

In brief, the results of this study demonstrate a good fit between both model types and the data. However, graphically, the data fits almost perfectly with the CSG model, regardless of gender, the general population, and is valid for all four countries. The misfit of the logistic model with the data is more pronounced. This is evidenced by a higher margin of error in this model compared to the CSG model. This is confirmed by calculating indicators such as R^2 , MAPE, and RMSE. All R^2 values for the CSG model are higher than all R^2 values for the logistic model for the four countries studied and for all genders. MAPE and RMSE are much higher with the logistic model than with the CSG model.

In conclusion, it can be said that the CSG model provides a better estimation of life expectancy at all ages and less biased predictions of demographic growth for selected countries. However, will these results be the same when these models are applied to countries in Africa, Asia, or South America with very low life expectancy or high mortality rates, which may be due to more complex factors than Western and North American countries? This will be the subject of future studies.

Acknowledgements

This study was supported by Çukurova University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: FBA-2022-14131.

References

- Aje, O. G., Akanni, S. B., Abdualazeez, I. A., Ibrahim, R. A., & Adebayo, A. A. (2024). Forecasting of male life expectancy in Nigeria: Box-Jenkins approach. *International Journal of Development Mathematics (IJDM)*, 1(1). <https://doi.org/10.62054/ijdm/0101.20>
- Arosio, P., Knowles, T. P., & Linse, S. (2015). On the lag phase in amyloid fibril formation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(12), 7606-7618. <https://doi.org/10.1039/C4CP05563B>

- Barnston, A. (1992). Correspondence among the Correlation [root mean square error] and Heidke Verification Measures; Refinement of the Heidke Score. *Weather and Forecasting*, 7(4), 699-709. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1992\)007<0699:CATCRA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1992)007<0699:CATCRA>2.0.CO;2)
- Bowers, N. L., Gerber, H. U., Hickman, J. C., Jones, D. A., & Nesbitt, C. J. (1997). *Actuarial mathematics* (2nd ed.). Schaumburg: The Society of Actuaries.
- Burton, J. K., Reid, M., Gribben, C., Caldwell, D., Clark, D. N., Hanlon, P., ... & McAllister, D. A. (2021). Impact of COVID-19 on care-home mortality and life expectancy in Scotland. *Age and Ageing*, 50(4), 1029-1037. <https://doi.org/10.1093/ageing/afab080>
- Carla, S. A., & Sumathi, M. (2021). Maximum lifespan prediction of women from Modified Weibull Distribution. *International Research Journal on Advanced Science Hub (IRJASH)*, 3(3), 56-60.
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247-1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chen, H. (2007). Use of linear, Weibull, and log-logistic functions to model pressure inactivation of seven foodborne pathogens in milk. *Food Microbiology*, 24(3), 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.06.004>
- Dinçer K. S. (1998). *The Investigation of the life expectancy variation from 1970 to 1986 in Eskişehir and Turkey*. (Master thesis), Anadolu University Institute of Health Sciences, Eskişehir, Turkey.
- Gavrilov, L. A., & Gavrilova, N. S. (2019). New trend in old-age mortality: Gompertzialization of mortality trajectory. *Gerontology*, 65(5), 451-457. <https://doi.org/10.1159/000500141>
- Hifzan, R. M., Hamidi, K. M., Aida, M. N., & Salisi, M. S. (2024). Analysis of growth curve with non-linear models of gompertz and logistics model in female katjang X boer goats in Malaysia. *Tropical Animal Science Journal*, 47(2), 155-160. <https://doi.org/10.5398/tasj.2024.47.2.155>
- Huishuo, G., Yuepeng, S., Xuehui, S., Deqiang, Z., & Xiaoyu, Z. (2020). Optimal growth model of *Populus simonii* seedling combination based on Logistic and Gompertz models. *Journal of Beijing Forestry University*, 42(5), 59-70. <https://dx.doi.org/10.12171/j.1000-1522.20190296>
- İskender, C. (2021). Mathematical study of the verhulst and gompertz growth functions and their contemporary applications. *Ekoist: Journal of Econometrics and Statistics*, 34, 73-102. <http://dx.doi.org/10.26650/ekoist.2021.34.876749>
- Levantesi, S., Nigri, A., Piscopo, G., & Spelta, A. (2023). Multi-country clustering-based forecasting of healthy life expectancy. *Quality & Quantity*, 57(2), 189-215. <https://doi.org/10.1007/s11135-022-01611-6>
- Lee, K., Choi, K., & Cho, D. (2021). A study on the numerical approach for industrial life Cycle: Empirical evidence from Korea. *The Journal of Asian Finance, Economics and Business*, 8(5), 667-678. <https://doi.org/10.13106/jafeb.2021.vol8.no5.0667>
- Longhi, D. A., Dalcanton, F., Aragão, G. M. F. D., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2017). Microbial growth models: A general mathematical approach to obtain μ max and λ parameters from sigmoidal empirical primary models. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 34, 369-375. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170342s20150533>
- Makgopa, L. F., Mathapo, M. C., & Tyasi, T. L. (2024). A systematic review of estimation of growth curve in goats. *Tropical Animal Health and Production*, 56(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03857-0>
- Namboodiri, K., & Suchindran, C. M. (2013). *Life table techniques and their applications*. Academic Press.
- National Bureau of Statistics of China (NBS) (2021). *Life Tables*. Access date: 12 August 2022. <https://www.moi.gov.tw/english/cl.aspx?n=7780>
- Panik, M. J. (2014). *Growth curve modeling: Theory and applications*. John Wiley and Sons.
- Pham, H. (2011). Modeling U.S. mortality and risk-cost optimization on life expectancy. *IEEE Transactions on Reliability*, 60(1), 125-133. <https://doi.org/10.1109/TR.2010.2103990>
- Prasad, K. V. (2022). *Characters of population*. In *insect ecology: Concepts to Management*. Springer, Singapore.
- Santos, A. L. P. dos, Ferreira, T. A. E., de Brito, C. C. R., Gomes-Silva, F., & Moreira, G. R. (2024). Proposal for a new non-linear model to describe growth curves. *Bioscience Journal*, 40(e40011), 1981-3163. <https://doi.org/10.14393/BJ-v40n0a2024-68936>

- Schacht, R. M. (1980). Two models of population growth. *American Anthropologist*, 82(4), 782-798. <https://doi.org/10.1525/aa.1980.82.4.02a00040>
- Şençelikel, T., & Öner, K. S. (2017). Türkiye’de 2007-2014 yılları arası yaşam ümidinin farklı yaşam tablosu hazırlama yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Osmangazi Tıp Dergisi*, 39(3), 9-17. <https://doi.org/10.20515/otd.317151>
- Singapore Department of Statistics (DOS) (2021). *Life tables*. Access date: 12 August 2022. <https://www.singstat.gov.sg/publications/population/complete-life-table>
- Statistics Norway (SSB) (2021). *Life tables*. Access date: 12 August 2022. <https://www.ssb.no/en/statbank/table/07902/>
- Taylan, H., & Yapar, G. (2013). Türkiye geneli ölüm verileri kullanılarak yaşam tablosunun oluşturulması. *İstatistik Araştırma Dergisi*, 10(2), 1-24.
- Trappey, C. V., & Wu, H.-Y. (2008). An evaluation of the time-varying extended logistic, simple logistic, and Gompertz models for forecasting short product lifecycles. *Advanced Engineering Informatics*, 22(4), 421-430. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2008.05.007>
- Tsoularis, A., & Wallace, J. (2002). Analysis of logistic growth models. *Mathematical Biosciences*, 179(1), 21-55. [https://doi.org/10.1016/S0025-5564\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0025-5564(02)00096-2)
- Turkish Statistical Institute (TUIK) (2020). *Life tables*. Access date: 12 August 2022. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109>
- Ünal, D., & Çığışar, B. (2021). CSG: Towards a comprehensive model of growth. *New Trends in Mathematical Sciences*, 9(1), 130- 135. <https://doi.org/10.20852/ntmsci.2021.440>
- Vanfleteren, J. R., De Vreese, A., & Braeckman, B. P. (1998). Two-parameter logistic and weibull equations provide better fits to survival data from isogenic populations of caenorhabditis elegans in axenic culture than does the gompertz model. *The Journals of Gerontology*, 53A(6), B393-B403. <https://doi.org/10.1093/gerona/53A.6.B393>
- Weon, B. M., & Je, J. H. (2009). Theoretical estimation of maximum human lifespan. *Biogerontology*, 10(1), 65-71. <https://doi.org/10.1007/s10522-008-9156-4>
- Windarto, E., Eridani, E., & Purwati, U. D. (2018). A new modified logistic growth model for empirical use. *Communication in Biomathematical Sciences*, 1(2), 122-131. <https://doi.org/10.5614/cbms.2018.1.2.5>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Erçek Gölü (Van) Kapalı Havzası Arazi Kullanım/Arazi Örtüsü Değişiklerinin Uzaktan Algılama Yöntemi Kullanılarak Belirlenmesi

Erkan DİŞLİ*, Zehra ŞAPCI

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye
Erkan DİŞLİ, ORCID No: 0000-0002-6831-3076, Zehra ŞAPCI AYAS, ORCID No: 0000-0002-7811-2235

* Sorumlu yazar e-posta: edisli@yyu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 20.02.2024
Kabul: 04.06.2024
Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1440273

Anahtar Kelimeler

Arazi kullanım/arazi örtüsü,
Erçek Gölü,
Normalleştirilmiş bitki örtüsü indeksi,
Normalleştirilmiş fark su indeksi,
Sulak alan,
Uzaktan algılama,
Van

Öz: Bu çalışmada Erçek Gölü Kapalı Alt Havzası (EGKH) genelinde meydana gelen mekânsal-zamansal değişim süreçlerini belirlemek amacı ile 2006, 2012, 2016, 2018, 2020 ve 2022 yıllarına ait arazi kullanım/arazi örtüsü (AKAÖ) verileri ve 2016, 2018, 2020, 2022 yıllarına ait normalleştirilmiş bitki örtüsü indeksi (NBÖİ) ve normalleştirilmiş fark su indeksi (NFSİ) kullanılmıştır. AKAÖ, NBÖİ ve NFSİ haritalarını oluşturmak için ArcGIS 10.8 programında Copernicus-Land Monitoring Service ve ESRI- Sentinel-2 Land Cover Explorer uydu görüntüleri kullanılmış ve AKAÖ haritasından elde edilen görüntüler kendi içerisinde yedi alt sınıfa (yerleşim yeri, orman, su kütlesi, sulak alan, tarım alanı, çıplak arazi ve kar/buz örtüsü) ayrılmıştır. AKAÖ görüntülerine göre 2006-2020 yılları arasında yerleşim yeri ve çıplak arazi alanlarında artış tarım alanlarında ise azalmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Havza genelinde 2016-2022 yılları arasında pozitif (en yüksek) NBÖİ değerlerinin 0.822 ile 0.865 arasında değiştiğini ve 0.6-1 değer aralığı bazı yıllar arasında dönüşümlü artış gösterse de sağlıklı bitki örtüsü veya geniş ormanlık alanların yayılım çok sınırlı kaldığını göstermektedir. 2016-2022 yılları arasında pozitif (en yüksek) ve negatif (en düşük) NFSİ değerleri arasında dönüşümlü bir artış ve 2022 yılında ise azalış eğilimi gözlenmiştir. EGKH'da en önemli su kütlesi olan Erçek Gölü'nün en geniş alana 110.9 km² ile 2020 yılında ve en düşük alana ise 2022 yılında 107.24 km² sahip olduğu görülmüştür. İlgili yıllar arasında göl alanında yaklaşık %2.23 oranında meydana gelen azalmanın arazi kullanım/arazi örtüsündeki yerleşim alanları ve tarımsal faaliyetleri içerebilecek insan faaliyetlerinin bir sonucu olarak azalış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Determination of Land Use/Land Cover Changes in Erçek Lake (Van) Closed Basin Using Remote Sensing Method

Article Info

Received: 20.02.2024
Accepted: 04.06.2024
Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1440273

Abstract: In this study, to assess the spatio-temporal change processes occurring in the Erçek Lake Closed Sub-Basin (ELCSB), land use/land cover (LULC) data for the years 2006, 2012, 2016, 2018, 2020, and 2022 were analyzed, as well as normalized difference vegetation index (NDVI) and normalized difference water index (NDWI) data for the years 2016, 2018, 2020, and 2022. Copernicus-Land Monitoring Service and ESRI-Sentinel-2 Land Cover Explorer satellite images were used in the ArcGIS 10.8 program to create the LULC, NDVI, and NDWI maps, and the images data obtained from the LULC map were divided into seven subclasses (built-up area, forest, water bodies, wetlands, agriculture area, bare ground and snow/ice cover). LULC images indicate that between 2006 and 2020, there was an increase in built-up areas and bare ground, accompanied by a decrease in agricultural areas. The positive (highest) (NDVI) values in the basin ranged

Keywords

Land use/land cover,
Remote sensing,
The Erçek Lake
The normalised difference
vegetation index,
The normalized difference
water index,
Wetlands,
Van

between 0.822 and 0.865 in 2016-2022. Despite fluctuations between some years within the 0.6-1 value range, there was limited expansion of healthy vegetation or large forest areas in the basin. An alternating increase was observed between positive (highest) and negative (lowest) NFSI values between 2016 and 2022, and a decreasing trend was observed in 2022. It was observed that Lake Erçek, the most significant water body in the ELCSB, had the largest area of 110.9 km² in 2020 and the smallest area of 107.24 km² in 2022. It was concluded that the approximately 2.23% decrease in the lake area between the relevant years was attributed to human activities, which may include built-up areas and agricultural activities in LULC patterns.

1. Giriş

Dünya genelinde yer alan habitat sistemlerinde, her canlının hayatta kalması için vazgeçilmez ve hayati kaynaklardan biri olan tatlı su kaynakları, sosyo-ekonomik kalkınmanın ve ekosistemlerin devamlılığında önemli bir yeri vardır. Bu nedenle doğal kaynakları korumak ve miktar/kalite açısından sürdürülebilirliklerini yönetebilmek önemlidir, çünkü ekosistemler mutlak olarak ona bağımlıdır (Dişli, 2015, 2017, 2018; Tawfeeq ve ark., 2024; Smail & Dişli, 2023). Yaygın bulunabilirlikleri ve erişilebilirlikleri nedeniyle tatlı su kaynakları, özellikle yağış kıtlığı olan veya hiç yağış almayan yarı kurak ve kurak bölgelerde sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için birincil içme suyu kaynağı olarak kullanılmaktadır (Öztürk & Dişli, 2022; Xiao ve ark., 2022). Önemli tatlı su kaynaklarından biri olan sulak alanlar, kara, deniz, göl, lagün, kıyı, kumul vs. gibi farklı ekosistemleri bir araya getiren, büyüme mevsimi ve suya doygunluk döneminde aktif bitkilerle kaplı, genellikle yer yüzeyine yakın, farklı su seviyesine sahip bölgeler olarak tanımlanmaktadır (Guo ve ark., 2017). Dünya üzerindeki başlıca korunması gereken en önemli doğal çevre türlerinden biri olarak kabul edilen sulak alanlar “Dünyanın böbrekleri” olarak adlandırılmaktadır (Zhang ve ark., 2010; Anand & Oinam, 2020). Sulak alanlar insanlığın varoluşu ve gelişmesiyle yakından bağlantılı olup yerleşik düzene geçerek tarım faaliyetlerinin oluşumunda önemli bir yere sahiptir. Bundan dolayı sulak alanların ekosistem değeri, insan refahına, dolaylı veya doğrudan katkıda bulunan işlevler, özellikler veya süreçler dizisi olarak tanımlanmaktadır (He ve ark., 2011). Öne çıkan bu işlevlerin başında birçok bitki/hayvan için benzersiz yaşam alanları, su temini ve su kalitesinin iyileştirilmesi, karbon salınımı olup, ayrıca tarımsal kökenli kirlenici parametrelerin filtrelenmesi, taşkın koruma, kıyı şeridi ve akarsu yatağının korunması, yeraltı suyunun beslenmesi ve ekolojik iyileştirmeler gibi önemli çevresel faydalar sağlamaktadır (Ballut-Dajud ve ark., 2022; Malekmohammadi ve ark., 2023).

Doğada genel olarak yüksek arazi habitatu matrisinde farklı ölçeklerde ayrı parçalar halinde bulunan sulak alanlarda yaşayan yerel popülasyonların çoğu genellikle küçük ve izole bir yapıya sahiptirler. Bundan dolayı bu popülasyonlar yok olmaya karşı savunmasızdır (Gibbs, 2000). Son yıllarda, kentleşme, tarımsal ve endüstriyel gelişmeler gibi antropojenik faaliyetler ve iklimsel değişimler lokal veya bölgesel ölçekte çevresel bozulmaya ve sulak alanların kaybına yol açmış/açmaya başlamıştır (Palludan ve ark., 2002; Ambastha ve ark., 2007). Özellikle son yıllarda, çevresel sistemdeki hem zamansal hem de mekânsal ölçekteki değişimler önemli antropojenik itici faktörleri oluşturmaktadır. Bu faktörlerden en önemlisi, arazi kullanım/arazi örtüsü (AKAÖ) modelinde meydana gelen değişimlerdir (Anand & Oinam, 2020). Bununla beraber, sulak alanlardaki suyun çekilmesi sonucunda ortaya çıkan alanlar AKAÖ modelinde irdelendiğinde, bu alanların tarım alanları, yerleşim alanları ve endüstriyel yapılar için mevcut alanlar olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir (Ostad-Ali-Askari, 2022). Sulak alanlar için çevresel karar verme ve koruma yönetim aşamaları oldukça karmaşık ve çok yönlü süreçleri içermektedir. Bundan dolayı, sulak alanların ekosistem açısından sürekliliğini ve işlevselliğini etkileyen parametreler ve süreçler göz önünde bulundurularak detaylı entegre bir yaklaşım modelinin yapılması gerekmektedir (Zsuffa ve ark., 2014). Sağlam bir risk yönetimi planı ve çevre koruma programlarının, özellikle antropojenik faaliyetlerin sulak alanlar üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmada etkili olduğu yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir (Chen ve ark., 2013). Türetilmiş bitki örtüsü indeksleri ve biyofiziksel sonuçları içeren uzaktan algılama teknikleri, doğal yapıların ve arazi ortamlarının zamansal modellerini gözlemlenmek ve değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu yöntemler özellikle yüksek zamansal ölçüm çözünürlüğü, geniş kapsam ve basit erişilebilirlik gibi hayati verilere sahiptir (Orimoloye ve ark., 2020). Birçok araştırmacı, arazi yüzeyinin çok zamanlı analizlerinin

temel bir kaynağı olarak uydu bilgilerini (özellikle Landsat görüntüleri) kullanmaktadırlar. Buradaki amaç önemli biyolojik topluluklarını izlemek ve arazi yüzeyini tespit etmek, arazi örtüsü desenlerini haritalandırmak ve değişimleri izlemektir (Nsubuga ve ark., 2017; Onamuti ve ark., 2017).

Nehir havzalarında AKAÖ haritalaması, kentleşmenin, tarımsal uygulamaların ve diğer insan faaliyetlerinin iyi planlanması ve yönetimi için kullanılabilecek yararlı bir araçtır. Aynı zamanda AKAÖ modellerinde meydana gelen değişimler, su kaynakları üzerindeki etkileri ortaya koymada önemli veriler sağlamaktadır (Sreenivasulu ve ark., 2014). Uzaktan algılama (RS), küresel konumlandırma sistemi (GPS) ve coğrafi bilgi sistemleri (GIS) gibi ileri teknolojik yöntemler AKAÖ sınıflarındaki değişikliklerinin haritalanması ve meydana gelen değişimleri tespit etmek için yaygın olarak kullanılan güçlü ve etkili araçlar olarak kabul edilmektedir (Belal & Moghanm, 2011; Arveti ve ark., 2016; Mancino ve ark., 2014). Bununla beraber, dijital görüntü işleme algoritmalarını kullanan uzaktan algılamadaki ilerlemeler, çok zamanlı ve çok bantlı verilerin analizlerini sağlamaktadır. Daha sonra bunları arazi kullanım değişiklik modellerini oluşturmak ve ayrıca geliştirme süreçlerini incelemek/anlamak için gerekli bilgilere dönüştürmektedir (Anand & Oinam, 2020; Faruque ve ark., 2022; Abebe ve ark., 2022). Özellikle geniş alanlardaki küçük coğrafi kapsamlara sahip kategoriler için AKAÖ sınıfları ile bunların mekânsal ve zamansal değişimlerinin belirleneceği durumlarda yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerine ihtiyaç duyulmaktadır (Reed ve ark., 1996). Ekosistemleri birbiriyle ilişkili bileşenlerden oluşan büyük ve karmaşık bir sistemdir. Çoklu indeks yöntemi, uydu veya hava görüntülerine dayalı olarak bir ekosistemin bileşimini ve etkisini simüle ederek bölgesel ekolojik ortamın kapsamlı durumunu etkili bir şekilde temsil etmektedir (Zhang et al., 2022). Sulak alanlarda bitki ve su yüzeyinin çıkarılmasında kullanılan en yaygın yöntem iki bantlı indekslerdir (Kumar & Singh, 2020). Normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi (NBÖİ), bitki örtüsü dinamiklerinde meydana gelen uzun dönemli farklılıklar ve durumunun bölgesel ve küresel izlenmesinde en yaygın kullanılan spektral indekslerden biridir (Zhao ve ark., 2023). Her coğrafi konum için NBÖİ, herhangi bir uydu görüntüsüne ait kırmızı ve kızılötesi bantlar arasındaki oran olarak hesaplanmaktadır (Allam ve ark., 2019). Yüksek bir NBÖİ değeri, yakın kızılötesindeki yüksek yansıma ve kırmızı spektral banttaki daha düşük yansımanın birleşiminden kaynaklandığı için yüksek bitki örtüsüne işaret etmektedir (Onyango & Opiyo, 2022). Normalleştirilmiş fark su indeksi (NFSİ), yansıtıcı yakın kızılötesi radyasyon ve görünür yeşil ışıkla açık su kütlelerini tanımlamak ve bitki örtüsü ve toprak nem koşullarını izlemek, mahsul modellerini ve tarımsal genişlemeyi analiz etmek için kullanılmıştır (McFeeters, 1996; Singh ve ark., 2015). NFSİ'nin geliştirilmiş versiyonu ise kısa dalga kızılötesi radyasyon kullanarak değiştirilir ve değiştirilmiş normalize edilmiş fark (DNFSİ) olarak yeniden adlandırılır. DNFSİ, uzaktan algılama alanında hem küçük hem de büyük ölçekli su kütlelerini tespit etmek için sürekli olarak kullanılmaktadır (Xu, 2006).

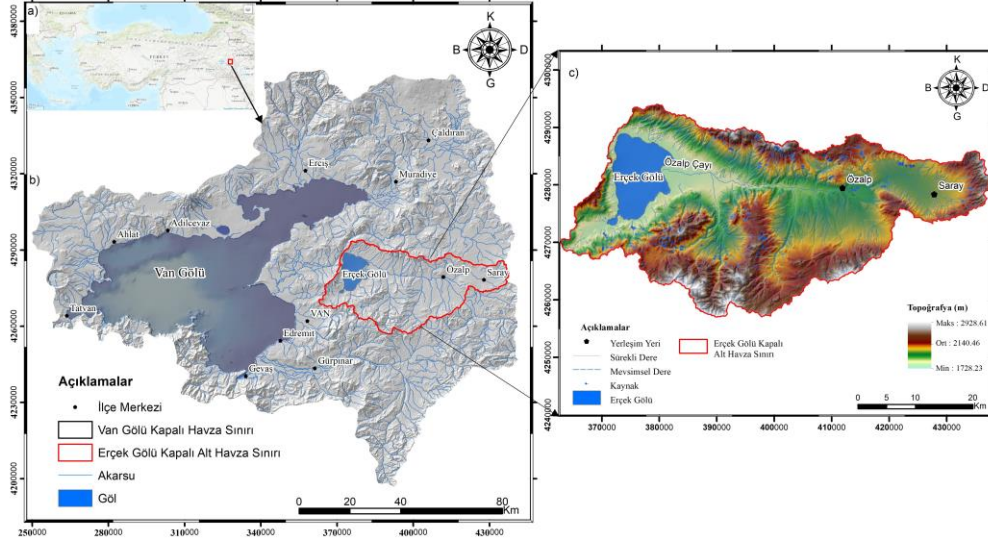
Erçek Gölü Kapalı Havzası (EGKH) son yıllarda insan faaliyetlerinden güçlü bir şekilde etkilenen tipik bir su-toprak eko-kırılgan bölgesidir. Özellikle son yıllarda EGKH, plansız nüfus artışı ve sosyoekonomik kalkınma faaliyetlerinden kaynaklanan arazi bozulması ile karşı karşıya kalmıştır. Havza genelinde özellikle nüfus ve sosyo-ekonomik faaliyet açısından büyümeye devam ettikçe, özellikle bitki örtüsü, su kütleleri, tarım ve yapılaşma alanlarından oluşan dört ana arazi örtüsü sınıfında bazı peyzaj değişikliklerinin yaşanması söz konusudur. Bundan dolayı Erçek Gölü'nde sınırları içerisinde yer olduğu EGKH genelinde meydana gelen mekânsal-zamansal değişimler farklı yıllara ait AKAÖ, NBÖİ ve NFSİ uydu görüntüleri kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada amaç: a) 2006-2022 yılları arasında havza genelindeki başlıca AKAÖ değişikliklerini analiz etmek, b) nüfus, tarım gibi temel itici faktörlerin bu AKAÖ değişiklikleri üzerindeki etkisini araştırmak ve c) 2016-2022 yılları arasında bitki ve su kütlelerindeki değişiklikleri değerlendirme sürecinde iki band indeks (NBÖİ ve NFSİ) görüntülerinin performansını değerlendirmek.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma alanı

Erçek Gölü, Van Gölü Havzası'nın doğusunda yer almaktadır. Erçek Gölü'nün sınırları içerisinde yer aldığı havza kapalı havza özelliği göstermektedir (Şekil 1a ve 1b) ve toplam 1546.0518 km²lik bir alanı kaplamaktadır. Erçek Gölü 2016 yılında "Ulusal Öneme Haiz Sulak Alanlar" olarak tescillenmiştir. Havzanın deniz seviyesinden ortalama yükseltisi 2140.46 m olup, hem göl hem de göl

etrafındaki sulak alanın büyük bir kısmı 1805 m kotunda yer almaktadır (Şekil 1c). Sulak alan sisteminin ana drenaj sistemini Özalp Çayı ve kolları oluşturmaktadır. Erçek Gölü'nün de sınırları içerisinde yer aldığı Van Gölü Havzası, orta enlem gezici basınç merkezleri ve Akdeniz'de oluşan siklonların da etkisi altında kalmaktadır. Havza genelinde kış mevsiminin uzun ve soğuk, yaz mevsiminin sıcak ve kısa olduğu iklim özelliği hüküm sürmektedir (İrcan & Duman, 2022).



Şekil 1. Çalışma alanına ait yer bulduru (a,b) ve topoğrafik harita (c).

2.2. Arazi kullanımı ve arazi örtüsü

Arazi kullanım/arazi örtüsü (AKAÖ), herhangi bir arazi yüzeyinin temel doğal özelliklerinin anlaşılmasına yardımcı olan en önemli tematik katmanlardan biridir. Genel olarak arazi örtüsü, orman, su kütleleri ve çorak araziler gibi doğal biyofiziksel örtüleri ifade eder. Arazi kullanımı ise biyojeokimyasal, fizyografik ve hidrolojik koşulların değişmesine yol açan, tarım ve yerleşim yeri gibi farklı amaçlarla arazinin insan tarafından kullanılması anlamına gelir (Di Gregorio & Jansen, 2000). Bu çalışmada 2006, 2012, 2016, 2018, 2020 ve 2022 Ağustos ayına ait AKAÖ sınıflandırmasının yapılabilmesi için gerekli haritalar (a) Copernicus-Land Monitoring Service (2006, 2012 ve 2016 yılları) ve (b) ESRI-Sentinel-2 Land Cover Explorer (2018, 2020 ve 2022 yılları) üzerinden ücretsiz bir şekilde indirilmiştir. Bu indirilen haritalar ArcGIS 10.8 programı kullanılarak yorumlanmış ve elde edilen görüntü verileri kendi içerisinde yedi farklı sınıfa ayrılmıştır (Çizelge 1). Ayrıca çalışmada, değişmeyen yer kontrol noktasına ek olarak Google Earth'ten alınan Küresel Konumlandırma Sistemine (GPS) ait noktaların doğruluğu karşılaştırılmıştır. Bu altı yıla ait sınıflandırılmış görüntülerin doğrulanması için ise 50 adet yer kontrol noktası örneklem olarak kullanılmıştır.

Geleneksel görüntü doğruluk değerlendirme yöntemleri arasında genel doğruluk (Eşitlik 1), üreticinin doğruluğu (Eşitlik 2), kullanıcının doğruluğu (Eşitlik 3) ve Kappa katsayısı (Eşitlik 4) yer almaktadır. Genel doğruluk (OA), incelenen görüntüde doğru şekilde sınıflandırılan piksel sayısını hesaplar. Kullanıcının doğruluğu, bir sınıfla tanımlanan ancak gerçekte başka bir sınıfa ait olan piksellerin sayısını ölçerken, üreticinin doğruluğu, gerçekten yalnızca o sınıfa ait olan bir sınıfa sınıflandırılan piksellerin sayısını ölçmektedir. Bunlar, genelde görüntü sınıflandırmasındaki komisyon ve ihmal hatalarına karşılık gelmektedir (Verma ve ark., 2020). Kappa katsayısı (K) ise sağlam, çok değişkenli bir tekniktir ve kategorik değişkenler arasındaki değerlendiriciler arası düzenlemeyi değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. Kullanımda sadece çapraz elemanları değil, hata matrisindeki tüm elemanları hesaba katmaktadır (Jamal & Ahmad, 2020). AKAÖ'nün doğruluk değerlendirmesi, uzaktan algılanan verilerdeki değişimin tespiti, uzaktan algılamada önemli bir rol oynamaktadır (Chughtai ve ark., 2021). Üretilen AKAÖ haritası daha sonra analiz edilerek ilgili yıllar arasında zaman içerisinde meydana gelen değişiklik tespiti yapılmıştır.

Genel doğruluk (OA)

$$OA = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^r n_{ii} \quad (1)$$

Üreticinin doğruluğu (PA)

$$PA = \frac{n_{ii}}{n_{icol}} \quad (2)$$

Kullanıcı doğruluğu (UA)

$$UA = \frac{n_{ii}}{n_{irow}} \quad (3)$$

Burada UA doğru sınıflandırılmış piksel sayısını, n toplam piksel sayısını, r satır sayısını ve sırasıyla sütun ve satır toplamını ifade etmektedir.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+})(x_{i+})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+})(x_{i+})} \quad (4)$$

Burada x matrisi, r matristeki satır sayısı; x satır i ve sütun i'deki (köşegen elemanlar) gözlemlerin sayısı, x_{i+} ve x_{ii} ise satır r ve sütun i'nin marjinal toplamlarını ve N toplam gözlem sayısını göstermektedir.

Çizelge 1. AKAÖ sınıflarının tanımları (Singh ve ark., 2023)

AKAÖ sınıfı	Tanım/açıklama
Yerleşim yeri	İnsan yerleşimlerinin/yerleşim alanlarının bulunduğu bölgeler (hem kentsel hem de kırsal), ticari, endüstriyel, eğitim ve eğlence alanları
Orman	Çalılıklar, çayırlar ve ağaçlar bu kategoriye oluşturur (hem yoğun hem de açık orman)
Su kütlesi	Görüntülerde görülebilen tüm yüzey suyu kütlelerini içerir: nehir, drenaj, dere, kanal, gölet, göl ve baraj vb.
Sulak alan	Çoğu yılın önemli bir bölümünde su tablasının kara yüzeyinin yakınında/üzerinde olduğu alanlar (bataklık arazisi)
Tarım arazileri	Çiftlikler, nadas arazileri ve bahçecilik alanları da dahil olmak üzere mahsul arazileri gibi tarım arazileri (ekili ve işlenmemiş), mera
Çıplak arazi	Çıplak zemin, toprak, kum ve kayaları içeren ve kullanılmayan arazi
Kar/buz örtüsü	Kar örtüsü veya buz örtüsünden oluşan alanlar

2.3. Normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi

Rouse Jr. ve ark. (1973) tarafından normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi (NBÖİ) hesaplamalarında kırmızı ve yakın kızılötesi bantları dikkate alarak biyokütle miktarını hesaplamak için geliştirilmiştir. NBÖİ, uzaktan algılama niceliklerini incelemek ve algılanan hedefin canlı yeşil bitki örtüsü içerip içermediğini değerlendirmek için kullanılan basit bir aritmetik göstergedir (Liang, 2005; Jensen, 2007; Adab ve ark., 2013). Özellikle bu indeks küresel çapta yeşil bitki örtüsü analizinde kullanılan en popüler bitki örtüsü indeksi olduğundan, şehir merkezleri büyüdükçe yeşil bitki örtüsünün yüzölçümündeki değişiklikleri ayırt etmede oldukça faydalıdır (Onyango & Opiyo, 2022).

NBÖİ değeri -1 ile +1 arasında değişen değerler almakta olup, NBÖİ'nin +1 değerine yaklaşması yoğun yeşillik alan ile eş anlamlıdır. Negatif değerler yani -1 ile 0 arası su kütlelerini veya

su yüzeylerini, -0.1 ile 0.1 arası yapılaşmayı ve diğer bitkisel olmayan özellikleri (çorak arazi, kum veya kar örtüsünü) ve 0.2 ile +1 arasındaki değerler, bitkisel yoğunluğunu göstermektedir. Bu yoğunluk klorofilin spektral yansımaya dayalı olarak 0.2 ile 0.5 arası çalılar, otlakları veya yaşlanan mahsulleri ve 0.6 ile 1 arası yoğun bitki örtüsünü veya tropik yağmur ormanlarını göstermektedir (Singh ve ark., 2023). NBÖİ, yakın kızılötesi bant ile kırmızı bant arasındaki varyansın ve bu iki bantın toplamının oranıdır (Eşitlik 5 ve 6) (Rouse Jr. ve ark., 1973).

$$NBÖİ (NDVI) = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (5)$$

$$Sentinel - 2 NBÖİ (NDVI) = \frac{(B08 - B04)}{(B08 + B04)} \quad (6)$$

Burada; NIR, NIR bandındaki yansımaya ve RED, KIRMIZI görünür kırmızı banttaki yansımaya belirtir.

2.4. Normalleştirilmiş fark su indeksi

Normalleştirilmiş fark su indeksi (NFSİ) sulak alanlar, nehir, göller ve okyanus çalışmalarında kullanılmıştır (Gilmore ve ark., 2015; Orimoloye ve ark., 2020, Nsubuga ve ark., 2017). Bu indeks, su kütlelerine ait su yüzeyinin haritalamasında kullanılan en uygun indekstir (Essa ve ark., 2012). Su kütleleri görünür-kızılötesi elektromanyetik spektrumdaki ışığı güçlü bir şekilde emdiğinden, NFSİ su kütlelerini vurgulamak için yeşil ve yakın kızılötesi bantları kullanır. NFSİ şu şekilde hesaplanmaktadır (Eşitlik 7 ve 8) (McFeeters, 1996):

$$NFSİ (NDWI) = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad (7)$$

$$Sentinel - 2 NFSİ (NDWI) = \frac{(B03 - B08)}{(B03 + B08)} \quad (8)$$

Burada; B03 (GREEN), yansıyan yeşil ışığı kapsayan bir bant (çözünürlük=10 m/piksel; merkezi dalga boyu=560 nm; bant genişliği=35 nm), B08 ((NIR) yansıyan yakın kızılötesi radyasyonunu (çözünürlük=10 m/piksel; merkezi dalga boyu=840 nm; bant genişliği=115 nm) temsil etmektedir. Normalleştirme Farkı Su İndeksi (NFSİ) değeri -1 ile 1 arasında olup su kütlelerinin değerleri 0.5'ten büyük olup bitki örtüsü daha küçük değerlere sahiptir. Yerleşik özellikler ise 0 ile 0.2 arasında değişen pozitif değerler almaktadır (Molly, 2022). NBÖİ ve NFSİ görüntü değerlendirme çalışmalarında Sentinel-2'den alınan Ağustos 2016, 2018, 2020 ve 2022 yıllarına ait görüntüler kullanılmıştır.

3. Bulgular

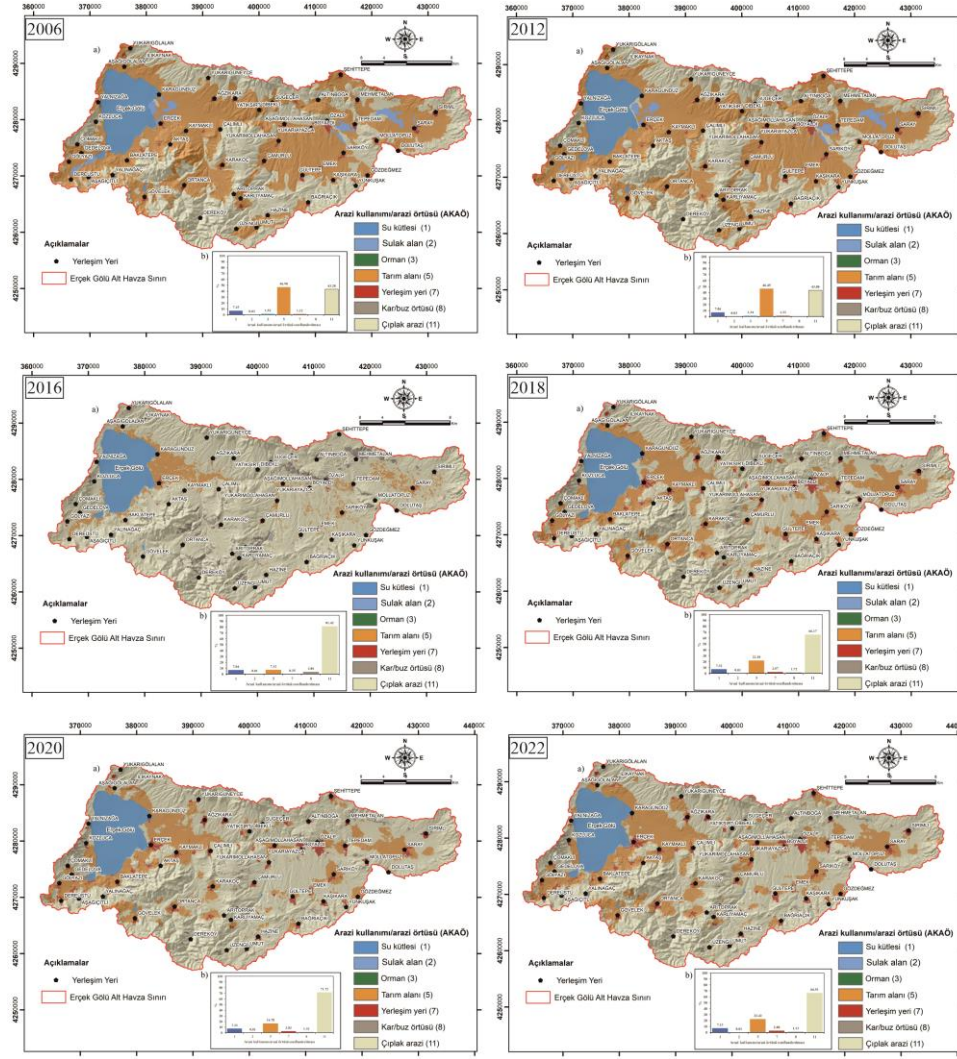
3.1. AKAÖ model sınıflandırması

Hızlı sosyal ve ekonomik gelişme, tüm dünya genelinde özellikle son yüz yılda kentsel alanlarda artan AKAÖ modellerinde değişikliklere yol açmakta ve bu durum zamanla yüzey enerji dengesini ve hidrolojik süreçleri etkilemektedir (Elmahdy ve ark., 2020). EGKH gelinde AKAÖ değişikliği izlenen yıllar için (2006, 2012, 2016, 2018, 2020 ve 2022) tespit edilmiştir. Bu yıllar için uydu görüntülerinden elde edilen AKAÖ sınıflarının mekânsal dağılım haritaları (Şekil 2a) ve her bir AKAÖ sınıfının kapsadığı alan yüzdesi (Şekil 2b) ayrı ayrı gösterilmiştir. Geliştirilen AKAÖ haritalarının genel doğruluk değerlendirme sonuçları sırasıyla %84, %94, %76, %86, %92 ve %92'lik bir genel doğruluk düzeyi göstermekte ve ilgili Kappa katsayıları ise 0.805, 0.925, 0.422, 0.728, 0.832 ve 0.835 olarak hesaplanmıştır.

2006 ve 2012 yıllarına ait AKAÖ haritalarında (Şekil 2a) EGKH genelinde %46.90 ve 46.45 tarım alanı, %43.28 ve 43.80 çıplak arazi, %7.15 ve 7.06 su kütlesi (109.63 ve 108.17 km²'lik alanı Erçek Gölü'ne ait), %1.51 ve 1.34 sulak alan, %1.12 ve 1.33 yerleşim yeri ve geri kalan %0.03 orman alanı (Şekil 2b) yer almaktadır. Her iki yıla ait değişim verileri birbirlerine benzer değişim yüzde oranları sunmaktadır. 2016, 2018, 2020 ve 2022 yıllarına ait AKAÖ haritalarında ise sırasıyla %81.42, 66.17, 71.72 ve 66.51 çıplak arazi, %7.32, 22.20, 16.78 ve 22.42 tarım alanı olarak gerçekleşmiştir. Bunları, sırasıyla %7.04, 7.32, 7.32 ve 7.13 su kütlesi (108.13, 109.93, 110.9 ve 107.24 km²'lik alanı Erçek Gölü'ne ait olup su kütlesinin yaklaşık %99.29, 97.09, 97.25 ve 97.29'nu kaplamaktadır), %0.35, 2.57, 2.83 ve 2.80 yerleşim yeri ve geri kalan %3.87, 1.73, 1.34 ve 1.14 oranları ile orman ve kar/buz örtüsü izlenmektedir (Şekil 2a, b). Bu veriler 2012 yılından 4 yıl sonra çıplak arazinin ve orman/kar buz örtüsü oranının artışı olduğunu, yerleşim yerindeki değişimin en az seviyede gerçekleştiğini göstermektedir.

Yedi adet AKAÖ sınıflandırmasına (Çizelge 1) göre 2006-2012, 2012-2016, 2016-2018, 2018-2020, 2020-2022 ve 2006-2022 dönemlerine ait AKAÖ değişim süreçleri Çizelge 2-7 verilmiştir. 2006-2012 yılları arasında yerleşim alanları ve çıplak arazide sırasıyla yüzde %15.66 ve 1.18 artış görülürken, su kütlesi, sulak alanlar, orman ve tarım alanlarında %1.34, 13.14, 10.95 ve 0.97 oranında bir azalmanın meydana geldiği görülmüştür (Çizelge 2). 2006-2012 yılları arasında ise havza genelinde yer alan AKAÖ sınıflarında genel olarak yüksek bir değişim eğilimi gözlenmemiştir. Aynı zamanda 2012-2016 yılları arasında da benzer bir değişim eğilimi görülmekte, çıplak arazi alanında %46.21'lik artış, su kütleleri, orman, tarım alanı ve yerleşim alanlarında %0.23, 354.36, 534.55 ve 282.21 oranında bir azalma yaşanmıştır. 2012 yılındaki toplam tarım alanının yaklaşık 604.94 km²'si 2016 yılında çıplak araziye (581.72 km²) dönüşmüştür (Çizelge 3). Havza genelinde ilgili yıllar arasında tarım alanı ve yerleşim alanlarındaki azalma pik değerini yapmış olup, bu durum ekonomik nedenlerden dolayı dışarıya bir göç hareketini olduğunu düşündürmektedir. 2016-2018 yılları arasında ise önceki 10 yıllık değişim değerlendirilmesinin tam tersi bir değişim süreci yaşandığı görülmektedir. Bu dönem su kütleleri, orman, tarım ve yerleşim alanlarında sırasıyla %3.82, 47.88, 67.03 ve 86.51 oranında bir artış olurken, kar/buz örtüsü ve çıplak arazi alanında ise %124.04 ve 23.06 oranında bir azalma göstermiştir (Çizelge 4). 2016-2018 yılları arasında yaklaşık 235.87 km² çıplak arazinin, 34.44 km² yerleşim ve 230.06 km² tarım arazisine dönüşmüştür (Çizelge 4). Benzer şekilde, 2018 yılında su kütlesi alanında 4.33 km²'lik bir artış gerçekleşmiştir. 2018 ile 2020 yılları arasında orman, yerleşim alanı ve çıplak arazide sırasıyla %41.76, 9.13 ve 7.75'lik artış göstermiş, sulak alanlar, tarım alanı ve kar/buz örtüsünde ise %0.02, 32.29 ve 30.78 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 5). 2012-2016 dönemindekine benzer şekilde, 2018 yılındaki toplam tarım alanının yaklaşık 83.773 km²'si 2020 yılında çıplak araziye dönüşmüştür. 2020-2022 yılları arasında da farklı bir eğilim gözlemlenmekte olup, sadece tarım alanlarında %25.16'lık bir artış görülürken, sırasıyla orman, kar/buz örtüsü ile çıplak arazi, su kütlesi ve yerleşim yerinde %68.53, 16.68, 7.84, 2.70 ve 1.36 oranında bir azalma meydana gelmiştir (Çizelge 6). Farklı dönemlerde tarım arazilerdeki artış/azalış ve buna bağlı olarak çıplak arazilerdeki azalış/artış tarım arazilerinin genellikle dönemsel nadasa bırakılmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir.

16 yıl içindeki AKAÖ sınıflarında değişikliklerin ayrıntıları Çizelge 7'de özetlenmiştir. 2006-2022 yılları arasında tarım arazisi alanının 725.05 km²'den (2006) 346.67 km²'ye (2022) düştüğü yaklaşık %109.15'lik bir azalma olduğunu ve çıplak arazi alanında ise yaklaşık 359.15 km²'lik (%349.3) artış meydana geldiğini ortaya koymuştur. Bu durum bölge genelinde yaşayan insanların sosyo-ekonomik gelişmesine bağlı olarak tarım faaliyetlerini terk ettiği şeklinde yorumlanmıştır. Bununla beraber havza genelindeki yerleşim yeri alanı 2006'da yaklaşık 17.31 km² olup, 2022'de 43.22 km²'ye yükselmiş ve yaklaşık %59.94 lük bir artış gerçekleşmiştir. Yerleşim yeri alandaki bu artış, genelde Saray, Özalp ve Erçek yerleşim yeri çevresindeki bölgede yoğunlaştığı gözlenmiştir. Bununla beraber kapalı havza genelinde yer alan en önemli su kütlesi olan Erçek Gölü yüzey alanında ise %2.23'lük bir azalma gerçekleşmiştir (Çizelge 7).



Şekil 2. AKAÖ sınıflarının farklı yıllarda (Ağustos ayı) (a) mekânsal dağılım haritaları (b) Her bir AKAÖ sınıfının kapsadığı alan yüzde grafiği.

Çizelge 2. AKAÖ 2006 ve 2012 yılları arasındaki değişim değerlendirilmesi

AKAÖ sınıfları	Sınıf numarası	2006 Alan (km ²)	2012 Alan (km ²)	Alansal Değişim (km ²)	Değişim (%)
Su kütlesi	1	110.62	109.15	-1.46	-1.34
Sulak alan	2	23.45	20.71	-2.74	-13.24
Orman	3	0.48	0.43	-0.05	-10.95
Tarım alanı	5	725.05	718.11	-6.94	-0.97
Yerleşim yeri	7	17.31	20.53	3.22	15.66
Kar/Buz örtüsü	8	-	-	-	-
Çıplak arazi	11	669.13	677.11	7.98	1.18
Toplam		1546.04	1546.04		

Çizelge 3. AKAÖ 2012 ve 2016 yılları arasındaki değişim değerlendirmesi

AKAÖ sınıfları	Sınıf numarası	2012	2016	Alansal Değişim (km ²)	Değişim (%)
		Alan (km ²)			
Su kütlesi	1	109.15	108.90	-0.25	-0.23
Sulak alan	2	20.71	-	-	-
Orman	3	0.43	0.10	-0.34	-354.36
Tarım alanı	5	718.11	113.17	-604.94	-534.55
Yerleşim yeri	7	20.53	5.37	-15.16	-282.21
Kar/Buz örtüsü	8	-	59.68	-	-
Çıplak arazi	11	677.11	1258.83	581.72	46.21
Toplam		1546.04	1546.04		

Çizelge 4. AKAÖ 2016 ve 2018 yılları arasındaki değişim değerlendirmesi

AKAÖ sınıfları	Sınıf numarası	2016	2018	Alansal Değişim (km ²)	Değişim (%)
		Alan (km ²)			
Su kütlesi	1	108.90	113.23	4.33	3.82
Sulak alan	2	-	-	-	-
Orman	3	0.10	0.18	0.09	47.88
Tarım alanı	5	113.17	343.22	230.06	67.03
Yerleşim yeri	7	5.37	39.81	34.44	86.51
Kar/Buz örtüsü	8	59.68	26.64	-33.04	-124.04
Çıplak arazi	11	1258.83	1022.96	-235.87	-23.06
Toplam		1546.04	1546.04		

Çizelge 5. AKAÖ 2018 ve 2020 yılları arasındaki değişim değerlendirmesi

AKAÖ sınıfları	Sınıf numarası	2018	2020	Alansal Değişim (km ²)	Değişim (%)
		Alan (km ²)			
Su kütlesi	1	113.23	113.21	-0.02	-0.02
Sulak alan	2	-	-	-	-
Orman	3	0.18	0.31	0.13	41.76
Tarım alanı	5	20.37	-6.27	-30.78	-32.29
Yerleşim yeri	7	1108.89	85.93	7.75	9.13
Kar/Buz örtüsü	8	1546.04			
Çıplak arazi	11	1022.96			
Toplam		1546.04			

Çizelge 6. AKAÖ 2020 ve 2022 yılları arasındaki değişim değerlendirmesi

AKAÖ sınıfları	Sınıf numarası	2020	2022	Alansal Değişim (km ²)	Değişim (%)
		Alan (km ²)			
Su kütleli	1	113.21	110.23	-2.98	-2.70
Sulak alan	2	-	-	-	-
Orman	3	0.31	0.19	-0.13	-68.53
Tarım alanı	5	259.46	346.67	87.21	25.16
Yerleşim yeri	7	43.81	43.22	-0.59	-1.36
Kar/Buz örtüsü	8	20.37	17.46	-2.91	-16.68
Çıplak arazi	11	1108.89	1028.28	-80.61	-7.84
Toplam		1546.04	1546.04		

Çizelge 7. AKAÖ 2006 ve 2022 yılları arasındaki değişim değerlendirmesi

AKAÖ sınıfları		2006	2022	Alansal Değişim (km ²)	Değişim (%)
		Alan (km ²)			
Su kütleli	Erçek Gölü	109.63	107.24	-2.39	-2.23
	Diğer	0.98	2.99	2.01	67.07
Sulak alan		23.45	-	-	-
Orman		0.48	0.19	-0.29	-157.91
Tarım alanı		725.05	346.67	-378.38	-109.15
Yerleşim yeri		17.31	43.22	25.91	59.94
Kar/Buz örtüsü		-	17.46	-	-
Çıplak arazi		669.13	1028.28	359.15	34.93
Toplam		1546.04	1546.04		

3.2. Normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi sonuçları

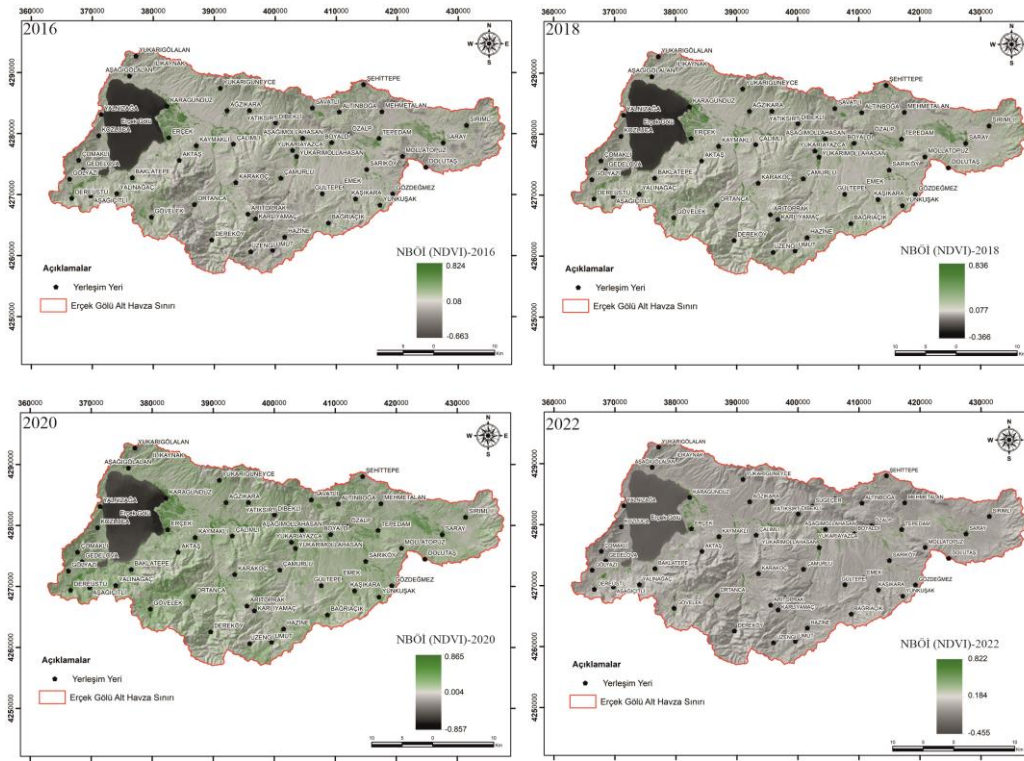
NBÖİ, bitki örtüsü yoğunluğunu/gücünü gösteren bilgiler üretmemizi sağlayan standartlaştırılmış bir endeks (Ganie & Nusrath, 2016) olup bu indeks, değişen aydınlanma koşullarını, yüzey eğimini, bakıyı ve diğer dış faktörleri telafi ettiği için küresel bitki örtüsünün izlenmesi için tercih edilmektedir (Lillesand ve ark., 2008). NBÖİ temel olarak bir alandaki bitki örtüsü miktarını -1 ile 1 arasında değişen bir ölçekte ölçer; burada negatif değerler bitki örtüsü olmayan yüzeylere karşılık gelirken pozitif değerler bitki örtüsüne karşılık gelmektedir (Martinuzzi ve ark., 2008). Havza genelinde 2016-2022 yılları arasında bitki örtüsü olan alanların gelişimini bitki örtüsü olmayan yüzeylerle karşılaştırmak için NBÖİ görüntü sınıflandırması aracılığıyla değişiklik tespiti yapılmıştır. Elde edilen yıllık yüksek ve düşük NBÖİ değerlerinin özet sonuçları Çizelge 8’de sunulmuştur. Düşük NBÖİ’li alanlar çoğunlukla alt havza genelinde dağılmış olup daha yüksek bitki örtüsüne sahip alanlar, orta bölgedeki çayır otlaklarında, özellikle de Özalp çayırının Erçek Gölü’ne döküldüğü, Saray, Özalp, Dereyazı ve Gölyazı yerleşim bölgelerinde yoğunlaştığı görülmüştür (Şekil 3).

Havza genelinde 2016-2022 yılları arasında pozitif (en yüksek) NBÖİ değerlerinin 0.822 ile 0.865 arasında değiştiğini görülmektedir (Çizelge 8). Uddin & Mondal (2020)’ye göre sağlıklı bitki örtüsü veya geniş ormanlık alanlar 0.60’ın üzerindeki NBÖİ değerleriyle temsil edilirken, sağlıklı bitki örtüsü veya dağınık çalı ve çalılar 0.60’ın altındaki pozitif değerlerle temsil edilmektedir. Çalışma alanında, 2016-2022 arasındaki 0.6-1 değer aralığı bazı yıllar arasında dönüşümlü artış gösterse de sağlıklı bitki örtüsü veya geniş ormanlık alanların yayılımı çok sınırlı kalmaktadır (Şekil

3). Bu durum orman alanlarının bu altı yılda yaklaşık 0.09 km²lik bir miktar artış gösterdiği havza geneline ait AKAÖ haritaları ait değişim değerlendirmesi ile desteklenmiştir (Çizelge 7). Bununla beraber, aynı dönemde negatif (en düşük) NBÖİ değerlerinin -0.857 ile -0.366 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu durum bir su kütlesi/sulu yüzeylerin varlığının göstermekte olup inceleme alanı genelinde bu su kütlesi Erçek Gölü'nün bir göstergesidir (Çizelge 8). Çeşitli yıllar boyunca pozitif (en yüksek) NBÖİ değerleri arasındaki değişiklik, negatif (en düşük) NBÖİ değerleri arasındaki değişiklik kadar belirgin değildir. Diğer taraftan, sulu/su yüzey alanlarının azaldığı ve arttığı dönüşümlü dönemler yaşamaktadır.

Çizelge 8. 2016, 2018, 2020, ve 2022'e ait NBÖİ değişim değerleri

Yıl		2016	2018	2020	2022
NBÖİ	Maksimum	0.824	0.836	0.865	0.822
	Minimum	-0.663	-0.366	-0.857	-0.455



Şekil 3. 2016, 2018, 2020 ve 2022'e ait NBÖİ görüntüleri.

3.3. Normalleştirilmiş fark su indeksi analizleri

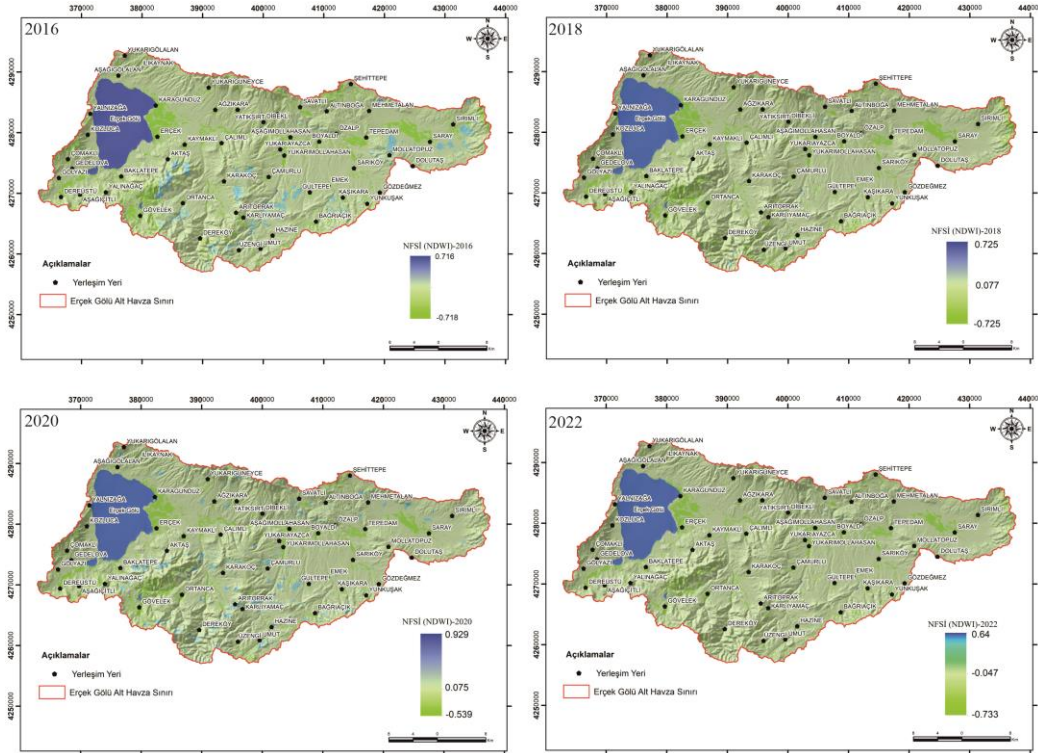
NFSİ, görsellerdeki su piksellerini vurgulamada etkili olan bir su indeksi sulak alanlar, nehir, göller ve okyanus gibi su kütlelerinin alansal değişimi ile ilgili çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Bhatta, 2011; Nsubuga ve ark., 2017; Bijeesh & Narasimhamurthy, 2019). Su kütlelerindeki alansal değişimin izlenmesinde, fark edilir olması bakımından yaygın olarak görsellerde su pikselleri normalleştirilmiş fark su indeksi (NFSİ) şeklinde kullanılmaktadır. Su yüzey alanlarındaki değişimi ayırt etmek ve karşılaştırabilmek için 2016-2022 yılları arasında kuru yüzeyler, NFSİ görüntü sınıflandırması yoluyla değişiklik tespiti gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yıllık en yüksek ve en düşük NFSİ değerleri Çizelge 9'da sunulmaktadır.

Sonuçlar, pozitif (en yüksek) NFSİ değerlerinin 0.64 ile 0.929 arasında değiştiğini göstermektedir; bu, 2016 ile 2022 arasındaki dönem boyunca EGKH'da yüksek nem içeriğine sahip sulu yüzeylerin (su kütlesi ve yoğun bitki örtüsüne sahip manzaralar) varlığını göstermektedir. Bir su kütlesi +0.50'nin üzerindeki NFSİ değerleri ile temsil edilirken, bunun altındaki değerler diğer arazi örtülerini göstermektedir (Uddin & Mondal, 2020; Onyango & Opiyo, 2022).

Şekil 4 de de görüldüğü gibi 2016 ve 2018 yıllarında bazı çıplak araziler, su içeren toprak yüzeylerine maruz kalır ve bu nedenle genellikle yüksek (pozitif) NFSİ değerine sahip olabilmektedir. Buna ek olarak yıllara göre negatif (en düşük) NFSİ değerlerinin -0.733 ile -0.539 arasında değişim göstermektedir. Bu değer aralığı, susuz, nem içeriği olmayan yüzeylerin (yapılaşmış ve çıplak araziler) varlığını göstermektedir. Çıplak araziler genellikle toprak ve bitki örtüsündeki su içeriğinin azalmasıyla karakterize edilen kuraklık koşullarında bulunur ve bu da endeksin negatif değerlere düşmesine neden olur (Nicacias, 2009). 2016-2022 yılları arasında pozitif (en yüksek) ve negatif (en düşük) NFSİ değerleri arasında dönüşümlü bir artış ve 2022 yılında ise azalış eğilimi gözlenmiştir. Bu eğilimler, su piksel miktarlarındaki dağılımı bakımından 2016, 2018, 2020 ve 2022 (Şekil 3) yıllarına ait NFSİ haritalarının görsel incelemesiyle doğrulanmıştır. Bu görüntülerde maksimum su içeriği (en yüksek NFSİ değerleri) koyu koyu mavi renkle gösterilirken minimum su içeriği yeşil renkle gösterilmiştir. NFSİ sonuçları genel olarak 2016-2022 yılları arasında EGKH genelinde yer alan su kütlelerin veya sulak alanların, çarpık yapılaşma ve çıplak arazilerin artan kapsamı nedeniyle zamanla azaldığını göstermiştir.

Çizelge 9. 2016, 2018, 2020, ve 2022'e ait NFSİ değişim değerleri

Yıl		2016	2018	2020	2022
NFSİ	Maksimum	0.716	0.725	0.929	0.64
	Minimum	-0.718	-0.725	-0.539	-0.733



Şekil 4. 2016, 2018, 2020 ve 2022'e ait NFSİ görüntüleri.

4. Tartışma ve Sonuç

Van Gölü Havzası'nın doğusunda yer alan Erçek Gölü havzası ayrı bir kapalı havza özelliği göstermekte olup, yaklaşık 1546.0518 km²'lik bir alanı kaplamaktadır. EGKH bölgesi, son yıllarda insan faaliyetlerinden ve yersel/bölgesel iklim değişimlerinden farklı şekillerde etkilenen tipik bir su-toprak eko-kırılğan bölgesi olarak bilinmektedir. Bu çalışmada, EGKH genelinde 2006, 2012, 2016, 2018, 2020 ve 2022 yılları arazi kullanım/razi örtüsü (AKAÖ), 2016, 2018, 2020 ve 2022 yılları normalleştirilmiş bitki örtüsü indeksi (NBÖİ) ve normalleştirilmiş fark su indeksi (NFSİ) arasındaki karmaşık etkileşimi araştırılmıştır. AKAÖ haritalarının genel doğruluk değerlendirme sonuçları sırasıyla %84, %94, %76, %86, %92 ve %92'lik bir genel doğruluk düzeyi ve Kappa katsayıları ise sırasıyla 0.805, 0.925, 0.422, 0.728, 0.832 ve 0.835 olarak hesaplanmıştır. AKAÖ haritaları 2006-2022 yılları arasında tarım arazi alanının yaklaşık %109.15'lik bir azalma olduğunu ve çıplak arazi alanında ise yaklaşık %349.3 bir artış meydana geldiğini göstermiştir. Özellikle son yıllarda EGKH, plansız nüfus artışı ve sosyoekonomik kalkınma faaliyetlerinden kaynaklanan arazi bozulması ve aşırı kullanımla karşı karşıya kaldığı gözlemlerin doğruluğunu, sayısal veriler ışığında değişim oranına kadar vermektedir. Bu veriler, bölge genelinde yaşayan insanların sosyo-ekonomik gelişmeye bağlı olarak tarım faaliyetlerini terk ettiğini göstermektedir. Bununla beraber havza genelindeki yerleşim yeri alanı 2006'da yaklaşık 17.31 km² iken 2016'da 43.22 km²'ye yükseldiği belirlenmiştir. Yerleşim yeri alandaki bu artış, genelde Saray, Özalp ve Erçek yerleşim yeri çevresindeki bölgede yoğunlaştığı gözlenmiştir. İncelenen yıllar arasında kapalı havza genelinde yer alan en önemli su kütlesi olan Erçek Gölü yüzey alanında ise %2.23'lük bir azalma da tespit edilmiştir. Havza genelinde 2016-2022 yılları arasında pozitif (en yüksek) NBÖİ değerlerinin 0.822 ile 0.865 arasında değişmektedir. Negatif (en düşük) NBÖİ değerlerinin ise -0.857 ile -0.366 arasında değişmekte olup bu durum Erçek Gölü'nü ima eden bir su kütlesi/sulu yüzeylerin varlığının bir göstergesidir. NFSİ sonuçları da genel olarak 2016-2022 yılları arasında EGKH genelinde yer alan su kütleleri veya sulak alanlar çarpık yapılaşma ve çıplak arazilerin artan kapsamı nedeniyle zamanla azaldığını göstermiştir.

Kaynakça

- Abebe, G., Getachew, D., & Ewunetu, A. (2022). Analysing land use/land cover changes and its dynamics using remote sensing and GIS in Gubalafito district, Northeastern Ethiopia. *SN Applied Sciences*, 4, 30. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04915-8>
- Adab, H., Kanniah, K. D., & Solaimani, K. (2013). Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural Hazards*, 65, 1723-1743. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8>
- Allam, M., Bakr, N., & Elbably, W. (2019). Multi-temporal assessment of land use/land cover change in arid region based on landsat satellite imagery: Case study in Fayoum Region, Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14, 8-19. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.02.002>
- Ambastha, K., Hussain, S. A., & Badola, R. (2007). Resource dependence and attitudes of local people toward conservation of Kabartal wetland: A case study from the Indo-Gangetic plains. *Wetlands Ecology and Management*, 15, 287-302. <https://doi.org/10.1007/s11273-006-9029-z>
- Anand, V., & Oinam, B. (2020). Future land use land cover prediction with special emphasis on urbanization and wetlands. *Remote Sensing Letters*, 11(3), 225-234. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1704304>
- Arveti, N., Etikala, B., & Dash, P. (2016). Land use/land cover analysis based on various comprehensive geospatial data sets: a case study from Tirupati area, south India. *Advance in Remote Sensing*, 5(2), 73-82. <http://dx.doi.org/10.4236/ars.2016.52006>
- Ballut-Dajud, G.A. Sandoval Herazo, L.C., Fernández-Lambert, G., Marín-Muñiz, J.L., López Méndez, M.C., & Betanzo-Torres, E.A. (2022). Factors affecting wetland loss: A review. *Land*, 11(3), 434. <https://doi.org/10.3390/land11030434>

- Belal, A. A., & Moghanm, F. S. (2011). Detecting urban growth using remote sensing and GIS techniques in Al Gharbiya governorate, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 142, 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2011.09.001>
- Bhatta, B. (2011). *Remote sensing and GIS*. Oxford University Press: New Delhi, India.
- Bijeesh, T.V., & Narasimhamurthy, K. N. (2019, March). *A comparative study of spectral indices for surface water delineation using Landsat 8 images* (pp.1-5). In 2019 IEEE International Conference on Data Science and Communication (IconDSC), Bangalore, India. <https://doi.org/10.1109/IconDSC.2019.8816929>
- Chen, S., Chen, B., & Fath, B. D. (2013). Ecological risk assessment on the system scale: A review of state-of-the-art models and future perspectives. *Ecological Modelling*, 250, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.015>
- Chughtai, A. H., Abbasi, H., & Karas, I. R. (2021). A review on change detection method and accuracy assessment for land use land cover. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100482. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100482>
- Di Gregorio, A., & Jansen, L.J.M. (2000). *Land cover classification system (LCCS): Classification concepts and user manual*. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.
- Dişli, E. (2015). Hydrology and water chemistry of Lake Burdur, South-West Anatolia, Turkey. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*, 4, 525-536.
- Dişli, E. (2017). Hydrochemical characteristics of surface and groundwater and suitability for drinking and agricultural use in the Upper Tigris River Basin, Diyarbakır-Batman, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 76, 500. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6820-5>
- Dişli, E. (2018). Murgul Bakır Madeni-Damar Atık Barajı (Artvin) alanındaki yeraltı ve yüzey suyu kaynaklarının hidrojeolojik özellikleri ve boya deneyi. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 33(1), 163-178.
- Elmahdy, S. I., Ali, T. A., Mohamed, M. M., Howari, F. M., Abouleish, M., & Simonet, D. (2020). Spatiotemporal mapping and monitoring of mangrove forests changes from 1990 to 2019 in the Northern Emirates, UAE using random forest, Kernel logistic regression and Naive Bayes Tree models. *Frontiers Environmental Science*, 8(102), 1-23. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00102>
- Essa, W., Verbeiren, B., van der Kwast, J., Van de Voorde, T., & Batelaan, O. (2012). Evaluation of the DisTrad thermal sharpening methodology for urban areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.05.010>
- Faruque, Md. J., Vekerdy, Z., Hasan, Md. Y., Islam, K. Z., Young, B., Ahmed, M. T., ... & Kundu, P. (2022). Monitoring of land use and land cover changes by using remote sensing and GIS techniques at human induced mangrove forests areas in Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100699. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100699>
- Ganie, M. A., & Nusrath, A. (2016). Determining the vegetation indices (NDVI) from Landsat 8 satellite data. *International Journal of Advanced Research*, 4(8), 1459-1463. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/1348>
- Gibbs, J. P. (2000). Wetland loss and biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 14(1), 314-317.
- Gilmore, S., Saleem, A., & Dewan, A. (2015). *Effectiveness of DOS (Dark-Object Subtraction) method and water index techniques to map wetlands in a rapidly urbanising megacity with Landsat 8 data*. In Research@Locate'15 (pp. 100-108). <http://SunSITE.Informatik.RWTH-Aachen.DE/Publications/CEUR-WS/>.
- Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., & Wu, L. (2017). A Review of wetland and remote sensing. *Sensors*, 17(4), 777. <https://doi.org/10.3390/s17040777>
- He, X., Gao, Y., Niu, J., & Zhao, Y. (2011). Landscape pattern changes under the impacts of urbanization in the Yellow River Wetland-taking Zhengzhou as an example. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 2165 -2169. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.339>
- İrcan, M. R., & Duman, N. (2022). Van Gölü Havzası'ndaki maksimum ve minimum sıcaklıkların trend analizi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 80, 39-52. <https://doi.org/10.17211/tcd.1079628>

- Jamal, S., & Ahmad, W.S. (2020). Assessing land use land cover dynamics of wetland ecosystems using Landsat satellite data. *SN Applied Sciences*, 2, 1891. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03685-z>
- Jensen, J. (2007). *Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective*, 2nd ed. Pearson Prentice Hall.
- Kumar, G., & Singh, K. K. (2020). Mapping and Monitoring the Selected Wetlands of Punjab, India, Using Geospatial Techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48, 615-625. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01104-9>
- Liang, S. (2005). *Quantitative remote sensing of land surfaces*. John Wiley & Sons.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2008). *Remote sensing and image interpretation*. 6th ed. Wiley: New York.
- Malekmohammadi, B., Uvo, C.B., Moghadam, N.T., Noori, R., & Abolfathi, S. (2023). Environmental risk assessment of wetland ecosystems using bayesian belief networks. *Hydrology*, 10(1), 16. <https://doi.org/10.3390/hydrology10010016>
- Mancino, G., Nolè, A., Ripullone, F., & Ferrara, A. (2014). Landsat TM imagery and NDVI differencing to detect vegetation change: assessing natural forest expansion in Basilicata, southern Italy. *iForest- Biogeosciences and Forestry*, 7(2), 75-84. <https://doi.org/10.3832/ifer0909-007>
- Martinuzzi, S., Gould, W. A., Ramos Gonzalez, O. M., Martinez Robles, A., Calle Maldonado, P., Pérez-Buitrago, N., & Fumero Caban, J. J. (2008). Mapping tropical dry forest habitats integrating Landsat NDVI, Ikonos imagery, and topographic information in the Caribbean Island of Mona. *Revista de Biología Tropical*, 56(2), 625-639.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Molly, A. (2022). *Assessment of land use change impacts on wetland hydrology and vegetation health using NDWI and NDVI respectively. A case study of Tochi wetland, Oyam district*. (PhD), A research dissertation submitted to the school of Forestry, Environmental and Geographical Sciences in Partial Fulfilment for the award of the degree of bachelor of Environmental Science of Makerere University.
- Nicacias, M. (2009). *Evaluating the effect of moisture stress on tomato using non-destructive remote sensing techniques*. (PhD), University of Limpopo, Mankweng, South Africa.
- Nsubuga, F. W. N., Botai, J. O., Olwoch, J. M., dew Rautenvbach, C. J., Kalumba, A. M., Tsela, P., & Mearns, K. F. (2017). Detecting changes in surface water area of Lake Kyoga sub-basin using remotely sensed imagery in a changing climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 127, 327-337. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1637-1>
- Onamuti, O. Y., Okogbue, E. C., & Orimoloye, I. R. (2017). Remote sensing appraisal of Lake Chad shrinkage connotes severe impacts on green economics and socio-economics of the catchment area. *Royal Society Open Science*, 4(11), 171120. <https://doi.org/10.1098/rsos.171120>
- Onyango, D. O., & Opiyo, S. B. (2022), Detection of historical landscape changes in Lake Victoria Basin, Kenya, using remote sensing multi-spectral indices. *Watershed Ecology and the Environment*, 4, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2021.12.001>
- Orimoloye, I. R., Kamba, A. M., Mazinyon, S. P., & Nel, W. (2020). Geospatial analysis of wetland dynamics: Wetland depletion and biodiversity conservation of Isimangaliso Wetland, South Africa. *Journal of King Saud University-Science*, 32(1), 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.03.004>
- Ostad-Ali-Askari, K. (2022). Review of the effects of the anthropogenic on the wetland environment. *Applied Water Science*, 12, 260. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01767-4>
- Öztürk, M., & Dişli, E. (2022). Hydrochemical and environmental isotopes characteristic of groundwater and controlling factors for waters' chemical composition in the Iron-Copper mine area (Elazığ, SE Turkey). *Environmental Chemistry*, 19(6), 350-374. <http://doi.org/10.1071/en22070>
- Paludan, C., Alexeyev, F. E., Drews, H., Fleischer, S., Fuglsang, A., Kindt, T., ... & Wolter, K. (2002). Wetland management to reduce Baltic Sea eutrophication. *Water Science & Technology*, 45(9), 87-94. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0211>

- Reed, B. C., Loveland, T. R., & Tieszen L. L. (1996). An approach for using AVHRR data to monitor U.S. great plains grasslands. *Geocarto International*, 11(3), 13-22. <https://doi.org/10.1080/10106049609354544>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973, December). *Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite)*. Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium, Greenbelt.
- Smail, R. Q. S., & Dişli, E. (2023). Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate and TDS using based on a modified DRASTIC model: a case study in the Erbil Central Sub-Basin, Iraq. *Environmental Monitoring and Assessments*, 195, 567. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11165-1>
- Singh, S. K., Mustak, Sk., Srivastava, P. K., Szabó, S., & Islam, T. (2015). Predicting spatial and decadal LULC changes through cellular automata markov chain models using earth observation datasets and geo-information. *Environmental Processes*, 2, 61-78. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0062-x>
- Singh, S, Kumar, P., Parijat, R., Gonengcil, B., & Rai, A. (2023). Establishing the relationship between land use land cover, normalized difference vegetation index and land surface. *Geography and Sustainability*, 5(2), 265-275. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.11.006>
- Sreenivasulu, G., Jayaraju, N., Kishore, K., & Lakshmi Prasad, T. (2014). Landuse and landcover analysis using remote sensing and GIS: A case study in and round Rajampet, Kadapa District, Andhra Pradesh, India. *Indian Journal of Scientific Research*, 8, 123-129.
- Tawfeeq, J. MS., Dişli, E., & Hamed, M. H. (2024). Hydrogeochemical evolution processes, groundwater quality, and non-carcinogenic risk assessment of nitrate-enriched groundwater to human health in different seasons in the Hawler (Erbil) and Bnaslawra Urbans, Iraq. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 26182-26203. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32715-1>
- Uddin, M. J., & Mondal, C. (2020). Effect of earth covering and water body on land surface temperature (LST). *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 11(1), 45-56. <https://doi.org/10.33736/jcest.2065.2020>
- Xiao, Y., Hao, Q., Zhang, Y., Zhu, Y., Yin, S., Qin, L., & Li, X. (2022). Investigating sources, driving forces and potential health risks of nitrate and fluoride in groundwater of a typical alluvial fan plain. *Science of the Total Environment*, 802, 149909. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149909>
- Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Verma, P., Raghubanshi, A., Srivastava, P. K., & Raghubanshi, A. S. (2020). Appraisal of kappa-based metrics and disagreement indices of accuracy assessment for parametric and nonparametric techniques used in LULC classification and change detection. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 1045-1059. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00740-x>
- Zhang, L., Wang, M.-H., Hu, J., & Ho, Y.-S. (2010). A review of published wetland research, 1991-2008: Ecological engineering and ecosystem restoration. *Ecological Engineering*, 36(8), 973-980. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.029>
- Zhang, Z., Fan, Y., Jiao, Z., Wang, X., & Wu, Q. (2022). *Baseline-based soil salinity index (BSSI): a new soil salinity index for monitoring soil salinization*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, Kuala Lumpur, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9883453>
- Zhao, Y., Hu, C., Dong, X., & Li, J. (2023). NDVI characteristics and influencing factors of typical ecosystems in the Semi-Arid Region of Northern China: A case study of the Hulunbuir Grassland. *Land*, 12, 713. <https://doi.org/10.3390/land12030713>
- Zsuffa, I., Van Dam, A. A., Kaggwa, R. C., Namaalwa, S., Mahieu, M., Cools, J., & Johnston, R. (2014). Towards decision support-based integrated management planning of papyrus wetlands: A case study from Uganda. *Wetlands Ecology Management*, 22, 199-213. <https://doi.org/10.1007/s11273-013-9329-z>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Ulaşım Kaynaklı Emisyonların Çevresel Etkilerinin ve İnsan Sağlığına Yansımalarının İncelenmesi: Ege Bölgesi Örneği[†]

Tarık ÖZDEMİR^{*1}, Emine Didem EVCİ KİRAZ²

¹Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Disiplinler arası Çevre Sağlığı Anabilim Dalı, 09010, Aydın, Türkiye

²Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Tıp Fakültesi Halk Sağlığı Anabilim Dalı, 09010, Aydın, Türkiye
Tarık ÖZDEMİR, ORCID No: 0000-0002-3553-5705,

Emine Didem EVCİ KİRAZ, ORCID No: 0000-0003-0090-5590

*Sorumlu yazar e-posta: tarik.ozdemir@adu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 01.02.2024
Kabul: 05.06.2024
Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1429813](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1429813)

Anahtar Kelimeler

Çevre ve insan sağlığı,
Ege Bölgesi,
Kara yolu ulaşımı
emisyonları,
Tier 1

Öz: Bu araştırma, Ege Bölgesi'ndeki Afyon, Aydın, Denizli, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla ve Uşak illerinin 2010 ve 2019 yıllarına ait kara yolu ulaşımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarını ve bunların çevre ile insan sağlığına etkisini incelemek amacıyla yapılmıştır. İki farklı yöntem kullanılmıştır. İlk yöntemde veriler, EPDK raporları ile TÜİK aracılığıyla toplanmış ve belirlenen illerde 2010 ve 2019 yılları arasındaki sera gazı emisyon verileri IPCC tarafından geliştirilen Tier 1 yöntemi ile analiz edilmiştir. İkinci yöntemde ise, Ocak 2017 ve sonrasında literatür taraması sonucunda elde edilen, Türkiye'deki taşımacılık kaynaklı emisyonların çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini inceleyen gözlemsel çalışmaların verileriyle, sistematik derleme yöntemi kullanılarak incelenmiştir. İlk kısımda, sekiz şehirdeki sera gazı emisyonlarının 2010'da 8,224.04 Gg CO₂ eşdeğeri olduğu ve 2019'da %72.14 artarak 14,151.43 Gg CO₂ (e.)'e ulaştığı tespit edilmiştir. İkinci kısımda ise, Türkiye'deki taşımacılık kaynaklı emisyonların insan ve çevre sağlığına etkisini gösteren 2017 ve sonrasındaki nitel sentez için uygun olduğu görünen 14 çalışmanın bulguları özetlenmiştir. Sistematik derlemeye dahil edilen çalışma sonucunda elde edilen bulguların, kara yolu ulaşımından kaynaklı emisyonların, insan ve çevre sağlığı üzerine etkili olabileceğini gösterir önemli kanıtlara dayalı araştırmaların olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, kara yolu ulaşımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının Ege Bölgesi'nde önemli ölçüde arttığı ve bu emisyonların insan ve çevre sağlığı üzerinde ciddi etkileri olabileceği belirlenmiştir. Araştırma, Paris Anlaşması hedeflerine uygun olarak kara yolu ulaşımından kaynaklanan emisyonları azaltmak için alınacak önlemlerin ve alternatif taşımacılık seçeneklerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

Examination of the Environmental Impacts and Human Health Reflections of Transportation-Related Emissions: A Case Study of the Aegean Region

Article Info

Received: 01.02.2024
Accepted: 05.06.2024
Online August 2024

Abstract: This research was conducted to examine the greenhouse gas emissions resulting from road transportation in Afyon, Aydın, Denizli, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla and Uşak provinces in the Aegean Region between 2010 and 2019 and their effects on the environment and human health. Two different methods were used. In the first method, data was collected through EMRA reports and

[†] Bu çalışma, birinci yazarın "Ege Bölgesindeki Şehirlerin Ulaşım Kaynaklı Emisyonların Analizi; Emisyonların Çevre ve İnsan Sağlığına Etkisi: Sistematik Derleme" başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.

DOI:10.53433/yyufbed.1429813

Keywords

Aegean region,
Environmental and human
health,
Road transportation
emissions,
Tier 1

TÜİK, and greenhouse gas emission data between 2010 and 2019 in the specified provinces were analyzed with the Tier 1 method developed by IPCC. In the second method, data from observational studies examining the effects of transportation-related emissions on the environment and human health in Turkey, obtained as a result of literature review in January 2017 and later, were examined using the systematic review method. In the first part, it was determined that greenhouse gas emissions in eight cities were 8,224.04 Gg CO₂ equivalent in 2010 and increased by 72.14% in 2019, reaching 14,151.43 Gg CO₂ (e.). In the second part, the findings of 14 studies that appear to be suitable for qualitative synthesis in 2017 and later, showing the effects of transportation-related emissions on human and environmental health in Turkey, are summarized. It has been concluded that the findings obtained as a result of the study included in the systematic review are significant evidence-based research showing that emissions from road transportation can have an impact on human and environmental health. As a result, greenhouse gas emissions from road transportation have increased significantly in the Aegean Region. and it has been determined that these emissions may have serious effects on human and environmental health. The research contributes to the determination of measures to be taken and alternative transportation options to reduce emissions from road transportation in line with the Paris Agreement targets.

1. Giriş

Hava kalitesi; sıcaklık, volkanik etkinlikler, rüzgarlar ve kum fırtınaları gibi doğal kaynaklar ile araç egzozları, kömürlü termik santraller ve endüstriyel işlemler gibi insan kaynaklı faktörlerden etkilenmektedir. Bir bölgedeki hava kalitesi, atmosferde bulunan kirletici maddelerin yoğunluğuna göre değerlendirilmektedir. Kirletici maddelerin normalden fazla olması hava kirliliğine ve hava kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır (Umutlu, 2023). Hava kirliliği “atmosfere zararlı miktarda kirleticilerin karışması sonucu insanları ve çevreyi olumsuz etkileyen bir durum” olarak ifade edilmektedir. Atmosferde katı, sıvı ve gaz halinde bulunan kirletici unsurların insan sağlığı, canlı yaşamı ve ekolojik dengeye zarar verebilecek veya yaşamdan yararlanmanın engellenebilecek miktar veya süre boyunca bulunması durumunu ifade etmektedir (Yazıcı ve ark., 2010). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), hava kirliliğini iç veya dış mekân atmosferinin doğal özelliklerini değiştiren herhangi bir kimyasal, fiziksel veya biyolojik maddeyle kirlenmesi olarak tanımlamaktadır (WHO, 2019).

Hava kirliliğine sebep olan etkenler doğal ve yapay etkenler olarak iki ayrı grupta incelenmektedir. Orman yangınları, volkanik faaliyetler ve toz bulutları hava kirliliğini etkileyen başlıca doğal faktörlerdir. Hava kirliliğindeki neden olan insan kaynaklı yapay etkenler ise enerji santrallerinin bacaları, üretim tesisleri (fabrikalar), atık yakma tesisleri, tarım ve orman yönetiminde kullanılan kimyasallar, depo sahalarındaki atıklardan oluşan metan gazları ile motorlu taşıtlar olabilmektedir (Choudhary & Garg, 2013). Hava kirliliği genellikle partikül madde (PM), kükürt dioksit (SO₂), azot oksitler (NO ve NO₂), karbon monoksit (CO), toz, is ve duman gibi kirleticilerden oluşmaktadır (Menteşe, 2017). Hava kirliliği, erken ölümler, kalp hastalıkları, akciğer kanseri ve çeşitli solunum hastalıkları gibi ciddi akut ve kronik sağlık sorunlarına yol açmaktadır (Aksoy ve ark., 2021). Hem açık havada hem de kapalı mekânlarda oluşan hava kirliliği, solunum yolu ve diğer hastalıklara yol açarak morbidite ve mortalitenin önemli nedenlerinden biridir (WHO, 2019). Atmosferik kirleticiler, insan sağlığına ve ekosistemlere ciddi etkileri olan hava kirliliği sorunlarını oluşturmaktadır. Bu problemler, özellikle ekonomik faaliyetlerin ve yoğun insan aktivitelerinin olduğu kentsel alanlarda daha açık bir şekilde görülmekte ve ulaşımın bunda önemli payı bulunmaktadır (TMMOB, 2022). Motorlu araçların emisyonları, bu kirliliğin artmasında önemli bir kaynak olarak öne çıkmaktadır (Cuci & Polat, 2015). Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde hızla artan ulaşım talebi, gelecekte sera gazlarının olumsuz etkilerinin artmasına neden olmaktadır (Ötken & Gümüşay, 2010).

Kentsel alanlarda trafik, hava kirliliğinin ana kaynaklarından biridir. Araç egzozları, atmosferde oluşan ikincil kirleticiler, araçlardan buharlaşan emisyonlar ve yanma dışı emisyonlar (örneğin, yol tozu, lastik aşınması), trafik kaynaklı hava kirliliği olarak adlandırılan sorunu oluşturmaktadır (Matz ve ark., 2019). Benzin, motorin ve LPG gibi fosil yakıtların yoğun kullanımı, karbon emisyonlarının artmasına yol açmaktadır (Kılıç ve ark., 2021). Geleneksel benzinli ve dizel motorların egzoz emisyonlarının temel

bileşenleri, karbonmonoksit (CO), azot oksit (NO_x), hidrokarbon (HC) ve partikül madde (PM) olarak listelenebilir. CO, NO_x, HC ve PM yanma sürecinden kaynaklanırken, SO_x ve kurşun bileşikleriyakıtın kendisinden kaynaklanan kirleticilerdir. Benzinli motorlarda CO ve HC genellikle daha yüksek seviyelerde bulunurken, dizel motorlarda özellikle PM ve NO_x oluşumu problemlere neden olmaktadır (Uyumaz ve ark., 2017). Bu emisyonlar içerisinde motorlu taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarının önemli bir paya sahip olduğu kabul edilmektedir. Motorlu taşıtlarda kullanılan fosil yakıtların yanması sonucunda, karbondioksit (CO₂), azot oksit (NO_x) ve su buharı (H₂O) gibi bileşikler oluşur. Ancak ideal koşullar sağlanamadığından tam yanma gerçekleşmediği için diğer kirletici maddeler de ortaya çıkmaktadır. Motorlu taşıtların egzoz gazlarında olefinler, parafinler, aromatikler gibi yanmamış hidrokarbonlar, kısmen yanmış hidrokarbonlar olan aldehitler, ketonlar, karboksilik asitler, CO, NO_x, SO_x, kurşun bileşikleriy ve partikül maddeler bulunmaktadır (Kelen, 2014).

Kara yolu taşımacılığı, özellikle yoğun nüfuslu şehirlerde hava kirliliğinin önemli bir nedenidir. Avrupa Çevre Ajansı'na göre, Avrupa Birliği (AB) üye ülkelerinde kara yolu taşımacılığının hava kirliliğine katkısı %28 azot oksit (NO_x), %7.7 partikül madde (PM₁₀) ve %10 PM_{2.5} olarak belirlenmiştir (Aksoy ve ark., 2021). Türkiye'de 2018 yılında kara yolu araçlarından kaynaklanan sera gazı (GHG) emisyonları 78.907 kton olarak tahmin edilmiş ve bu miktar toplam emisyonun %15'ini oluşturmuştur. Bu nedenle, Türkiye'deki kara yolu taşımacılığı temelli emisyonlar hem halk sağlığına hem küresel ısınmaya hem de kentsel hava kalitesine önemli ölçüde olumsuz yönde etki etmektedir (Aksoy ve ark., 2021).

Türkiye'deki gelişmişlik düzeyinin yükselmesiyle birlikte motorlu taşıt sayısının artması beklenirken, Yoğun nüfusa sahip illerde trafik kaynaklı hava kirliliğinde önemli bir artış öngörülmektedir (Behçet & Yakın, 2020). Kara yolu taşımacılığında kaynaklanan sera gazı emisyonları, başlıca çeşitli araç türlerinde meydana gelmektedir. Motosikletlerden otomobillere, kamyonlardan kamyon-treyler kombinasyonlarına, traktörlerden otobüslere kadar geniş bir yelpazede kullanılan benzin ve dizel yakıtların yanmasından kaynaklanmaktadır. Bu emisyonların yaklaşık %60'ı yolcu seyahatlerinden, geri kalan %40'ı ise yük taşımacılığında kaynaklanmaktadır (Dündar, 2021). Türkiye'deki karbondioksit emisyonlarının %23'ü taşımacılık sektöründen kaynaklanır ve bu miktarın %90'ından fazlası kara yolu taşımacılığında gelmektedir (Teimourzadehy ve ark., 2023).

Türkiye'de Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından her yıl yayınlanan Çevresel Göstergeler Raporu'na göre, ulaştırmadan kaynaklı CO₂ emisyonlarının en büyük payının karayollarındaki ulaştırma faaliyetlerinden kaynaklandığı görülmektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Ulaştırma türüne göre sera gazı emisyonu (kiloton CO₂ eş değeri), (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023)

Yıllar	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Toplam	26.969	34.113	36.465	42.041	45.392	75.798	84.617	82.428	80.680
Havayolu	923	2.775	3.099	4.089	2.862	4.205	3.688	3.509	2.164
Kara yolu	24.777	29.760	31.850	35.532	39.941	69.309	78.907	76.720	76.601
Demiryolu	721	768	713	757	517	480	435	400	323
Denizyolu	509	726	623	1.299	1.682	1.147	931	1.217	1.264
Diğer Ulaştırma	39	83	180	364	390	656	657	581	328

Bu verilere göre, Türkiye'de ulaştırma sektöründeki sera gazı emisyonlarının çoğunluğu kara yolu taşımacılığında kaynaklanmakta ve bu emisyonlar zamanla artmaktadır. 1990'da kara yolu emisyonları 24.777 kiloton CO₂ eşdeğerindeyken, 2020'de 76.601 kiloton CO₂ eşdeğerine yükselmiştir (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023).

Ulaşımdan kaynaklı emisyonların azaltılmasına yönelik çabalar çeşitli uluslararası antlaşma ve sözleşmelerde ele alınmıştır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), Kyoto Protokolü, Paris Antlaşması, AB Yeşil Mutabakatı ve Birleşmiş Milletler (BM) Sürdürülebilir Kalkınma için 2030 Gündemi ve AB, 8.Çevre Eylem Programı gibi protokol ve anlaşmalar, emisyonlara ilişkin standartlar oluşturmayı amaçlamıştır ve Türkiye de bazı antlaşmalara taraf olmuş ve taahhütlerde bulunmuştur.

Türkiye, Kyoto Protokolü'ne 2009 yılında katılmıştır, ancak 1997'de protokol kabul edildiğinde UNFCCC üyesi olmadığı için ayrı ayrı emisyon azaltım hedefleri belirlenmiş olan ülkelerin bulunduğu

Ek-B listesinde yer almamıştır. Bu nedenle, Türkiye'nin protokol kapsamında belirli bir sera gazı emisyon azaltma veya sınırlama taahhüdü bulunmamaktadır (Dışişleri Bakanlığı, 2023). Ancak 2015'te Paris'te düzenlenen 21. Taraflar Konferansı'nda kabul edilen ve sera gazı emisyonlarını azaltma taahhüdünde bulunarak küresel sıcaklık artışını 2°C'nin altında korumayı hedeflemiş olan Paris Anlaşması'nı, Türkiye imzalayarak kabul etmiş ve 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını %41 oranında azaltma taahhüdünde bulunmuştur. Ayrıca, 2038 yılına kadar emisyonların en yüksek seviyeye ulaşmasını planlamaktadır (Dışişleri Bakanlığı, 2023). 2019 yılında ortaya çıkan, iklim değişikliğiyle mücadelede kapsamlı değişiklikler öngören bir strateji olarak dikkat çeken ve AB ülkelerini bağlayan bir eylem planı olan Yeşil Mutabakat, 2030 yılına kadar %55 oranında emisyon azaltımı hedefiyle, 2050 yılına kadar ilk iklim nötr kıta olmayı hedeflemektedir (Ticaret Bakanlığı, 2023). Avrupa Birliği (AB) 8. Çevre Eylem Programı kapsamında, iklim ve çevre hedeflerine ulaşmak amacıyla, 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını doğal yutaklar aracılığıyla azaltma taahhüdünde bulunmuştur (EUR Lex, 2023). 2020 yılında AB tarafından yayınlanan 'AB Sürdürülebilir ve Akıllı Ulaşım Stratejisi' kapsamında, sürdürülebilir ve yeşil taşıma modlarının payını artırmak, demiryolu ve iç su yolu taşımacılığının oranını yükseltmek, sıfır emisyonlu araçların kullanımını başlatmak, elektrikli araç altyapısını geliştirmek ve çevre dostu taşıma sistemlerini teşvik etmek gibi önemli hedefler yer almaktadır. Ayrıca, 2050 yılına kadar ulaştırmadan kaynaklanan emisyonların %90 oranında azaltılması hedeflenmiştir (Ticaret Bakanlığı, 2022). Türkiye de ilgili kurumların katkılarıyla birlikte AB Yeşil Mutabakatı'na uyum sağlamak amacıyla bir eylem planı oluşturulmuştur. 2023 tarihinde kabul edilen On İkinci Kalkınma Planı'nda (2024-2028) da Türkiye'nin 2053 net sıfır hedeflerine yönelik olarak döngüsel ekonomiye geçişlerin sağlanarak yeşil dönüşümün gerçekleşmesi noktasında taahhütlerde bulunulmuştur (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023). Son olarak, Birleşik Arap Emirlikleri'nde gerçekleşen BM İklim Değişikliği Konferansı ile 1 Aralık 2023 tarihi itibarıyla 123 ülkenin onayladığı COP28 İklim ve Sağlık Deklarasyonu'nda, T.C. Cumhurbaşkanlığı makamı tarafından, Türkiye'nin 2053'e kadar net sıfır emisyon hedefini gerçekleştirmeyi planladığı belirtilmiştir. Ayrıca, Türkiye'nin sera gazı emisyonlarının tarihî sorumluluğunun %1'in altında olmasına rağmen, 2053 yılı itibarıyla net sıfır emisyon hedefine ulaşma kararlılığı ve 2030'a kadar emisyon azaltımı hedefinin iki katına çıkarılması vurgulanmıştır (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023).

Egzoz emisyon azaltım hedefleri ve bu doğrultuda oluşturulan standartlar, ülkeler ve bölgeler arasında farklılık gösterebilir. Her ülke veya bölgenin kendi belirlediği standartları bulunmaktadır. Örneğin, Avrupa Birliği'nde Euro emisyon standartları kullanılırken, Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından belirlenen standartlar uygulanmaktadır. Euro emisyon standartları farklı seviyelerde (Euro 1, Euro 2, Euro 3, Euro 4, Euro 5, Euro 6 ve Euro 7 gibi) mevcuttur ve her seviye daha sıkı emisyon sınırlamalarını temsil etmektedir. ABD'de ise federal düzeyde Tier 1, Tier 2, Tier 3, LEV (Düşük Emisyonlu Araç) gibi standartlar kullanılmaktadır. Bu standartlar, otomobil üreticilerinin ve araç sahiplerinin araçlarını belirli emisyon limitlerine uygun hale getirmelerini zorunlu kılmaktadır (Crippa ve ark., 2019).

Türkiye'de egzoz emisyon denetimleri ve standartlarının belirlenmesi Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı yetkisindedir. 11/3/2017 tarihli 30004 sayılı "Egzoz Gazı Emisyonu Kontrolü Yönetmeliği" 2872 sayılı Çevre Kanunu'nun ek 4'üncü maddesi ve 10 Temmuz 2018 tarihinde Resmî Gazete'de 30478 sayısı ile yayımlanan, 1 sayılı Cumhurbaşkanlığı Teşkilatı Hakkında Cumhurbaşkanlığı Kararnamesininin 103. maddesi temel alınarak hazırlanmıştır (Özdemir, 2024).

Türkiye'de egzoz emisyon ölçümleri, 1 Sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi, 2872 Sayılı Çevre Kanunu, Egzoz Gazı Emisyonu Kontrolü Yönetmeliği ve TS 13231 Standardı'na uygun olarak yapılmaktadır. Euro emisyon standartlarına geçiş süreci 2001'de Euro 1 ile başlamıştır. Avrupa'da ise Euro standartlarının uygulanması 2005'e kadar Euro 2, Euro 3 ve Euro 4 olarak devam etmiştir. Türkiye'de yüksek maliyetler nedeniyle Euro 1'den Euro 4'e doğrudan geçilmiştir. 2008'de yayınlanan yönetmelikle, 1 Ocak 2009'dan itibaren Euro 4 standartlarına uymayan araçların satılmayacağı duyurulmuştur. Avrupa, 2009'da Euro 5'e geçmiş ve 2012'den itibaren Euro 4 araçların girişini yasaklamıştır. Bu karar, Türkiye'deki otomotiv sektöründe yeni bir sürecin başlamasına neden olmuştur. Avrupa 2014'te Euro 6'ya geçerken, Türkiye'deki geçişler 2016'da başlamıştır. Mevcut düzenlemede, Euro standartları binek araçlar ve ticari araçlar için farklılık gösterebilmektedir. Çizelge 2 ve Çizelge 3'te bu standart değerler aktarılmıştır (Parlak, 2017).

Çizelge 2. Dizel binek araçlar için Euro standartları emisyon değerleri

Standart	CO [g/km]	HC+NO _x [g/km]	NO _x [g/km]	PM [g/km]
Euro 1	2.72	0.97	-	0.14
Euro 2	1.00	0.7	-	0.08
Euro 3	0.64	0.56	0.5	0.05
Euro 4	0.50	0.3	0.25	0.025
Euro 5a	0.50	0.23	0.18	0.000225
Euro 5b	0.50	0.23	0.18	0.000225
Euro 6	0.50	0.17	0.08	0.000225

Çizelge 3. Dizel ağır ticari araçların emisyon limitleri

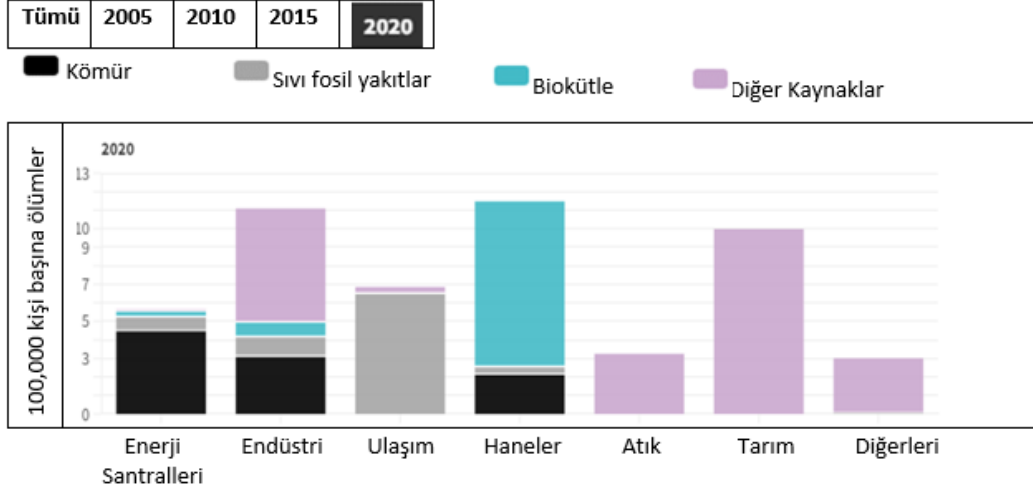
Standart	Tarih	Test	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]
Euro 3	1990.10	ETC	3	0.4	2	0.02
	2000.1		5.45	0.78	5	0.16
Euro 4	2005.1	ETC	4	0.55	3.5	0.03
Euro 5	2008.1	ETC	4	0.55	2	0.03
Euro 6	2013.1	WHTC	4	0.16 ^d	0.46	0.01

Bu çalışmanın amacı, Ege Bölgesi'nde bulunan Afyon, Aydın, Denizli, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla ve Uşak şehirlerinin 2010 ve 2019 yıllarına ait kara yolu ulaşımından kaynaklanan sera gazı emisyon miktarlarını belirlemek, şehirler arasındaki ulaşım emisyonlarını karşılaştırmak, ulaşımdan kaynaklanan emisyonların çevre ve insan sağlığına etkisini değerlendirmek ve kara yolu kaynaklı emisyonları Paris Anlaşması hedeflerine uygun olarak azaltmak için alınması gereken önlemleri ve alternatif ulaşım seçeneklerini belirlemektir. Araştırmanın odak noktası, "Şehirlerde kara yolu ulaşımından kaynaklanan emisyonların çevresel etkileri nelerdir?" ve "Şehirlerde kara yolu ulaşımından kaynaklanan emisyonların insan sağlığına etkileri nelerdir?" sorularına cevap bulmaktır. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar, sağlıklı kent planlaması yapan kurumlar, kuruluşlar ve akademisyenlere kanıt sağlayarak, şehir planlaması ve ulaşım politikalarının geliştirilmesi ile sürdürülebilirlik stratejilerinin oluşturulması gibi alanlarda önemli katkılar sunması beklenmektedir.

2. Ulaşımdan Kaynaklanan Emisyonların İnsan, Çevre ve İklim Değişikliğine Etkisi

Dünya genelinde, fosil yakıtların kara yolu taşımacılığının %95'ini oluşturduğu ve ulaşımdan kaynaklanan PM_{2.5} kirliliğinin, yılda 460.000 ölüme neden olduğu bilinmektedir. Güvenli aktif seyahat ve sıfır emisyonlu toplu taşıma teşvik edilerek, emisyon azaltımı artırılabilir ve fiziksel aktivite ile yılda 3.2 milyon ölümün bazıları önlenir ([Lancet Report, 2023](#)).

Kirletici yakıtların sürekli kullanımı nedeniyle, evlerdeki hava kirliliği 2020'de 62 ülkede 100.000 kişi başına ortalama 140 ölüme yol açmıştır. Sadece 2020'de yakıttan kaynaklanan hava kirliliğinin 1.9 milyon ölüme sebep olduğu tahmin edilmektedir. Sektöre ve emisyon kaynağına bağlı olarak, 2020'de ulaşımda kullanılan sıvı fosil yakıtlardan kaynaklanan PM_{2.5} ortam hava kirliliğine maruz kalmaya atfedilen ölüm oranı ise 100.000 kişi başına 6.52 ölüme denk geldiği tahmin edilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Sektöre ve emisyon kaynağına göre küresel ölçekte, PM_{2.5} kaynaklı ölüm oranları (Health and Climate Change Countdown Report, 2023).

2.1. Ulaşım emisyonlarının insan sağlığına etkisi

Hava kirliliğine maruz kalmak, solunum ve kardiyovasküler hastalıklar, kanser, şeker hastalığı, nörolojik bozukluklar ve olumsuz gebelik sonuçları gibi riski arttırmaktadır. Sera gazı emisyonlarının büyük çoğunluğu, hava kirliliğine önemli ölçüde katkıda bulunurlar. Fosil yakıtların yanmasıyla oluşan sera gazları, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini artırmakta ve anormal sıcak hava dalgalarının oluşmasına katkıda bulunabilmektedir. Lancet Sağlık ve İklim Değişikliği Geri Sayım 2023 Raporu'na göre, sıcak maruziyetin sıcaklıkla ilişkili hastalıkları, temel sağlık sorunlarını ve zihinsel sağlık sorunlarını ağırlaştırabileceği ve olumsuz gebelik ve doğum sonuçlarına neden olabileceği belirtilmiştir. Raporla, hassas nüfusun sıcak hava dalgalarına maruz kalma durumları detaylandırılmış ve 2013-2022 yılları arasında bebekler ve 65 yaşından büyük insanların ortalama olarak, 1986-2005 yıllarına kıyasla yılda ortalama %108 daha fazla sıcak hava dalgasına maruz kaldıkları tespit edilmiştir. 65 yaş üstü kişilerde sıcaktan kaynaklanan ölümler, 2000-2004 yılları arasında %85 artmıştır. Bebekler ve yaşlı yetişkinler, sıcak maruziyeti nedeniyle olumsuz sağlık etkilerine özellikle savunmasızdırlar (Lancet Report, 2023).

Magowan (2018) tarafından yapılan araştırma, trafik kaynaklı hava kirliliğinin solunum hastalıkları, kardiyovasküler hastalıklar, gebelik komplikasyonları, diyabet, nörolojik sağlık sorunları, artan hastane başvuruları ve ölüm riski gibi çeşitli olumsuz sağlık etkilerine neden olabileceğini belirtmektedir. Araştırma, bu etkilerin yaş, cinsiyet, etnik köken ve sosyo-ekonomik durum gibi kişisel faktörlere bağlı olarak değişebileceğini ve güvenli bir maruziyet seviyesinin belirlenmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu vurgulamaktadır.

2.2. Ulaşım emisyonlarının çevre sağlığına etkisi

Zubair ve ark. (2023)'ün çalışması, trafik kaynaklı CO₂ emisyonlarının çevre üzerindeki etkilerini şu şekilde sıralamaktadır:

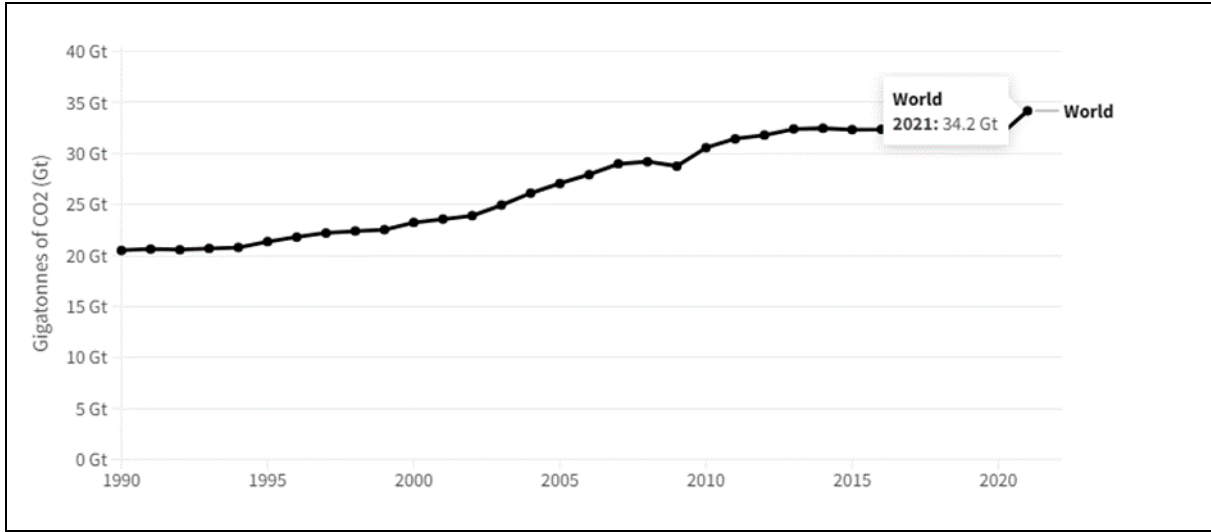
- ✓ **Küresel ısınma:** Trafik kaynaklı CO₂ emisyonları, atmosferdeki CO₂ seviyelerini artırarak küresel ısınmaya katkıda bulunmaktadır.
- ✓ **Hava kirliliği:** Trafik kaynaklı CO₂ emisyonları genellikle azot oksitler (NO_x), PM ile uçucu organik bileşikler (VOC'ler) gibi diğer kirleticilerle birlikte gelerek hava kirliliğine ve insan sağlığına zararlı etkilere neden olabilmektedir.
- ✓ **İklim değişikliği:** Trafik kaynaklı CO₂ emisyonları iklim desenlerinde değişikliklere yol açarak ekosistemleri, tarımı ve insan yerleşimlerini etkileyebilir.
- ✓ **Okyanus asitlenmesi:** Salınan CO₂'nin bir kısmı okyanuslar tarafından emilerek okyanus asitlenmesine neden olabilmektedir.

- ✓ **Biyolojik çeşitlilik kaybı:** Trafik kaynaklı CO₂ emisyonlarının iklim değişikliği ve diğer çevresel etkilerle birlikte biyolojik çeşitliliğin kaybına ve türlerin yok olmasına katkıda bulunabilmektedir.

2.3. Ulaşım emisyonlarının iklim değişikliğine etkisi

Enerji üretimi ve kullanımıyla ilişkilendirilen farklı kaynaklardan atmosfere salınan sera gazları, küresel ısınma üzerinde önemli etkiye sahiptir. Ulaşım sektörü, bu gazların yayılmasında önemli bir rol oynamaktadır ve halen fosil yakıtların (benzin, motorin, LPG) yoğun kullanımı karbon emisyonlarını artırmaktadır. Bu emisyonları azaltmak için alınabilecek önlemler arasında; çevre dostu motor teknolojilerinin teşvik edilmesi, otoyol kenarlarında ağaçlandırma faaliyetlerinin artırılması, seyahat sıklıklarının doğru planlanması, temiz enerji (hidrojen, elektrik vb.) kaynaklarının kullanımının genişletilmesi ve kişisel araç kullanımının yerine toplu taşımanın tercih edilmesi gibi önlemler alınabilir (Kılıç ve ark., 2021).

Fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan CO₂ emisyonları, sera gazlarının iklim değişikliğine olan etkisini artırmaktadır. Türkiye'nin 2020'deki toplam CO₂ emisyon miktarı Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre 366.19 gigaton olarak kaydedilmiştir ve bu miktar, 1990'a kıyasla %184.40 oranında artış göstermiştir (International Energy Agency, 2023). Küresel ölçekte enerjiyle ilişkili CO₂ emisyonları 2022 yılında %0,9 oranında artarak tarihi seviyelere ulaşmıştır. Ülkelere, İnsani Gelişme Endeksi ve DSÖ bölgesine göre fosil yakıtlardan kaynaklanan CO₂ emisyonları, 1990'da 20.5 gigaton iken, 2021 yılında 34.2 gigaton seviyesine yükselmiştir. 1990-2020 yılları arasında, fosil yakıtlardan kaynaklanan CO₂ emisyonlarında sürekli bir artış gözlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Ülkelere, insani gelişme endeksi ve DSÖ bölgesine göre fosil yakıtlardan kaynaklı CO₂ emisyon oranı (Health and Climate Change Countdown Report, 2023).

3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, iki farklı yöntem kullanıldığı için her materyal ve yöntem ayrı bir başlık altında verilmiştir.

3.1. Tier 1 yöntemine ilişkin materyaller

3.1.1. Araştırmanın tipi ve özellikleri

Afyon, Aydın, Denizli, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla ve Uşak gibi belirlenen şehirlerdeki kara yolu ulaşımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının belirlenmesi ve analizi kesitsel bir araştırmaya

dayanmaktadır. Bu analizde, Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından geliştirilen Tier 1 yöntemi kullanılarak, emisyon hesaplamaları excel tabanlı bir bilgisayar programında gerçekleştirilmiştir.

3.1.2 Veri toplama araçları ve zaman aralığı

Ege Bölgesi'nde bulunan sekiz şehrin (Afyon, Aydın, Denizli, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla ve Uşak) kara yolu ulaşımından kaynaklanan 2010 ve 2019 yıllarına ait sera gazı emisyon miktarlarının tespiti ve Tier 1 yöntemi ile hesaplanması için gerekli olan yakıt satış miktarları, kamuoyuna açık yıllık Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) raporlarından elde edilmiştir. Ayrıca, sekiz şehrin 2010 ve 2019 yıllarına ait araç sayıları, Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK) resmi yazışma ve ücret karşılığı e-devlet bilgi talep yönetim sistemi aracılığıyla elde edilmiştir.

3.1.3. Araştırmanın evren ve örnekleme

Araştırmanın evrenini İstatistik Bölge Birimleri Sınıflaması'na (İBBS) göre Çizelge 4'de gösterilen Ege Bölgesi'ndeki sekiz şehir oluşturmaktadır. İBBS'ye göre, iller Düzey-3 olarak tanımlanmaktadır. Coğrafi, ekonomik ve sosyal benzerlikler göz önünde bulundurularak komşu iller, bölgesel kalkınma planları ve nüfus büyüklükleri dikkate alınarak Düzey-1 ve Düzey-2 şeklinde gruplara ayrılmaktadır (4720 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı, 2002).

Çizelge 4. Ege Bölgesi'nin İBBS'na göre düzey kodları (Gökburun & Doğan, 2019)

Düzey-1		Düzey-2		Düzey-3	
Bölge Kodu	Bölge Adı	Bölge Kodu	Bölge Adı (Alt Bölge)	Bölge Kodu	Bölge Ad (İller)
TR3	Ege Bölgesi	TR31	İzmir alt bölgesi	TR310	İzmir
		TR32	Aydın alt bölgesi	TR321	Aydın
				TR322	Denizli
				TR323	Muğla
				TR331	Manisa
		TR33	Manisa alt bölgesi	TR332	Afyon
TR333	Kütahya				
				TR334	Uşak

Çalışmanın evrenini oluşturan sekiz şehrin 2020 yılı kişi başına düşen Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYH) oranları, yüz ölçümleri, 2021 yılı nüfusları, otomobil sayıları ve 2022 yılı toplam kara yolu uzunlukları Çizelge 5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. Ege Bölgesi'ndeki şehirlerin GSYH, yüz ölçümleri, toplam nüfus, toplam otomobil ve kara yolu uzunluğu (TÜİK, 2020; TÜİK, 2021a; TÜİK, 2021b; HGM, 2022; KGM, 2022)

İller	Kişi başına GSYH (\$)	Yüz Ölçümü (km ²)	Toplam Nüfus	Toplam Otomobil Sayısı	Devlet ve İl Yolu Uzunluğu (km)
İzmir	9.945	11.891	4.425.789	863.140	1.239
Aydın	5.991	8.116	1.134.031	196.909	688
Denizli	7.693	12.134	1.051.056	215.984	820
Muğla	8.228	12.654	1.021.141	227.427	964
Manisa	8.444	13.339	1.456.626	231.013	1.052
Afyon	5.958	14.016	744.179	94.132	1.025
Kütahya	6.798	11.634	578.640	110.302	946
Uşak	7.455	5.555	373.183	70.835	484

Çalışmada evrenin tamamına ulaşılması hedeflendiğinden dolayı, örneklem seçilmemiş, evrenin tamamı incelenmiştir.

3.1.4. Araştırmaya dahil edilme

İstatistiki Bölge Birimleri Sınıflaması (İBBS)'na göre, Ege Bölgesi'nde bulunan tüm şehirler (Afyon, Aydın, Denizli, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla, Uşak) çalışmaya dahil edilmiştir. Sekiz şehrin 2010 ve 2019 yıllarına ait sera gazı emisyonlarının tespiti için ise IPCC'nin belirlediği kara yolu taşımacılığına dair 1A3b kategorisi anahtar sektör olarak seçilmiş ve benzin, motorin, LPG gibi yakıt türleriyle çalışan araçlar analiz kapsamına alınmıştır (Çizelge 6).

Çizelge 6. Yaklaşım için önerilen toplam analiz düzeyi (IPCC, 2006a)

Anahtarda Değerlendirilecek Kaynak ve Kategori Analizi		Değerlendirilen Gazlar
Kategori Kodu	Kategori Başlığı	
Enerji 1A3b	Yakıt Yakma Faaliyetleri -Taşımacılık – Kara yolu taşımacılığı	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄

3.1.5. Bağımlı ve bağımsız değişkenleri

Çalışmanın bağımlı değişkeni; ulaşımdan kaynaklı sera gazı emisyonudur. Bağımsız değişkenleri ise; yıl, araç tipi, toplam araç sayısı, şehirlerin nüfusları, şehirlerin yüz ölçümü, yakıt satış miktarlarıdır.

3.2. Sistematik derleme yöntemine ilişkin materyaller

3.2.1. Araştırmanın tipi ve özellikleri

Ulaşımdan kaynaklanan emisyonların çevre ve insan sağlığına etkileri, sistematik literatür derlemesi yöntemiyle incelenmiştir.

3.2.2. Veri toplama araçları

Türkiye'de ulaşımdan kaynaklanan emisyonların çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini sistematik bir literatür taramasıyla ortaya koymak amacıyla gerekli akademik çalışmalar; Web of Science, Scopus, ScienceDirect, PubMed, Springer Link, TR Dizin ve DergiPark veritabanlarında "Turkey AND health AND (transport OR urban OR motor vehicle emissions OR air pollution)" anahtar kelimeleri kullanılarak toplanmıştır.

3.2.3. Araştırmaya dahil edilme

Sistematik derlemeye, Türkiye'de ulaşımdan kaynaklanan emisyonların çevre ve insan sağlığına etkisini inceleyen gözlemsel çalışmalar dahil edilmiştir. Ocak 2017 ve sonrasında yapılmış, Türkçe ve İngilizce olarak yayımlanan, tam metin olarak açık erişimde bulunan çalışmalar çalışmaya alınmıştır.

3.3. Veri analiz yöntemi

Çalışmada kullanılan Tier 1 yöntemi ile sistematik derleme yöntemi ayrı bir başlık altında verilmiştir.

3.3.1. Tier 1 analiz yöntemi

Şehirlerin sera gazı emisyon hesaplamaları için IPCC metodolojisi ve Tier yaklaşımları baz alınmıştır. IPCC Kılavuzları, ülkelerin sera gazı envanterlerini oluşturma ve raporlama süreçlerinde kullandıkları yöntemleri kapsamaktadır ve bu kılavuzlar, sözleşmeye taraf ülkelerin hedeflerine ulaşmalarına destek sağlamaktadır. Enerji, endüstri, tarım, orman kullanımı, atık yönetimi ve diğer alanlardaki sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında bu yöntemler kullanılmaktadır. IPCC, ulusal

envanterlerin oluşturulmasında kullanılmak üzere emisyon faktörleri sunmakta ve bu faktörlerin yerel koşullara uyarlanmasını tavsiye etmektedir (IPCC, 2006a; Çerçi, 2021).

IPCC TIER, sera gazı emisyonlarını tahmin etmek için geliştirilen bir sistemdir. Üç seviyeden oluşmaktadır. Seviye 1 en basit ve yaygın olanıdır, varsayılan emisyon faktörleri ve etkinlik verilerini kullanır. Seviye 2, ülkeye özgü verileri kullanırken, Seviye 3 daha ayrıntılı ve karmaşık modellerle çalışmaktadır. Bu sistem, ülkelerin Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne (UNFCCC) sera gazı emisyonlarını bildirmek için kullandığı bir standarttır (Cardinael ve ark., 2018; Iturbide ve ark., 2020). Tier 1 yöntemi, yanma emisyonlarını tahmin etmek için yakıt miktarları ve emisyon faktörlerini temel alır. Özellikle CO₂ gibi sera gazları için emisyon faktörleri genellikle yakıtın karbon içeriğine bağlıdır ve yanma koşullarının etkisi azdır. Bu nedenle, CO₂ emisyonlarının tahmini, yakılan yakıt miktarı ve yakıtların karbon içeriğine dayanarak oldukça doğru bir şekilde yapılabilmektedir (Çerçi, 2021).

IPCC Tier 1 yöntemi, öncelikle anahtar sektörün belirlenmesini ve o sektörde hangi gazların hesaplamaya dahil edileceğini istemektedir. Bu bağlamda, çalışmada kara yolu taşımacılığında kaynaklanan yakıt yakımı ele alınmış ve IPCC tarafından belirlenmiş olan Çizelge 6'daki 1A3b kategorisi anahtar sektör olarak seçilmiştir. Sonrasında, her bir kayıt türü olan benzin, dizel ve LPG'li araçlar için CO₂, CH₄ ve N₂O gazlarından kaynaklanan emisyonlar hesaplanmış ve değerler toplanmıştır. Elde edilen bu değerler, her yakıt türünün emisyon miktarını vermektedir. Tüm yakıt türlerine (benzin, dizel, LPG) ait emisyon verileri toplanarak, toplam emisyon miktarına ulaşılmaktadır (IPCC, 2006a). Bu itibarla, çalışmanın birinci basamağı için kullanılan Tier 1 yöntemi ile aşağıda belirtilen formüle göre Excel tabanlı program ile IPCC tarafından geliştirilen değerler baz alınarak aşağıdaki sırayla hesaplanmıştır (Dündar, 2021):

Enerji tüketim miktarına ulaşmak için, her bir yakıt türüne ilişkin tüketim miktarları, ilgili dönüşüm faktörüyle çarpılır:

$$\text{Enerji Tüketimi [TJ]} = \text{Yakıt Tüketimi [t]} \times 10^{-3} \times \text{Dönüşüm Faktörü} \left[\frac{\text{TJ}}{\text{kt}} \right] \quad (1)$$

Karbon içeriğini hesaplamak için, enerji tüketim miktarları, ilgili karbon emisyon faktörüyle çarpılır:

$$\text{Karbon İçeriği [Gg C]} = \text{Karbon Emisyon Faktörü} \left[\frac{\text{t-C}}{\text{TJ}} \right] \times \text{Enerji Tüketimi [TJ]} \times 10^{-3} \quad (2)$$

Karbon emisyon miktarını hesaplamak için, karbon içeriği CO₂ için ilgili oksitlenme oranı, CH₄ ve N₂O için küresel ısınma katsayısıyla çarpılır:

$$\text{Karbon Emisyonu [Gg C]} = \text{Karbon İçeriği [Gg C]} \times \text{Oksitlenme Oranı (Küresel Isınma Kat Sayısı)} \quad (3)$$

Sera gazı emisyon miktarını CO₂e. cinsinden hesaplamak için, hesaplanan karbon emisyon miktarı karbondioksit ile karbonun molekül ağırlığı oranı çarpılır:

$$\text{Sera Gazı Emisyonu [Gg CO}_2\text{e.]} = \text{Karbon Emisyonu [Gg C]} \times \text{Molekül Ağırlığı Oranı} \quad (4)$$

Çizelge 7. Tier 1 yönteminde kullanılan değerler (IPCC, 2006b; IPCC, 2023)

Yakıt	Dönüşüm Faktörü	Karbon Emisyon Faktörü (kg/TJ)		Oksitlenme Oranı		Küresel Isınma Kat Sayısı		Molekül Ağırlığı Oranı
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Benzin	44.3	18.9	33	3.2	0.99	28	265	44/12
Motorin	43.0	20.2	3.9	3.9	0.99	28	265	44/12
LPG	47.3	17.2	62	0.2	0.95	28	265	44/12

Yukarıda anlatılan Tier 1 hesaplamasında, her bir yakıt türü (benzin, motorin, LPG) için her bir gazdan (CO₂, CH₄, N₂O) kaynaklanan emisyonlar ayrı ayrı hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar toplanmak suretiyle toplam sera gazı emisyon miktarı elde edilmiştir. Bu surette tüm şehirlerin dokuz yıllık sera gazı emisyon miktarlarında gerçekleşen değişimler elde edilmiştir.

3.3.2. Sistematik derleme yöntemi

Çalışmada, ulaşımdan kaynaklanan emisyonların çevre ve insan sağlığına etkisinin sistematik literatür derlemesi ile ortaya konması, sistematik derleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sistematik derleme, alanlarında uzman kişiler tarafından gerçekleştirilen benzer yöntemlerle yapılmış bir dizi araştırmanın yapılandırılmış ve ayrıntılı bir incelemesi olarak tanımlanmaktadır. Sistematik derleme, belirli bir klinik soruya cevap veya bir soruna çözüm üretmek için tüm çalışmaların detaylı bir şekilde tarandığı ve derlemeye alınacak çalışmaların belirlendiği, araştırmaların kalitesinin değerlendirildiği bir yöntemdir (Karaçam, 2013).

Sistematik derleme çalışmanın yürütülmesinde PRISMA Bildirimi (PRISMA Statement–Sistematik Derleme ya da Meta-analiz Araştırma Raporunun Yazımında Bulunması Gereken Maddelerle İlgili Kontrol Listesi baz alınmıştır (Moher ve ark., 2009). Sistematik bir derleme hazırlamak için yedi aşamalı bir süreç izlenir. Bu aşamalar; işin tanımlanması, bilgi taraması, kanıtın değerlendirilmesi ve analizi, veri çekme ve analiz, sonuçların sunumu, sonuçların yorumlanması ve raporlama ile yayınlama aşamalarıdır. Bu adımlar, sistematik bir derlemenin güvenilirliğini ve doğruluğunu artırmaya yardımcı olmaktadır (Karaçam, 2013).

Bu çalışmada, sistematik derleme yöntemi yedi aşamalı bir sürece göre yürütülmüştür. Bu aşamalar şunlardır:

1. Uygunluk Kriterleri,
2. Tarama Stratejisi,
3. Çalışmaların Seçimi,
4. Çalışmaların Metodolojik Kalitesinin Değerlendirilmesi,
5. Verilerin Çekilmesi,
6. Pilot Çalışma,
7. İstatistiksel Değerlendirme

Çalışma için, sistematik derleme kapsamında uygun olan çalışmalar, aşağıdaki kriterlere (PICOS) göre belirlenmiştir:

- **Çalışma grubu (P: Patient):** Çevre ve insanlar
- **Müdahale (I: Intervention):** Kara yolu ulaşımdan kaynaklanan emisyonlar
- **Karşılaştırma (C: Comparison):** -
- **Sonuçlar (O: Outcomes):** Sağlık sonuçları (solunum sistemi, kalp damar hastalıkları, astım, akciğer kanseri vb.); Çevre sonuçları (iklim değişikliği, hava kalitesi, biyoçeşitlilik ve bitki örtüsüne ilişkin sonuçlar)
- **Çalışma deseni (S: Study design):** Türkiye'de ulaşım kaynaklı emisyonların çevre ve insan sağlığına etkisini rapor eden gözlemsel çalışmalar, Ocak 2017 ve sonrasında Türkçe ve İngilizce dillerinde yayınlanmış olanlar. Bu dışında kalan ve ücretsiz tam metin erişimi olmayan çalışmalar analizin dışındadır.

Sistematik derleme için çalışmaların seçiminde, başlık, özet ve tam metinler kullanılarak tekrarlayan çalışmalar elemeye temel alınmıştır. Çalışmaların belirlenmesi ve seçimi, iki bağımsız araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiş ve herhangi bir tutarsızlık durumunda tartışma yapılarak uzlaş sağlanmıştır. Taranan çalışmaların sayısı, uygun olanlar, derleme dahil edilenler, dışlananlar ve dışlama nedenleri, oluşturulan PRISMA akış şemasıyla gösterilmiştir (Kurnaz & Karaçam, 2022).

Derlemeye çalışmasına dahil olan çalışmaların metodolojik kalitesinin değerlendirilmesinde, Joanna Briggs Institute (JBI) tarafından geliştirilmiş olan "kritik değerlendirme kontrol listeleri" kullanılmıştır (Munn ve ark., 2014). Kontrol listeleri, yarı deneysel çalışmalar için 9, deneysel çalışmalar için 13 ve kesitsel çalışmalar için 8 soru içermektedir. Sorular, "Evet", "Hayır", "Belirsiz" ve "Uygulanmaz" seçenekleriyle yanıtlanır. Araştırmaların metodolojik kalitesi, kontrol listesindeki maddelerin %50'sinden azının "Evet" olarak değerlendirilmesi durumunda "vasat", %51-80 arasında "Evet" olarak değerlendirilmesi durumunda "orta kalite" ve %80'den fazlasının "Evet" olarak

değerlendirilmesi durumunda "iyi kalite" olarak sınıflandırılır. Bu kriterler, araştırmaların metodolojik güvenilirliğini değerlendirmek için belirlenmiştir ve elde edilen sonuçların güvenilirliği ve geçerliliği açısından önemli bir ölçüt oluşturmaktadır (Kurnaz & Karaçam, 2022).

Araştırma verilerini toplamak için JBI tarafından geliştirilen, gerektiğinde uygun değişikliklerin yapılabileceği bir veri çekme aracı kullanılmıştır. Bu araçla, sistematik derlemeye dahil edilen araştırmaların yapıldığı yer ve yıl, yazar, kullanılan yöntem, veri kaynağı, örneklem hacmi, ülke, başlıca bulgular ve diğer ilgili veriler elde edilmiştir. Veri çekme işlemi öncesinde, derlemeye dahil edilen beş araştırma ile her iki araştırmacının katıldığı bir pilot çalışma yapılmış ve araştırmacılar arasındaki görüş farklılıkları giderilmiştir. Ayrıca, olası hatalardan kaçınmak için aşamalar her iki araştırmacı tarafından bağımsız olarak yürütülmüş ve çalışmalar, ortak oturumlar kapsamında birleştirilmiştir.

4. Bulgular

Bu çalışmada, iki farklı yöntem kullanıldığı için her bir yönteme ilişkin bulgular ayrı bir başlık altında verilmiştir.

4.1. Tier 1 yöntemine ilişkin bulgular

4.1.1. Şehirlerin nüfus, toplam araç sayıları ve yüz ölçümü verileri

Araştırmada şehirlerdeki kişi başı, araç başı ve km²'ye düşen sera gazı emisyon miktarlarını hesaplamak için 2010-2019 dönemine ait nüfus sayıları, toplam kara yolu araç sayıları ve şehirlerin yüz ölçümleri kullanılmıştır. Bu veriler, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) ve Harita Genel Müdürlüğü (HGM) raporlarından elde edilmiştir (Çizelge 8).

Çizelge 8. 2010 ve 2019 yıllarında Ege Bölgesi'ndeki şehirlerin nüfus, toplam araç sayıları ve yüz ölçümleri (TÜİK, 2022; HGM, 2022)

İller	2010		2019		Yüz Ölçümleri (km ²)
	Nüfus Sayıları	Toplam Araç Sayısı	Araç Nüfus Sayıları	Toplam Araç Sayısı	
Afyon	697.559	152.017	729.483	223.265	14.016
Aydın	989.862	289.388	1.110.972	456.056	8.116
Denizli	931.823	268.415	1.037.208	410.598	12.134
İzmir	3.948.848	971.366	4.367.251	1.425.302	11.891
Kütahya	590.496	149.041	579.257	210.652	11.634
Manisa	1.379.484	405.385	1.440.611	590.671	13.339
Muğla	817.503	318.739	983.142	506.829	12.654
Uşak	338.019	90.366	370.509	137.574	5.555

2010 ile 2019 yılları arasında Ege Bölgesi'ndeki sekiz şehirde nüfus değişiminde dikkate değer oranda farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu dönemde en yüksek oransal artışı Muğla (%20.26), ardından Aydın (%12.23) ve Denizli (%11.32) illeri yaşamıştır. Diğer yandan, Kütahya ilinde nüfusun azaldığı tek il olmuştur. 2010 ile 2019 yılları arasında Ege Bölgesi'ndeki sekiz şehirdeki toplam araç sayısında önemli oranda artışlar kaydedilmiştir. Bu dönemde en yüksek oransal artışı Muğla (%58.89), ardından Aydın (%57.58) ve Denizli (%53.11) illeri göstermiştir. Buna karşılık, Kütahya ilinde ise araç sayısındaki artış oranı %41.42 ile en düşük seviyede kalmıştır. Şehirlerin yüz ölçümleri dikkate alındığında, en büyük yüz ölçümüne sahip iller sırasıyla Afyon, Manisa ve Muğla olarak belirlenirken, en küçük yüz ölçümüne sahip iller ise Uşak, Aydın ve Kütahya olarak tespit edilmiştir (Özdemir, 2024).

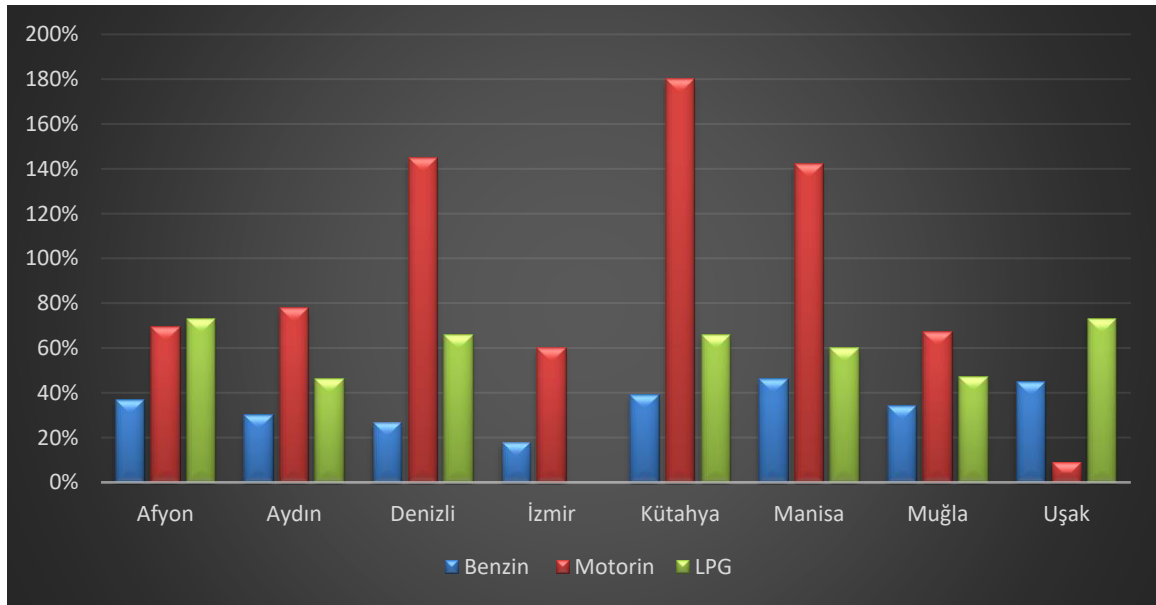
Şehirlerin 2010-2019 tarih aralığına ait benzin, dizel, LPG'li araçların yakıt satış miktarları, EPDK raporlarında yer alan satış verileri esas alınarak hesaplanmaları yapılmıştır (Çizelge 9).

2010 yılında Ege Bölgesi'nde en fazla benzin tüketimi İzmir, Muğla ve Aydın'da, en az tüketim ise Uşak, Kütahya ve Afyon'da gerçekleşmiştir. 2019'da benzin tüketimindeki lider şehirler İzmir, Muğla ve Manisa olmuştur. Bu dönemde en fazla oransal artış %46 ile Manisa'da gözlemlenmiştir. Motorin satışında 2010'da İzmir, Muğla ve Manisa öne çıkarken, 2019'da İzmir, Denizli ve Manisa lider konumunda bulunmaktadır. Kütahya, motorin tüketimindeki %181'lik artış ile en dikkat çeken şehirdir. LPG satışlarında 2010'da İzmir, Manisa ve Muğla öncü iken, 2019'da İzmir, Manisa ve Denizli en çok

LPG tüketen illerdir. Uşak, LPG tüketimindeki %73'lük artış ile öne çıkmaktadır. İzmir ise bu dönemde LPG tüketiminde azalan tek il olmuştur (Şekil 3).

Çizelge 9. 2010-2019 yıllarındaki yakıt satış verileri (ton) (EPDK, 2022)

İller	2010			2019		
	Benzin	Motorin	LPG	Benzin	Motorin	LPG
Afyon	14.442	132.121	30.288	19.890	223.549	48.620
Aydın	33.090	179.981	39.170	43.045	320.479	57.267
Denizli	24.465	215.009	39.472	31.028	528.109	65.559
İzmir	125.914	747.277	161.193	148.594	1.195.789	160.283
Kütahya	10.604	94.639	23.290	14.701	265.553	38.603
Manisa	30.141	215.381	53.703	44.033	521.812	85.768
Muğla	49.772	221.519	40.658	66.753	369.512	59.880
Uşak	6.976	74.555	13.680	10.085	81.233	23.690



Şekil 3. 2010-2019 yılları yakıt satışı yüzdesel değişim oranları.

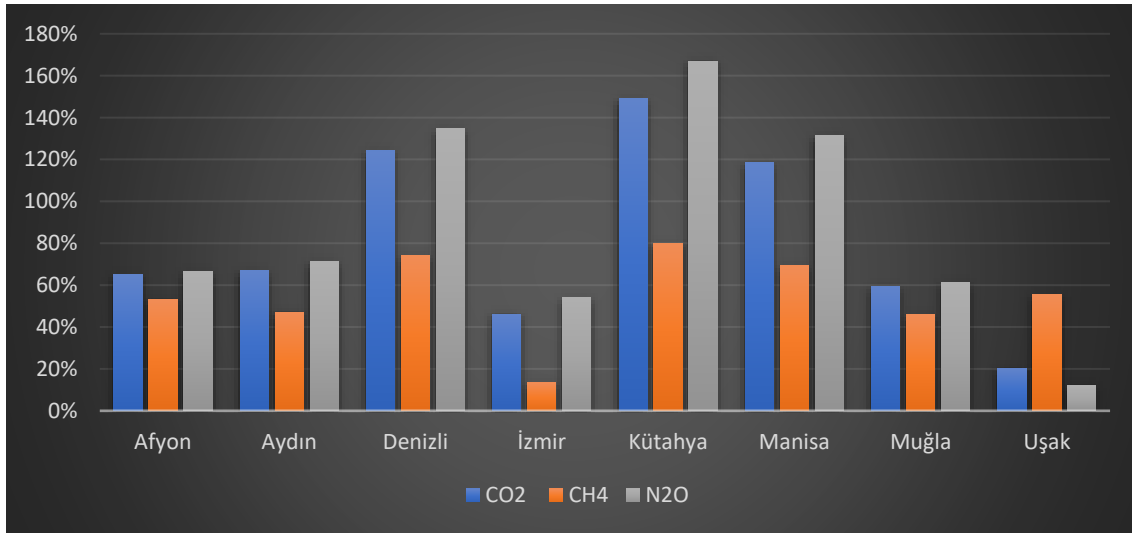
4.1.2. Şehirlerin sera gazı emisyon verileri

Tier 1 yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda, Ege Bölgesi'ndeki sekiz şehrin 2010-2019 dönemine ilişkin sera gazı emisyon miktarları, Çizelge 10'da gösterilmiştir (Özdemir, 2024).

Çizelge 10. 2010-2019 yıllarındaki sera gazı emisyon miktarları (Gg CO₂e.)

İller	2010				2019			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Toplam	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Toplam
Afyon	554.08	3.70	6.49	564.27	915.74	5.86	10.80	932.40
Aydın	789.83	5.42	9.34	804.59	1320.55	7.97	16.00	1344.52
Denizli	875.51	5.25	10.57	891.33	1967.91	9.13	24.80	2001.85
İzmir	3239.81	21.90	38.34	3300.06	4731.84	24.86	59.13	4815.82
Kütahya	402.42	2.79	4.66	409.88	1003.51	5.02	12.45	1020.98
Manisa	936.38	6.65	10.84	953.88	2047.87	11.30	25.06	2084.23
Muğla	977.50	6.42	11.82	995.73	1556.96	9.38	19.08	1585.42
Uşak	298.93	1.76	3.61	304.30	359.42	2.74	4.05	366.21
				8.224.04				14.151.43

2010'da, Ege Bölgesi'nde en yüksek sera gazı emisyonları İzmir, Muğla ve Manisa'da kaydedilmiştir, toplam emisyon miktarı 5249.67 Gg CO₂e olarak belirlenmiştir. En düşük emisyonlar ise Uşak, Kütahya ve Afyon'da görülmüştür. 2019'da ise en fazla sera gazı emisyonları İzmir, Manisa ve Denizli'de gerçekleşmiştir ve bu şehirlerdeki toplam emisyon 8901.9 Gg CO₂e olarak ölçülmüştür. Uşak, Afyon ve Kütahya'da ise en düşük emisyon miktarlarına sahiptir. 2010 ile 2019 arasında, Kütahya'da CO₂ miktarlarında %149.21 ile en yüksek artış görülürken, Uşak'ta %20.24 ile en düşük artış gerçekleşmiştir. Metan (CH₄) emisyon artış oranı en yüksek Kütahya'da (%79.93) iken, en düşük oran İzmir'de (%13.51) saptanmıştır. Azot oksit (N₂O) emisyon artış oranında en yüksek artış Kütahya'da (%167.17) olurken, en düşük değişim oranı Uşak'ta (%12.19) gözlemlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. 2010-2019 yılları sera gazı emisyon miktarları yüzdesel değişim oranları.

4.1.3. Şehirlerin yakıt cinsine göre sera gazı emisyon verileri

Ege Bölgesi'ndeki sekiz şehirde (Afyon, Aydın, Denizli, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla ve Uşak), 2010 ve 2019 yıllarına ait kara yolu ulaşımından kaynaklanan araçların yakıt cinslerine göre, benzin, dizel ve LPG'li araçlardan kaynaklanan sera gazı emisyon miktarı belirlenmiştir (Çizelge 11).

Çizelge 11. 2010-2019 yıllarında benzin, dizel, LPG'li araçlardan kaynaklanan sera gazı emisyon miktarları (Gg CO₂e.)

İller	2010				2019			
	Benzin	Dizel	LPG	Toplam	Benzin	Dizel	LPG	Toplam
Afyon	45.52	426.27	92.48	564.27	62.70	721.25	148.46	932.40
Aydın	104.30	580.68	119.60	804.59	135.68	1.033.98	174.86	1.344.52
Denizli	77.12	693.69	120.52	891.33	97.80	1.703.87	200.18	2.001.85
İzmir	396.89	2.410.98	492.18	3.300.06	468.38	3.858.04	489.41	4.815.82
Kütahya	33.42	305.34	71.11	409.88	46.34	856.77	117.87	1.020.98
Manisa	95.01	694.89	163.98	953.88	138.80	1.683.55	261.88	2.084.23
Muğla	156.89	714.70	124.14	995.73	210.41	1.192.18	182.84	1.585.42
Uşak	21.99	240.54	41.77	304.30	31.79	262.09	72.33	366.21
				8.224.04				14.151.43

2010 yılında, en yüksek benzinli araçlardan kaynaklanan sera gazı emisyonunun İzmir, Muğla ve Aydın'da gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu şehirlerdeki toplam benzinli araç kaynaklı emisyon miktarı 658.08 Gg CO₂e'dir. En az benzinli araç kaynaklı emisyon miktarı ise sırasıyla Uşak, Kütahya ve Afyon'da gerçekleşmiştir. 2010 yılında, en yüksek dizel araçlardan kaynaklanan sera gazı emisyonunun İzmir, Muğla ve Manisa'da gerçekleştiği saptanmıştır. Bu şehirlerdeki toplam dizel araç kaynaklı emisyon miktarı 3820.57 Gg CO₂e'dir. En az dizel kaynaklı emisyon miktarı ise sırasıyla Uşak, Kütahya

ve Afyon'da gerçekleşmiştir. 2010 yılında, en yüksek LPG'li araçlardan kaynaklanan sera gazı emisyonunun sırasıyla İzmir, Manisa ve Muğla'da gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu şehirlerdeki toplam LPG'li araç kaynaklı emisyon miktarı 780.3 Gg CO₂'dir. En az LPG kaynaklı emisyon miktarı ise sırasıyla Uşak, Kütahya ve Afyon'da belirlenmiştir. 2019 yılında, en yüksek benzinli araçlardan kaynaklanan sera gazı emisyonunun sırasıyla İzmir, Muğla ve Manisa'da gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu şehirlerdeki toplam benzinli araç kaynaklı emisyon miktarı 817.59 Gg CO₂'dir. En az benzinli araç kaynaklı emisyon miktarı ise sırasıyla Uşak, Kütahya ve Afyon'da gerçekleşmiştir. 2019 yılında, en yüksek dizel araçlardan kaynaklanan sera gazı emisyonunun sırasıyla İzmir, Denizli ve Manisa'da gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu şehirlerdeki toplam dizel araç kaynaklı emisyon miktarı 7245.46 Gg CO₂'dir. En az dizel kaynaklı emisyon miktarı ise sırasıyla Uşak, Afyon ve Kütahya'da belirlenmiştir. 2019 yılında, LPG'li araçlardan kaynaklanan sera gazı emisyonunun en fazla İzmir, Manisa ve Denizli'de gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu şehirlerdeki toplam LPG'li araç kaynaklı emisyon miktarı 951.47 Gg CO₂'dir. En az LPG kaynaklı emisyon miktarı ise sırasıyla Uşak, Kütahya ve Afyon'da gerçekleşmiştir. Öne çıkan trendler arasında, 2010-2019 döneminde benzinli, dizel ve LPG'li araçlardan kaynaklanan emisyonlarda genel bir artışın yanı sıra, Uşak'ın düşük emisyon seviyeleri ve Kütahya'nın yüksek oranlı artışları dikkat çekmektedir.

4.1.4. Şehirlerde kişi başına, araç başına ve km²'ye düşen sera gazı emisyon verileri

İncelenen şehirlerde 2010 ve 2019 yıllarında kişi başı, araç başı ve km² başına düşen sera gazı emisyon miktarları belirlenmiştir (Çizelge 12).

Çizelge 12. 2010-2019 yıllarında kişi başı, araç başı ve km²'ye düşen sera gazı emisyon miktarları (Gg CO₂e.)

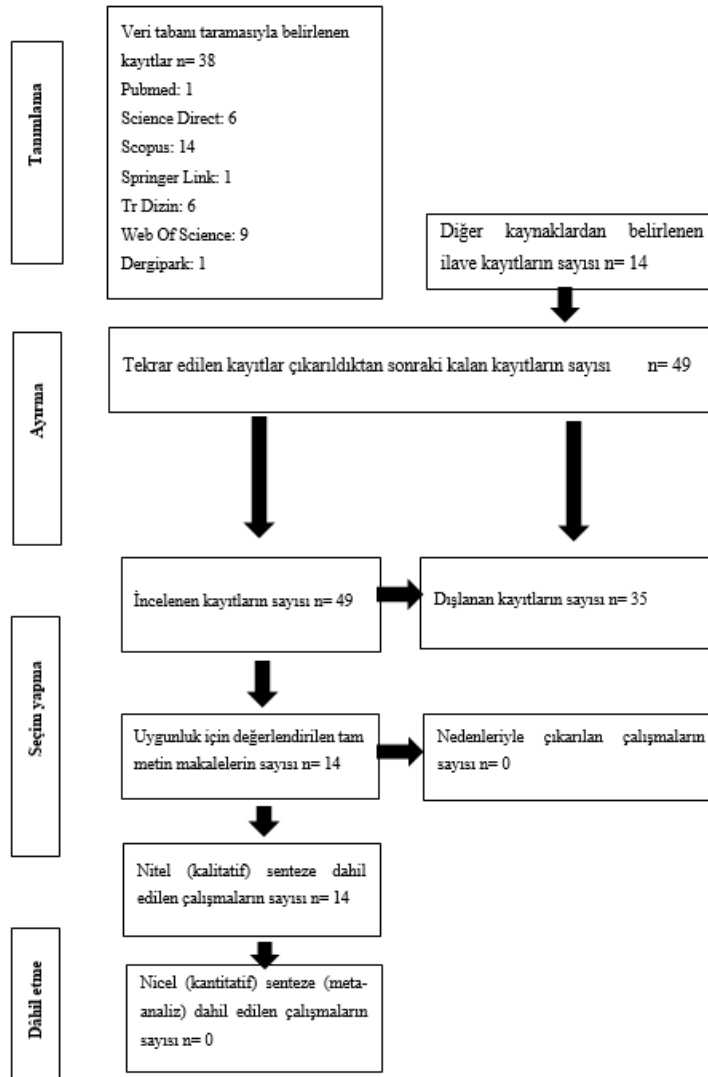
İller	Kişi Başına Düşen x10-4			Araç Başına Düşen x10-4			Km ² 'ye Düşen x10-4		
	2010	2019	Değişim%	2010	2019	Değişim%	2010	2019	Değişim%
Afyon	0.8	1.27	57.99	3.71	4.17	12.44	40.24	66.52	65.26
Aydın	0.81	1.21	49.26	2.78	2.95	6.12	98.93	165.61	67.34
Denizli	0.95	1.93	102.93	3.32	4.87	46.69	73.47	164.96	124.80
İzmir	0.83	1.1	31.80	3.4	3.38	-0.59	277.59	404.91	46.00
Kütahya	0.69	1.76	153.88	2.75	4.84	76	35.23	87.68	148.32
Manisa	0.69	1.44	109.02	2.35	3.53	50.21	71.46	156.38	118.65
Muğla	1.21	1.61	32.58	3.12	3.13	0.32	78.71	125.28	59.12
Uşak	0.9	0.98	9.89	3.37	2.66	-21.04	54.75	65.9	20.38
Ortalama	0.82	1.26	68.42	3.04	3.62	19.08	75.81	150.23	79.72

2010 ile 2019 yılları arasında, kişi başına düşen emisyon miktarının Kütahya'da %153,88, Manisa'da %109,02, Denizli'de %102,93, Afyon'da %57,99, Aydın'da %49,26, Muğla'da %32,58, İzmir'de %31,80 ve Uşak'ta %9,89 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bu dönemde en yüksek artış oranının %153,88 ile Kütahya'da, en düşük artış oranının ise %9,89 ile Uşak'ta olduğu belirlenmiştir. 2010 ile 2019 yılları arasında araç başına düşen sera gazı emisyon miktarlarındaki değişimin oranları incelendiğinde, altı şehirde artış ve iki şehirde azalış yaşandığı görülmüştür. Artış yaşanan iller sırasıyla Kütahya (%76), Manisa (%50.21), Denizli (%46.69), Afyon (%12.44), Aydın (%6.12) ve Muğla (%0.32) olarak belirlenmiştir. Azalış yaşanan şehirler ise İzmir (%-0.59) ve Uşak (%-21.04) olarak tespit edilmiştir. Bu dönemde en fazla artış oranı %76 ile Kütahya'da, en fazla azalış oranı ise %-21.04 ile Uşak'ta gerçekleşmiştir. 2010 ile 2019 yılları arasında kilometrekare başına düşen emisyon miktarının artış oranları incelendiğinde, Kütahya'da %148.32, Denizli'de %124.80, Manisa'da %118.65, Aydın'da %67.34, Afyon'da %65.26, Muğla'da %59.12, İzmir'de %46.00 ve Uşak'ta %20.38 oranında bir artış olduğu belirlenmiştir. Bu dönemde en fazla değişim oranı %148.32 ile Kütahya'da, en az değişim ise %20.38 ile Uşak'ta yaşanmıştır.

4.2. Sistematik derleme yöntemine ilişkin bulgular

4.2.1. Tarama bulguları

Türkiye'de ulaşım kaynaklı emisyonların çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini inceleyen araştırmalar, PICOS (Hasta (P: Patient), Müdahale (I: Intervention), Karşılaştırma (C: Comparison), Sonuçlar (O: Outcomes) ve Çalışma tasarımı) kriterlerine uygun olarak sistematik derleme için belirlenmiştir. Tarama sürecinde tekrar eden çalışmalar elemine edilmiş, başlık, özet ve tam metin incelemeleri sonucunda 49 çalışma seçilmiştir. Bu çalışmaların tam metinleri, dahil edilme kriterlerine göre değerlendirilmiş, 35 çalışma dışlanmış ve 14 çalışma nitel sentez için uygun bulunmuştur. Seçilen çalışmaların sayısı ve dışlananlar, PRISMA akış şemasında gösterilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. PRISMA akış şeması.

4.2.2. Veri çekme bulguları

Sistematik derlemeye uygun olan 14 çalışma belirlenmiştir. Bu çalışmaların araştırma bulgularını elde etmek için, Joanna Briggs Institute (JBI) tarafından geliştirilen ve çalışmalara özgü olarak değiştirilen bir veri çekme aracı kullanılmıştır. Bu veri çekme aracı ile, sistematik derlemeye dahil edilen 14 araştırmanın yapıldığı yer ve yılı, yazarlar, yer özellikleri, araştırmanın tasarımı ve örneklem sayısı, ölçüm araçları, araştırmanın uygulanma süreci ve bulgularına ilişkin veriler elde edilmiştir (Çizelge 13).

Çizelge 13. Çalışmaların özellikleri ve başlıca verileri

Yazarlar ve Yıl / Şehir	Yer özelliği	Araştırmanın Tasarım Tipi ve Örneklem Sayısı	Ölçmede Kullanılan Araçlar	Araştırmanın Uygulanma Süreci	Bulgular
Yakın & Behçet, 2019 / Van	Organize Sanayi Bölgesi Bölge Araştırma Hastanesi (Edremit Havaalanı Ayrımı)	20.921 adet motorlu taşıt 20.857 adet motorlu taşıt	Kirletici Emisyon Envanteri Rehberi (Pollutant Emission Inventory Guidebook)	Araştırmada, ana caddelerde yapılan taşıt sayımları temel alınarak emisyon hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Emisyon seviyeleri, her bir taşıtın tasarımına ve kullanılan yakıt türüne bağlı olarak günlük olarak hesaplanmıştır.	Emisyon Miktarları (kg/gün), Organize Sanayi Bölgesi CO: 1113.99 NOx: 237.28 PM: 27.11 VOC: 178.05 Emisyon Miktarları (kg/gün), Bölge Araştırma Hastanesi CO: 1312.22 NOx: 217, 54 PM: 16.82 VOC: 207.81
Sonuç ve Değerlendirme			Van ilindeki etkili emisyon miktarları belirlenmiştir. Toplam emisyon miktarları içerisindeki CO emisyonlarının payının yaklaşık 442.78 ton/yıl, NOx emisyonlarının payının 83.01 ton/yıl, PM emisyonlarının payının 8.01 ton/yıl ve VOC emisyonlarının payının 70.41 ton/yıl olduğu tespit edilmiştir. Emisyon azaltma yöntemleri, toplu taşıma kullanımı ve güneş enerjisiyle çalışan, hibrit ve elektrikli araçların kullanımı önerilmiştir.		
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri			Önlemler alınmazsa, ildeki kirliliğin yaşamı ve insan sağlığını olumsuz etkileyeceğinin altı çizilmiştir.		
Tezel ve ark., 2019 / Trabzon	Yoğun trafik bölgesinde bulunması nedeniyle il sınırlarındaki 12 farklı bölge	Trabzon'da 12 farklı kara yolunda ölçümler gerçekleştirilmiştir	Trafik kaynaklı emisyon miktarını belirlemek için AERMOD modelleme sistemiyle birlikte ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir.	Araştırmada trafik kaynaklı emisyonların ölçümünde çalışma alanlarında (53 km uzunluğundaki 12 farklı yolda) günün üç farklı bölümünde (gündüz, akşam ve gece saatlerinde) ölçümler gerçekleştirilmiştir.	12 farklı ölçüm sahasındaki NOx verileri: (g/h). Sehit Refik Cesur:1472 Kahramanmaraş:2135 Hasan Saka:145 Yavuz Selim:7954 Gazipaşa:312 Senol Güneş:6947 Taksim:4103 Sahilyolu:7479 Inonu:2845 010-21 6.Bölge:23576 010-22 1.Bölge:20463
Sonuç ve Değerlendirme			Trabzon ilinin en yoğun nüfusa sahip bölgelerinde yapılan araştırma sonucuna göre nüfusun %21'i trafik kaynaklı hava kirliliğine ve gürültüye sınır değerlerin üstünde maruz kalmaktadır. Bu maruziyet bölgesinde 29 okul ve 19 sağlık binası yer almıştır.		
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri			Trabzon ilinde trafik kaynaklı emisyonlara yüksek düzeyde maruz kalan bölgeler tespit edilmiş, kirleticilerin hipertansiyon, kardiyovasküler hastalıklar ve ölüme sebebiyet vermesi nedeniyle insan sağlığı üzerindeki etkileri vurgulanmıştır.		

Yazarlar ve Yıl / Şehir	Yer özelliği	Araştırmanın Tasarım Tipi ve Örneklem Sayısı	Ölçmede Kullanılan Araçlar	Araştırmanın Uygulanma Süreci	Bulgular
Çetin & Ergüder, 2020 / Erzincan	İl merkezi	Erzincan Trafik Bölge Müdürlüğü'nden alınan bilgilerle elde edilmiştir. Anketlerle farklı sınıflara ait 947 araca ulaşıldı ve bu araçların üretim yılları, boyutları, Emisyon Standartları, kullanılan yakıt türü, kullanım segmenti gibi özellikleri tespit edilmiştir.	Çalışmada, sadece egzoz emisyonları değil, aynı zamanda COPERT 5 programının yardımıyla CORINAIR metodolojisi kullanılarak yakıt tankından, motor ve yakıt sistemlerinden kaynaklanan buharlaşma emisyonları da hesaba katılmıştır.	Anketlerle ulaşılan araçlar, kullanım amaçlarına, segmentlerine, üretim yıllarına ve yakıt türlerine göre sınıflandırılmıştır. Hesaplamalarda kullanılmak üzere, ulaşılan araçların yıllık, aylık ve günlük ortalama mesafeleri, ortalama hızları ve ortalama yakıt tüketimleri belirlenmiştir. Toplam araç sayısına göre, her araç segmenti için egzoz emisyon faktörleri, CORINAIR ve Euro emisyon standartları temel alınarak, araç hızı, kat edilen mesafe, yakıt tüketim miktarları, teorik olarak COPERT 5 programının yardımıyla hesaplanmıştır.	Erzincan şehir merkezi için toplam NOx emisyon miktarı yaklaşık olarak 6,519 ton/yıl olarak hesaplanmıştır. Özellikle dizel yakıtın yakılmasıyla atmosfere salınan emisyonlar, hafif ticari araçlar için yaklaşık 3,963 ton/yıl ve dizel otomobiller için 992 ton/yıl olarak hesaplanmıştır. Otobüsler için toplam miktar yaklaşık olarak 848 ton/yıl olarak belirlenmiştir.
Sonuç ve Değerlendirme			Erzincan ilinde motorlu taşıtlardan kaynaklı hava kirliliğinin hesaplanması sonucu toplu taşımının yaygınlaştırılması, trafik akışının dur kalk yapmayı engelleyecek şekilde düzenlenmesi, araç bakımlarının zamanında yaptırılması, yeşil alanların artırılması, bisiklet kullanımının teşvik edilmesi ve en önemli olarak çevre bilinç düzeyinin şehirde geliştirilmesi önerilmiştir.		
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri			Çalışmada insan sağlığı açısından hava kirliliğinin mukoza zarı üzerindeki olumsuz etkilerinden bahsedilmiş ve hava kirliliğini azaltıcı öneriler sunulmuştur. Ayrıca bitkiler üzerindeki olumsuz etkileri açısından azot oksitlerin asit yağmurlarına ve fotokimyasal sise neden olacağı vurgulanmış, bilinç düzeyinin artırılması gerektiği önerisi getirilmiştir.		
Demirel & Ateş, 2018 /Sakarya	Sapanca Gölü çevresindeki trafiğe yönelik, E-80 Tem Anadolu Otoyolu ile D-100 kara yolu sınırları içinde gerçekleştirilmiştir.	Sapanca Gölü çevresindeki E-80 otoyolu ve D100 kara yolu bölgelerindeki, kara yolu trafiğinden kaynaklanan hava kirleticileri hava kirleticileri belirlendi ve bir emisyon envanteri hazırlanmıştır. Emisyon envanteri oluşturulurken, E-80 otoyoluyla paralel olan Sapanca-İzmit yolunun da hesaplamalara dahil edilmiştir.	Sapanca Gölü çevresindeki D-100 ve E-80 yollarının uzunlukları Google Earth kullanılarak belirlenmiştir. Her araç sınıfı için emisyon faktörleri ve kilometre başına yakıt tüketimi, "EMEP/EEA Hava Kirleticisi Emisyon Envanteri Kılavuzu 2013"ten elde edilmiştir.	Çalışma kapsamında, Sapanca Gölü çevresindeki otoyollar üzerinde araç sayımları yapılmış ve farklı araç tipleri için saatlik trafik yoğunlukları belirlenmiştir. EMEP/EEA emisyon faktörleri kullanılarak trafik kaynaklı hava kirleticilerin (PM, NOx, CO, VOC) emisyon envanteri oluşturulmuş ve Marmara bölgesi için önemli bir su kaynağı olan Sapanca Gölü'nü etkileyebilecek emisyon miktarları belirlenmiştir.	Sapanca Gölü çevresindeki otoyolların oluşturduğu toplam emisyon yükleri, yılda 4353 ton CO emisyonu, 2121 ton NOx emisyonu, 747 ton NMVOC ve 122 ton PM emisyonudur. Sakarya'da yapılan önceki çalışmalarda saatlik bazda bir emisyon envanteri oluşturulmuş ve yıllık bazda bakıldığında, otoyoldan kaynaklanan CO emisyonunun yaklaşık 77 ton/yıl ve NOx'un ise 0.4 ton/yıl olduğu bulunmuştur.
Sonuç ve Değerlendirme			Araştırma sonuçlarına göre, bir hafta boyunca atmosfere salınan toplam emisyon miktarları şu şekildedir: PM için yaklaşık 2 ton, NOx için 41 ton, CO için 84 ton ve VOC için 14 ton. Uzun vadeli değerlendirmelerin sonucunda, motorlu araçların Sapanca Gölü ve besleyici akarsuları için önemli bir kirletici kaynak olduğu ve bu konuda tedbirler alınması gerektiği sonucuna erişilmiştir. Hava kirliliğine daha fazla neden olan araç sahiplerine yüksek vergiler getirme, yeşil alanları artırma ve gerekli araç denetimlerini gerçekleştirme gibi öneriler de sunulmuştur.		
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri			Çalışmada içme suyu kaynağı olan Sapanca gölünün kirliliğe maruz kalmasının insan sağlığı üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Havza içerisindeki bitkilerin kirlenmeyle zarar göreceği aktarılmıştır.		

Yazarlar ve Yıl / Şehir	Yer özelliği	Araştırmanın Tasarım Tipi ve Örneklem Sayısı	Ölçmede Kullanılan Araçlar	Araştırmanın Uygulanma Süreci	Bulgular
Kılıç, 2019 /Amasya	Kara yolunda trafik olan ve olmayan alanlardaki bitki örnekleri	Bitki örnekleme için 4 farklı alanda her alanda 5 tane olmak üzere 20 farklı ölçüm gerçekleştirilmiştir	Toplanan bitki örnekleri; kök ve gövde yapraklarında biriktirilen ağır metal miktarları, İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) ile belirlenmiştir.	Bu çalışmada, Amasya ilinde doğal olarak yetişen <i>Calepina irregularis</i> (Asso) Thell (Brassicaceae) türü incelenmiştir. Bu bitkinin (Ni, Fe, Co, Mn) ağır metal birikimi ve (Brassicaceae) familyasındaki bitkilerde bir biyo-izleyici olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Şehir bölgelerinde, karayollarında, banliyölerde ve trafiksiz alanlarda toplanan bitki örnekleri; köklerinde, gövdelerinde ve yapraklarında biriktirilen ağır metal miktarları, İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) ile belirlenmiş ve elde edilen veriler değerlendirilmiştir.	Trafikli alanlarda yetişen bitkilerin toplam kütledeki Ni, Fe, Co ve Mn değerleri sırasıyla 14,32-35,66 mg/kg, 827,61-2716,72 mg/kg, 12,52-16,51 mg/kg ve 175,93-826,75 mg/kg arasında değişmektedir. Bitkilerdeki element birikim miktarı Fe>Mn>Ni>Co olarak sıralanmıştır. Yol kenarında yetişen bitki örneklerinde Ni ve Mn elementleri yüksek düzeyde bulunurken, şehirde toplanan örneklerde Fe ve Co elementleri daha yüksek değerlere sahiptir. Yol kenarında yetişen bitkilerde ağır metal birikimi, yapraklarda ve köklerde daha yüksekken, banliyölerde yetişen bitkilerde gövdede daha fazla birikmiştir. Lokalitelerden alınan bitki ve toprak örnekleri arasındaki korelasyona göre, toprak ve bitki içerikleri arasındaki Fe ve Mn ilişkisi P<0.01 seviyesinde önemli olduğu anlaşılmıştır.
Sonuç ve Değerlendirme			Yol kenarında yetişen bitki örneklerinin yapraklarının, hava kirliliği kaynaklı olarak nikel (Ni) ve kobalt (Co) elementlerini aldığı, ancak demir (Fe) ve mangan (Mn) elementlerini daha çok kökleri aracılığıyla topraktan temin ettiğini gösteren bu çalışma, <i>C. irregularis</i> türünün geniş yayılış alanı, yoğun birey sayısı, standart analiz metodlarına uygunluğu nedeniyle kentsel alanlarda çevresel kirlilikteki kısa vadeli değişiklikleri izleme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, bu türün biyomonitör olarak kullanılabilirliği sonucuna ulaşılmıştır.		
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri			Kirliliğin tüm canlılar için ciddi sorunlara yol açabileceği, toprak kalitesinin ve biyolojik üretimin zarar göreceği vurgulanmıştır.		
Civelekoğlu & Bıyık, 2020 / Isparta	Isparta iline bağlı karayolları	Isparta'da 2010-2016 tarih aralığında kara yolu araçlarından kaynaklanan emisyonlar, karbon ayak izi bazında karakterize edilerek hesaplanmıştır.	Tier 1 ve Tier 2 hesaplama metodolojisi kullanılmıştır.	IPCC'nin emisyon hesaplamalarında önerdiği Tier yaklaşımlarını kullanarak, Isparta iline kayıtlı kara yolu araçlarının 2010 ile 2016 yılları arasındaki karbon ayak izi hesaplamaları, Tier 1 ve Tier 2 hesaplama metodolojisi ile yapılmıştır.	Tier 1 yöntemiyle hesaplandığında, 2010 ile 2016 arasında %34'lük bir artış gösterdi. Tier 2 yöntemiyle hesaplandığında ise 2010 ile 2016 arasında kara yolu taşımacılığı kaynaklı karbon ayak izi hesaplaması %43 artış göstermiştir.
Sonuç ve Değerlendirme			2010 yılında Tier 1 yöntemiyle hesaplanan kara yolu ulaşımının neden olduğu karbon ayak izi miktarı 351, 90 Gg olarak belirlenmiş ve bu miktar, 2016 yılında %34'lük bir artışla 471. 84 Gg'a yükselmiştir. Aynı şekilde, Tier yöntemi ile hesaplanan kara yolu ulaşımının karbon ayak izi, 2010'da 1605 Gg iken, 2016'da %43 artışla 2292 Gg'ye yükselmiştir.		
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri			Motor teknolojilerinin yenilenmesi, trafik akışının düzenlenmesi, bisiklet ve yürüyüş yollarının açılması gibi öneriler araştırmada aktarılmıştır.		

Yazarlar ve Yıl / Şehir	Yer özelliği	Araştırmanın Tasarım Tipi ve Örneklem Sayısı	Ölçmede Kullanılan Araçlar	Araştırmanın Uygulanma Süreci	Bulgular
Cüce & Uğur, 2021 / Nevşehir	Nevşehir ili kara yolu	Hesaplamalarda, Nevşehir İli'nde 2015-2020 yılları arasındaki (Mart-Ekim döneminde) yakıt tüketim miktarlarına dayanarak sera gazı emisyonları tespit edilmiştir.	Tier 1 hesaplama metodolojisi kullanılmıştır.	Nevşehir İli'ndeki 2015-2020 yılları arasındaki trafik kaynaklı hava kirliliğini değerlendiren bu çalışma, Covid-19 salgını nedeniyle Türkiye'de alınan önlemlere bir temel sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiş olup, temel alınan dönem Mart-Ekim olarak baz alınmıştır.	Son 5 yılda eş değer CO ₂ miktarı (Gigagram-Gg) biriminde sırasıyla 2015'te 255.5 Gg, 2016'da 318.2 Gg, 2017'de 453.6 Gg, 2018'de 572.5 Gg olarak belirlendi. 2019'da Gg miktarı genel olarak azalarak 346.5 Gg'ye düşerken, 2020'de ise 377.0 Gg olarak tespit edilmiştir.
Sonuç ve Değerlendirme			Çalışmanın sonucunda, Nevşehir ilinde Mart ve Ekim ayları arasında 2015-2020 yılları arasındaki yakıt tüketimi miktarındaki değişiklikten eş değer CO ₂ miktarındaki (Gg) değişikliği görenek, yakıt türüne bağlı olarak motorlarda yanma sonucu salınan emisyon miktarı ile CO ₂ emisyonunun doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. 2019'da yakıt tüketimi, Nevşehir gibi ülkemiz genelinde de azalmıştır. Çalışmada, elektrikli araçların kullanımına geçiş yapılması önerisinde bulunulmuştur.		
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri			Ulaşımında kullanılan motorlu taşıtlar nedeniyle oluşan karbon emisyonlarının küresel iklim değişikliği ve küresel ısınma üzerinde hızlandırıcı etkisi olduğu vurgulanmıştır.		
Dündar, 2021/ Türkiye Büyükşehirler	Türkiye'deki büyükşehirlerde ki karayolları	2010 ile 2019 yılları arasında Türkiye'deki büyükşehirlerin kara yolu taşımacılığı incelenmiştir (Bireysel seyahatler + yolcu ve yük taşımacılığı kaynaklı sera gazı emisyon miktarları)	IPCC tarafından geliştirilen Tier 1 yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.	Çalışmada sera gazı emisyon hesaplamasında Tier 1 yöntemi ve EPDK tarafından yayınlanan büyükşehirlerin 2010-2019 tarih aralığına ilişkin yakıt satış verileri kullanılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar CBS yazılımıyla Türkiye haritası üzerinde gösterilmiş ve karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir.	Toplam sera gazı emisyon miktarı değerlendirildiğinde, en yüksek miktar; İstanbul, Ankara ve İzmir'de yer alsa da dikkat çekici olan, İstanbul ve İzmir'in alt sıralarda olması ve Ankara'nın yüzde artış bakımından üst sırada yer almasıdır. Ankara, km ² başına düşen emisyon miktarında %72'lik bir artışla başı çekerken, İstanbul ve İzmir %47 ve %46'lık artışlarla alt sıralarda yer almaktadır.
Sonuç ve Değerlendirme			İstanbul, Ankara ve İzmir, toplam sera gazı emisyonları açısından öne çıkarken; sera gazı emisyonlarına göre Denizli, Mersin ve Muğla, kişi başına düşen sera gazı emisyonları açısından ilk üçte yer almaktadır. Araç başına sera gazı emisyonları açısından ise Mardin, Kocaeli ve Diyarbakır, km ² başına sera gazı emisyonları açısından ise İstanbul, Kocaeli ve İzmir öne çıkmaktadır. İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Mersin, Antalya, Konya ve Kocaeli hem 2010 hem de 2019 yılında ortalama emisyon miktarının üzerindedir. Bu şehirlerde alınacak önlemlerle ülkemizdeki yol emisyon miktarı önemli ölçüde azaltılabilir. Ancak, Mardin, Van ve Şanlıurfa gibi doğu bölgemizdeki şehirlerde emisyon artış hızı diğer şehirlerden önemli ölçüde daha yüksektir. Büyükşehir şehirlerinde alternatif ulaşım seçenekleri ve altyapılar karşılaştırıldığında, demiryolu dışındaki seçeneklerin emisyon artış hızını azaltmada etkili olduğu sonucuna varılmıştır.		
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri			İnsan faaliyetlerinin neden olduğu sera etkisinin güçlenmesinin, dünya sıcaklığını her gün artırdığı ve beklenmedik doğal olayların gelişimiyle ekosistemin bozulduğu vurgulanmıştır.		

Yazarlar ve Yıl / Şehir	Yer özelliği	Araştırmanın Tasarım Tipi ve Örneklem Sayısı	Ölçmede Kullanılan Araçlar	Araştırmanın Uygulanma Süreci	Bulgular
Kılıç ve ark., 2021 / Çanakkale	Çanakkale Kara yolu	Çalışmada, Çanakkale'deki kara yolu üzerinde 2015 ile 2018 yılları arasındaki araçların neden olduğu karbon ayak izi hesaplanmıştır.	IPCC tarafından önerilen Tier 1 ve Tier 2 yaklaşımları kullanılmıştır.	Çalışmada, Çanakkale ilindeki kara yolu taşımacılığı nedeniyle fosil yakıt tüketiminin karbon emisyonları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. İlk olarak, Çanakkale'deki kullanılan yakıt miktarı Tier 1 yöntemine göre incelenmiş ve yakıt tüketiminden kaynaklanan karbon ayak izi değişimi hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda, kara yolu taşımacılığı dışındaki yakıt türlerinin kullanımı dikkate alınmamıştır. Güncel veriler, EPDK Petrol ve LPG Piyasa Sektör Raporları'ndan alınmıştır. Hesaplamalar, IPCC tarafından sunulan Tier 1 ve Tier 2 yöntemleri kullanılarak 2015-2018 yıllarını kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir.	Tier 1 yaklaşımına göre, 2015 yılında 701.435 Gg olan karbon ayak izi miktarı, 2018 yılında %7'den fazla artarak 752.536 Gg'ye yükselmiştir. Tier 2 yaklaşımına göre, 2015 yılında 686,85 Gg olan karbon ayak izi miktarı, 2018 yılında 736.89 Gg'ye yükselmiştir.
Sonuç ve Değerlendirme			Araştırmada kara yolu kaynaklı karbon salınımı incelenmiş ve yıllar içinde şehir merkezindeki hava kirliliği saptanmıştır. Bu kirliliğe karşı alınabilecek önlemler ise; hibrit araçların kullanımı, kara yolu yakınlarında ağaçlandırma yapılması, temiz enerji kullanımının artırılması ve toplu taşıma seçeneğinin cazip hale getirilmesi olarak sıralanmıştır.		
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri Özkan, 2017 /Antakya	Antakya-Cilvegözü kara yolu	Kara yolunun her belirlenen örnekleme noktasının sağ ve sol taraflarından, yolun 25, 100, 500 m ve 1 km uzaklıklarından, 0-30 cm derinliğinden toplam 64 toprak örneği ve bu toprak üzerinde yetişen bitki örnekleri (N=12) alınmıştır.	İnsan ve çevre sağlığı üzerinde farklı kirlenici unsurların toksik etkisi vurgulanmıştır. Ölçümler, bir indüktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) cihazı kullanılarak yapılmıştır.	Toplanan topraklardaki ağır metaller, dietilentriaminpentasetik asit (DTPA) ile çıkarılmış, bitkilerde ise yaş yakma yöntemi kullanılarak çözümler gerçekleştirilmiştir.	Çalışmanın sonucunda, toprak örneklerinde şu değerler bulunmuştur: Pb 0.130-0.780 mg/kg. Cd 0-0.265 mg/kg. Ni 0.370-3.970 mg/kg. Cr 0-0.120 mg/kg. Co 0-1.830 mg/kg. Al 0-0.700 mg/kg. Fe 1.45-22.8 mg/kg. Cu 0.385-5.43 mg/kg. Mn 1.96-27 mg/kg. Zn 0-4.26 mg/kg. Bitki örneklerinde ise şu değerler belirlenmiştir: Pb 0-0.155 mg/kg. Cd 0-0.105 mg/kg. Ni 0.100-3.53 mg/kg. Cr 0.0 mg/kg. Co 0.0 mg/kg. Al 0.0 mg/kg. Fe 5.60-25.0 mg/kg. Cu 0.121-4.48 mg/kg. Mn 2.35-15.4 mg/kg. Zn ise 0.554-6.75 mg/kg
Sonuç ve Değerlendirme			Bitki örneklerinin verileri incelendiğinde, ağır metal birikimi olduğu belirlenmiş, ancak bu birikimin Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) ve Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından bitkilerde izin verilen ağır metal limit değerleri ile karşılaştırıldığında, ağır metal birikiminin kabul edilebilir sınırları aşmadığı görülmüştür. Topraktaki sadece demir (Fe) elementinin limit değerlerin üzerinde olduğu belirlenmiştir.		

Yazarlar ve Yıl / Şehir	Yer özelliği	Araştırmanın Tasarım Tipi ve Örneklem Sayısı	Ölçmede Kullanılan Araçlar	Araştırmanın Uygulanma Süreci	Bulgular
Behçet & Yakın, 2020 / Malatya	Malatya İnönü Üniversitesi Malatya ili havaalanı kavşağı	Malatya ilini çevreleyen yollarda seyahat eden araçların sayımıyla trafik yoğunluğu belirlenmiş ve trafik kaynaklı hava kirlleticileri hesaplanmış ve bir emisyon envanteri oluşturulmuştur.	Taşıt sayımları için, kış mevsimi haricinde, diğer mevsimlerde tüm yurttan metrocount firmasına ait, Araç Sınıflandırıcı Sistemi” cihazları kullanılmıştır.	Çalışmada ana caddelerde yürütülen taşıt sayımlarına göre, emisyon hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.	Malatya ilinde atmosfere salınan toplam emisyon miktarları yaklaşık, CO miktarı 768.22 ton yıl-1, NOx miktarı 153.73 ton yıl-1, PM miktarı 13.99 ton yıl-1 ve VOC miktarı 121.79 ton yıl-1 olarak bulunmuştur.
Sonuç ve Değerlendirme		Malatya ilinde elde edilen verilere göre, atmosfere salınan toplam emisyon miktarları içindeki CO miktarının yaklaşık olarak 768.22 ton/yıl, NOx miktarının 153.73 ton/yıl, PM miktarının 13.99 ton/yıl ve VOC miktarının 121.79 ton/yıl olduğu belirlendi. Malatya ilinde araç kaynaklı hava kirliliğini azaltmak için, fosil yakıtlar yerine alternatif yakıtların kullanılması ve kısa mesafelerde araç kullanımı yerine yürüyüşün teşvik edilmesi gibi önlemler önerilmiştir.			
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri		Nüfus artışıyla paralel olarak artan araç sayısı, yerleşim alanlarının havasını kirletir ve canlıların yaşamını olumsuz etkilemektedir.			
Yalçınkaya, 2020 / İzmir	Çiğli bölgesi kara yolu	Araç ve yakıt türüne bağlı emisyon faktörleri ve Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) analizleri sonucu, elde edilen yakıt tüketiminin çarpımına dayalı hesaplama yöntemiyle emisyonlar hesap edilmiştir.	CBS tabanlı VRP (Vehicle Routing Problem) yöntemi ile optimum güzergahların tayini, toplam kat edilen mesafelerin ve toplam araç çalışma sürelerinin tespiti gerçekleştirilmiştir.	Evsel katı atık toplama ve taşıma sistemi kaynaklı önemli hava kirleticilerinin (CO, NMVOC, NOx, PM, N2O, NH3, SO2 ve CO2) emisyonlarını hesaplamak ve toplama aracının kapasitesinin (8+1 m3 ve 13+1.5 m3) kirleticisi emisyonları üzerindeki etkisini incelemek amacıyla İzmir’in Çiğli ilçesine yönelik Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir ve uygulanmıştır.	(g/kg yakıt) CO2: 3.169 NOx: 33.37 NMVOC: 1.92 PM: 0.84
Sonuç ve Değerlendirme		Belediye atık toplama ve taşıma sisteminin devamlılığı için kullanılan dizel motorlu kamyonların, taşıma sektörü tarafından meydana getirilen hava kirliliğinde önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir. Ayrıca, küçük araçlara göre %17 daha fazla emisyon artışına neden olarak havayı kirlettiği ifade edilmiştir.			
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri		Partiküler madde konsantrasyonlarının insan sağlığına zararları vurgulanmıştır.			
Dündar & Kolay, 2021 / Konya	Şehir merkezindeki kara yolu	-	Konya ilinin 2010-2018 dönemi kara yolu yük ve yolcu taşımacılığının kaynaklı sera gazı emisyonu IPCC tarafından önerilen hesaplama yöntemlerinden Tier 1 kullanılarak hesaplanmıştır.	Çalışma kapsamında 2010-2018 yılları Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)’ndan alınan veriler kullanılarak Konya ilinde yakıt türlerine ait tüketim miktarları hesaplanmıştır.	(yıllık/ kt CO2 eq.) 2010 yılı: 1.854 2018 yılı: 3.459 Sera gazı emisyonlarında % 87’lik bir artış.
Sonuç ve Değerlendirme		Konya ilindeki kara yolu yük ve yolcu taşımacılığı kaynaklı sera gazı emisyonlarındaki yıllar içindeki artışı ve bu artışın küresel ısınma ve iklim değişikliğine etkisini ifade etmiştir. Ayrıca, taşımacılık faaliyetlerinin çevresel olarak dünya ekosistemini tehdit eden sera gazı emisyonlarına neden olduğunu belirtmiştir.			
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri		Sera gazı emisyon miktarlarındaki artışların, yaşamı tehdit eden meteorolojik olaylara neden olacağı belirtilmiştir.			

Yazarlar ve Yıl / Şehir	Yer özelliği	Araştırmanın Tasarım Tipi ve Örneklem Sayısı	Ölçmede Kullanılan Araçlar	Araştırmanın Uygulanma Süreci	Bulgular
Mutlu, 2019 /Balıkesir	Şehir merkezindeki kara yolu	Şehir merkezinde 24 kavşak analiz edilmiş ve bu kavşaklardan geçen araçlar sayılmıştır. Toplanan veriler COPERT programı yardımıyla analiz edilmiş ve trafikle ilişkili kirletici emisyonlar hesaplanmıştır.	Kavşaklar Avrupa Çevre Ajansı tarafından kullanılan COPERT (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport) paket programı kullanarak analiz edilmiş ve kavşaklara ait kirletici emisyonları hesaplanmıştır.	Sayımlar Valilik kapsamında, Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü'nden alınan izinler çerçevesinde 2016 yılında Mart-Nisan ve Mayıs aylarında yapılmıştır. Çalışma, trafik yoğunluğunun en yüksek olabileceği haftanın ilk günü olan Pazartesi günü gerçekleştirilmiştir. Bu gün içerisinde sabah 7.00-9.00, öğle 12.00-14.00 ve akşam 16.00-18.00 saatleri arasında yapılmıştır.	Balıkesir ilinde incelenen toplam 24 kavşaktaki trafik faaliyetlerinin bir sonucu olarak, sıcak ve soğuk iklim özellikleri dikkate alınarak yapılan analizlere göre yılda yaklaşık olarak 682 ton CO ve 133 ton NOx emisyonunun trafik nedeniyle atmosfere salındığı tahmin edilmektedir.
Sonuç ve Değerlendirme			İzmir-Bursa-İstanbul ana ulaşım hattındaki kavşaklarda, şehir merkezinden geçen trafik yoğunluğunun diğer kavşaklara kıyasla daha yüksek olduğu ve bu nedenle daha fazla bu nedenle CO ve NOx kirleticisinin atmosfere salındığı ve daha fazla yakıt tüketildiği belirlenmiştir. Çalışmanın önerileri arasında, şehir içinde dur-kalkları azaltacak bir trafik akışının oluşturulması, toplu taşıma kullanımının teşvik edilmesi ve yeşil enerji kullanımının özendirilmesi bulunmaktadır.		
İnsan ve Çevre Sağlığına Etkileri			Otobanlara yakın bölgede yaşayan insanların astım gibi hava kirliliği nedenli sağlık problemleri riski taşıdığı çalışmada belirtilmiştir.		

Sistemik derleme dahil edilen 14 araştırmanın bulgularını destekleyen bazı uluslararası ve ulusal argümanlar, Çizelge 14'te gösterilmiştir.

Çizelge 14. Uluslararası ve ulusal argümanlar

ARGÜMANLAR	
ULUSLARARASI ARGÜMANLAR	<p>IPCC; kara yolu taşımacılığında (benzin, motorin, LPG) kaynaklı kirletici gazları, Karbondioksit (CO₂), Metan (CH₄), Azot Protoksit (N₂O) olarak değerlendirmiştir (IPCC, 2006a).</p> <p>Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ)'nün yayınlamış olduğu Küresel Hava Kalitesi Rehberinde, hava kirliliğinin artık insan sağlığına yönelik en büyük çevresel tehdit olduğunu vurgulamıştır. Bulaşıcı Olmayan Hastalıkların (NCD) önden gelen ölüm ve sakatlıklara, kardiyovasküler, nörolojik, solunum ve diğer organ sistemlerini etkileyen geniş bir hastalık yelpazesine neden olduğunu belirtmiştir. Bu doğrultuda hava kirliliğine neden olduğu kirleticileri (Partikül madde (PM₁₀, PM_{2,5}), Ozon (O₃), Nitrojen Dioksit (NO₂), Kükürt dioksit (SO₂) ve Karbonmonoksit (CO) olarak ön görmüş ve sınır değerleri bu rehberde belirtmiştir. Ayrıca DSÖ, kentsel mikro çevrelerde hava kirliliği kaynaklarına ulaşım ortamları ve caddelerdeki araç emisyonlarının neden olduğunu, bu emisyonların ultra küçük partikül maddelere (PM), Karbonmonoksit (CO), Azot Oksit (NO_x), Ozon (O₃), Uçucu organik bileşik (VOC), Kurşun (Pb) vb. kirleticilerin oluşumuna neden olmaktadır (WHO, 2021).</p>
	<p>Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre ulaşım sektörü, tüm sektörler arasında fosil yakıtlara en bağımlılığı sektör ve 2021 yılında CO₂ emisyonlarının %37'sini oluşturmaktadır (IEA, 2022).</p>
	<p>IEA, kara yolunda kullanılan otobüs ve kamyon gibi ağır hizmet taşıtlarından çıkan egzoz CO₂ emisyonları, 2000 yılından bu yana yılda ortalama %2.2 artış göstermiştir (IEA, 2022).</p> <p>Avrupa Çevre Ajansı (EEA)'na göre, CO₂ emisyonları ulaşımındaki sera gazı emisyonlarının ana bileşeni olup, kara yolu taşımacılığı bu emisyonlara en büyük katkıyı yapmaktadır (EEA, 2022).</p> <p>Avrupa Çevre Ajansı (EEA)'nın 2021 yılı "Ulaşım ve Çevre Raporlama Mekanizması (TERM)" başlıklı yıllık raporunda, 21.yüzyılda en zorlu hedeflerden birinin ulaşım olduğu belirtilmiştir. Nitrojen Dioksit (NO₂) emisyonlarının yükselmesine neden olan kara yolu yük taşımacılığı, asit yağmurlarına neden olan Kükürt dioksit (SO₂) emisyonları ulaşım kaynaklıdır. Elde edilen bulgularda, kalabalık yolların çevresinden yaşayan insanların aşırı derecede hava kirliliğine maruz kaldıkları, Hava izleme istasyonlarında, %44 düzeyinde yasal sınırı aşan zararlı Nitrojen Dioksit (NO₂) emisyonu tespit edilmiştir. Bu bölgelerin %33'ünde partikül madde (PM₁₀) seviyeleri sınırları aşmıştır. Bu kirletici unsurlar, kalp ve dolaşım sistemi, akciğer, karaciğer, dalak ve kanı etkilemektedir. Ulaşım kaynaklı gürültünün ise ciddi sağlık problemlerine neden olduğu bulgular arasında görülmüştür (EEA, 2022).</p>
	<p>Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı kara yolu ulaşımından kaynaklanan hava kirletici emisyonlarını, Azot oksit (NO_x) ve Partiküller Madde (PM₁₀) emisyonları üzerinden Gigaton (Gg) birimi üzerinden hesaplamıştır (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022).</p> <p>Türkiye'de "Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği"ne (Mevzuat Bilgi Sistemi, 2008) göre, insan sağlığı ve çevre üzerinde zararlı etkileri bulunan kirletici emisyonlar (SO₂, NO₂, NO_x, PM₁₀, Kurşun (Pb), Karbonmonoksit (CO), Nikel (Ni), Arsenik (As), Kadmiyum (Cd), Ozon (O₃), Benzen (C₆H₆), Uçucu organik bileşik (VOC) için limit değerler belirlenmiştir (Mevzuat Bilgi Sistemi, 2008).</p>

4.2.3. Kalite değerlendirme bulguları

Sistemik derleme kapsamına alınan 14 çalışmanın metodolojik kalitesi, Joanna Briggs Institute (JBI) tarafından geliştirilen ve kesitsel araştırmalar için kullanılan 8 soruluk Kritik Değerlendirme Kontrol Listesi kullanılarak uzman araştırmacılar eşliğinde değerlendirilmiştir. Her bir kesitsel çalışmanın kalite seviyesi, 8 soruya "Evet, Hayır, Belirsiz ve Uygulanmaz" seçeneklerinden biriyle cevaplanarak belirlenmiştir. Bu çalışmaların tamamı, maddelerin %80'inden fazlasının "Evet" olarak değerlendirilmesi sonucunda metodolojik kalite açısından "iyi kalite" olarak kabul edilmiştir (Çizelge 15).

Çizelge 15. Çalışmalara ilişkin kontrol listesi ve değerlendirme skorları

JBI Kesitsel Çalışmalar İçin Kritik Değerlendirme Kontrol Listesi Soruları	Yakın & Behçet, 2019	Tezel ve ark., 2019	Çetin & Ergüder, 2020	Demirel & Ateş, 2018	Kılıç, 2019	Civelekoglu & Bıyık, 2020	Cüce & Uğur, 2021	Dündar, 2021	Kılıç ve ark., 2021	Özkan, 2017	Behçet & Yakın, 2020	Yalçınkaya, 2020	Dündar & Kolay, 2021	Mutlu, 2019	Çalışmaların Kalite Skoru
	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	
Örnekleme dahil edilme kriterleri açıkça tanımlanmış mı?	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	%100
Çalışmanın katılımcıları ve ortamı detaylı olarak anlatılmış mı?	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	%100
Maruziyet geçerli ve güvenilir bir yöntemle ölçülmüş mü?	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	%100
Durumun ya da koşulların ölçümü için objektif ve standart kriterler kullanılmış mı?	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	%100
Karıştırıcı ya da katkıda bulunucu faktörler tanımlanmış mı?	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	%100
Karıştırıcı faktörleri yönetmek için stratejiler belirtilmiş mi?	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	%100
Sonuçlar geçerli ve güvenilir bir yöntem ile ölçülmüş mü?	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	%100
Uygun istatistiksel analizler kullanılmış mı?	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	E+	%100

E+: Evet; H-: Hayır; U: Uygulanamaz; B: Belirsiz

4.2.4. Öyküsel anlatı bulguları

Sistemantik derleme kapsamında incelenen çalışmaların sonuçları, meta-analiz için uygun nicel veri bulunmadığından, verilerin sentezlenmesinde öyküsel anlatı yöntemi tercih edilmiştir. Bu sebeple, 14 çalışmanın sonuçları öyküsel anlatıya dönüştürülerek birleştirilmiş ve sentezlenmiştir. Bu birleştirilmiş sonuçlardan elde edilen bulgular, kara yolu ulaşımının çevre ve insan sağlığı üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir.

5. Tartışma ve Sonuç

Çalışmada, Ege Bölgesi'ndeki sekiz şehrin (Afyon, Aydın, Denizli, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla ve Uşak) 2010 ve 2019 yıllarına ait kara yolu ulaşımından kaynaklanan sera gazı emisyonları, IPCC'nin Tier 1 yöntemiyle hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; 2010'da sekiz şehirdeki toplam sera gazı emisyonu 8.224.04 Gg CO₂e. iken, 2019'da bu miktar önemli ölçüde artarak 14.151.43 Gg CO₂e.'e yükselmiştir. 2010 ve 2019 yılları arasında toplam sera gazı emisyon miktarının yaklaşık %72,14 arttığı belirlenmiştir. Detaylı hesaplama sonuçları doğrultusunda;

Şehirlerin nüfus, toplam araç sayıları ile yüz ölçümü verilerine ilişkin tartışma kapsamında; 2010 ve 2019 yıllarına ait veriler (Çizelge 16) incelendiğinde;

Çizelge 16. Nüfus, araç ve yüz ölçümü durumu (ilk üç şehir)

Nüfusu En Fazla Olan İlk Üç Şehir		En Fazla Oransal Artış (Nüfus)	Toplam Araç Sayısı En Fazla Olan İlk Üç Şehir		En Fazla Oransal Artış (Araç)	Yüz Ölçümü En Büyük Olan	Yüz Ölçümü En Düşük Olan
2010	2019	2010-2019	2010	2019	2010-2019	Üç Şehir	Üç Şehir
İzmir	İzmir	%20.26	İzmir	İzmir	%58.89	Afyon	Uşak
Manisa	Manisa		Manisa	Manisa		Muğla	Manisa
Aydın	Aydın		Muğla	Muğla		Muğla	Kütahya

2010 ve 2019 yıllarında en kalabalık şehirlerin sırasıyla İzmir, Manisa ve Aydın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, 2010 ile 2019 arasında en yüksek nüfus artış oranının %20,26 ile Muğla'da olduğu tespit edilmiştir. Bu şehirler, tarım ve tarıma dayalı endüstrilere sahip, gelişmiş altyapı ve yüksek yaşam kalitesi sunan, turizm potansiyeli yüksek ve eğitim kurumlarına ev sahipliği yapan merkezler olarak görülmektedir. 2010 ve 2019 yıllarında toplam araç sayısı bakımından en kalabalık şehirlerin sırasıyla İzmir, Manisa ve Muğla olduğu tespit edilmiştir. Bu dönemde, araç sayısında en yüksek oransal artışın %58,89 ile Muğla'da yaşandığı belirlenmiştir. Araç sayısındaki artışlar özellikle İzmir, Manisa, Muğla, Aydın ve Denizli illerinde gözlenmektedir. Bu durum, artan araç sayısının trafik yoğunluğuna, hava kirliliğine yol açabileceği, sonuç olarak hava kalitesinin düşmesine, yol altyapısının zarar görmesine, park sorunlarına ve toplu taşıma sistemlerine olan talebin azalmasına neden olabileceği düşünülmektedir.

Yakıt satış verilerine ilişkin tartışma kapsamında; 2010 ve 2019 yıllarına ait benzin, dizel ve LPG'li araçların yakıt satış verileri ve yüzdesel artış oranları (Çizelge 17) incelendiğinde;

Çizelge 17. En fazla benzin, motorin ve LPG tüketimi gerçekleşen ilk üç şehir

Benzin Tüketimi En Fazla Olan İlk Üç Şehir		En Fazla Oransal Artış (Benzin)	Motorin Tüketimi En Fazla Olan İlk Üç Şehir		En Fazla Oransal Artış (Motorin)	LPG Tüketimi En Fazla Olan İlk Üç Şehir		En Fazla Oransal Artış (LPG)
2010	2019	2010-2019	2010	2019	2010-2019	2010	2019	2010-2019
İzmir	İzmir	% 46 Manisa	İzmir	İzmir	% 181 Kütahya	İzmir	İzmir	% 73 Uşak
Muğla	Muğla		Muğla	Denizli		Manisa	Manisa	
Aydın	Manisa		Manisa	Manisa		Muğla	Denizli	

2010 ve 2019 yılları arasında, benzin tüketiminde en yüksek oransal artışın %46 ile Manisa'da gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, benzin tüketimiyle ilgili alınacak önlemlerin öncelikle İzmir, Muğla ve Aydın gibi benzin tüketiminin yoğun olduğu bölgeler ile en yüksek oransal artışın yaşandığı Manisa ilinden başlaması gerektiğini göstermektedir. 2010 ve 2019 yılları arasında dizel tüketiminde en yüksek oransal artışın %181 ile Kütahya'da olduğu belirlenmiştir. Dizel yakıtların diğer türlerine göre daha fazla emisyon ürettiği bilindiğinden, dizel araçların kullanımını azaltmaya yönelik acil önlemlerin alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Özellikle İzmir, Muğla, Manisa ve Denizli gibi dizel tüketiminin yoğun olduğu bölgelerde ve oransal artışın en yüksek olduğu Kütahya'da bu konuda hızlı önlemler alınması gerekmektedir. 2010 ve 2019 yılları arasında LPG tüketiminde en yüksek oransal artışın %73 ile Uşak'ta yaşandığı belirlenmiştir. Bu verilerle, İzmir, Manisa, Muğla ve Denizli gibi bölgelerde yoğun bir otogaz (LPG) tüketiminin olduğu ve Uşak ilinde önemli bir artış yaşandığı görülmektedir. LPG kullanımının çevresel etkilerden tamamen muaf olmadığı düşünüldüğünden, çevre ve sağlık üzerinde olumsuz etkileri olabileceği öngörülmektedir.

Şehirlerin sera gazı emisyon miktarı verilerine ilişkin tartışma kapsamında; 2010 ve 2019 yıllarına ait sera gazı emisyon miktarları (Çizelge 18) incelendiğinde;

Çizelge 18. Sera gazı emisyon miktarı ve CO₂, CH₄, N₂O artış durumu

En Fazla Sera Gazı Emisyonu Gerçekleşen İlk Üç Şehir		En Fazla Oransal Artış (CO ₂) Emisyonu	En Fazla Oransal Artış (CH ₄) Emisyonu	En Fazla Oransal Artış (N ₂ O) Emisyonu
2010	2019	2010-2019	2010-2019	2010-2019
İzmir	İzmir	% 149,21 Kütahya	% 79,93 Kütahya	% 167,17 Kütahya
Muğla	Manisa			
Manisa	Denizli			

2010 ve 2019 yılları arasında, CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonu miktarları bakımından diğer şehirlere göre en fazla oransal artışın Kütahya'da olduğu belirlenmiştir. İzmir, Muğla, Manisa, Denizli ve Kütahya gibi emisyonların daha fazla olduğu illerde, bu emisyonlar hava kirliliğine ve dolayısıyla solunum yolu

hastalıkları ile kardiyovasküler rahatsızlıklar gibi önemli sağlık sorunlarına katkıda bulunabilir. Ayrıca, bu şehirlerdeki yüksek sera gazı emisyonu, iklim değişikliğini hızlandırabilir ve aşırı hava olayları ile deniz seviyesindeki yükselmeler gibi iklim değişikliği etkilerini artırabilir. İzmir, Muğla, Manisa ve Denizli gibi illerde, sera gazı emisyonlarını azaltmak için alınacak önlemlerin öncelikle hayata geçirilmesi gerekmektedir. Bu bölgelerde, sürdürülebilir, düşük emisyonlu ve çevre dostu ulaşım sistemlerine geçiş, güçlü ulaşım politikalarıyla sağlanabilir.

Şehirlerin kişi başına, araç başına ve kilometrekareye düşen sera gazı emisyon miktarları verilerine ilişkin tartışma kapsamında; 2010 ve 2019 yıllarına ait veriler (Çizelge 19) incelendiğinde;

Çizelge 19. Sera gazı emisyon miktarı ve CO₂, CH₄, N₂O artış durumu

Kişi Başına Düşen Karbon Emisyon Miktarı İlk Üç Şehir		En Fazla Oransal Artış (Kişi başına)	Araç Başına Düşen Karbon Emisyon Miktarı İlk Üç Şehir		En Fazla Oransal Artış (Araç Başına)	Km ² başına Düşen Karbon Emisyon Miktarı İlk Üç Şehir		En Fazla Oransal Artış (km ²)
2010	2019	2010-2019	2010	2019	2010-2019	2010	2019	2010-2019
Muğla	Denizli	%153,88	Afyon	Denizli	%76,00	İzmir	İzmir	%148,32
Denizli	Kütahya		Uşak	Kütahya		Aydın	Aydın	
İzmir	Muğla		Denizli	Afyon		Muğla	Denizli	

2010 yılında kişi başına düşen en fazla sera gazı emisyonunun sırasıyla Muğla, Denizli ve İzmir'de; 2019 yılında ise Denizli, Kütahya ve Muğla'da gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu yıllar arasındaki en büyük değişim oranı %153,88 ile Kütahya'da tespit edilmiştir. Araştırmalar, yoğun araç trafiğine sahip şehirlerde ve fosil yakıt tabanlı enerjiye dayalı bölgelerde genellikle kişi başına yüksek sera gazı emisyonlarına rastlandığını göstermektedir. Bu bağlamda, Muğla, Denizli ve İzmir gibi illerde en yüksek kişi başına sera gazı emisyonlarının gözlemlendiği yerlerde, ayrıca Kütahya gibi yüzdesel değişimin en yüksek olduğu illerde, karbon ayak izini azaltmak için daha düşük emisyon hedefleri ve toplu taşıma teşvikleri gibi çabaların gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

2010'da araç başına düşen en yüksek sera gazı emisyonları sırasıyla Afyon, Uşak ve Denizli'de görülürken; 2019'da bu sıralama Denizli, Kütahya ve Afyon olarak gerçekleşmiştir. Bu süre zarfında en büyük artış oranı %76,00 ile Kütahya'da görülmüştür. Şehirlerdeki yüksek araç başına karbon emisyonları, her aracın atmosfere saldırdığı sera gazı miktarının fazla olduğunu göstermektedir. Afyon, Uşak, Denizli ve Kütahya'daki karbon emisyonlarının artması, fosil yakıt kullanımının arttığını işaret etmektedir. Bu durum, şehirlerde hava kirliliğinin ve iklim değişikliği ile ilişkilendirilen olumsuz etkilerin artmasına neden olabilir. 2010 ile 2019 yılları arasında kilometrekare başına düşen emisyon miktarındaki en büyük oransal artış Kütahya'da yaşanmıştır. Şehirlerdeki artan karbon emisyonları, kilometrekare başına daha yüksek karbon emisyonlarının atmosfere salınması anlamına gelmektedir. Aynı zamanda bu artışlar, şehirlerdeki çevresel sürdürülebilirlikle ilgili sorunların varlığına işaret etmektedir. Bu artışları azaltmak ve şehirleri daha yeşil, sağlıklı ve yaşanabilir hale getirmek için sürdürülebilir kentsel planlama ve çevresel politikaların uygulanması büyük önem taşımaktadır.

Çalışmanın TİER 1 hesaplamasıyla elde edilen bulgulara göre, Ege Bölgesi'ndeki sekiz şehirde kara yolu ulaşımından kaynaklanan sera gazı emisyon miktarının sürekli arttığı ve önemli bir emisyon payına sahip olduğu belirlenmiştir. Sera gazı emisyonlarını azaltmak için alınacak önlemlerin, öncelikle İzmir, Muğla, Manisa ve Denizli gibi en yüksek sera gazı emisyonuna sahip illerden başlanması önerilmektedir.

Ege Bölgesi'ndeki şehirler için Paris Anlaşması hedefleri ve iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılması ile uyum çabalarını desteklemek amacıyla, şehirlerde ulaşımından kaynaklanan emisyonları azaltmak için aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur (Özdemir, 2024).

- Toplu taşıma sistemlerinin teşvik edilmesiyle bireysel araç kullanımının azaltılması, özellikle otobüs, metro ve tramvay gibi toplu taşıma araçlarının yaygın olarak kullanılması,
- Kentlerde bisiklet kullanımının teşvik edilmesi ve bunun için şehir içinde bisiklet yollarının oluşturulması ve bisiklete erişimin kolaylaştırılması,

- Elektrikli araçların yaygınlaştırılması için şarj altyapısının geliştirilmesi ve kullanıcılarına teşviklerin sunulması,
- Trafik akışının iyileştirilmesi ve sıkışıklığın azaltılması için akıllı trafik yönetim sistemlerinin yoğun kavşaklarda kullanımının artırılması,
- Araç paylaşım programlarının teşvik edilmesiyle insanların araçlarını başkalarıyla paylaşmaya teşvik edilerek araç sayısının azaltılması,
- Yeşil alanların artırılmasıyla yaya ve bisiklet kullanımının teşvik edilmesi,
- Evden veya esnek çalışma modellerinin teşvikiyle şehir içi trafiğin azaltılması,
- Şehir sakinlerine çevre dostu ulaşım konusunda eğitim ve farkındalık programlarının düzenlenmesi,
- Toplu taşıma kullanımının teşvik edilmesi için park sistemlerinin geliştirilmesi ve şehir dışında araç bırakma imkanının sağlanması,
- Bakımlı ve düzenli yolların tasarlanmasıyla araçların daha az enerji tüketmesi ve emisyon üretmesinin desteklenmesi,
- Elektrikli araç sahiplerine yönelik şarj istasyonlarının şehir genelinde yaygınlaştırılması,
- Yoğun nüfusa sahip şehirlerde trafik yoğunluğunu azaltmak için esnek çalışma saatleri veya kaydırma saatleri uygulanması,
- Yaya dostu alanların oluşturulması için kaldırımların genişletilmesi, güvenli yaya geçitlerinin eklenmesi ve yaya öncelikli bölgelerin oluşturulması,
- Şehir içinde park alanlarının daha etkili kullanımı için akıllı park yönetim sistemlerinin kullanılması,
- Düşük emisyonlu araç kullanımını teşvik etmek için vergi avantajları veya teşvik programlarının oluşturulması,
- Şehir içi lojistik süreçlerini optimize etmek için akıllı lojistik yönetim sistemlerinin kullanılması,
- Yeşil taksi ve çevre dostu ulaşım hizmetlerinin desteklenerek, bu hizmetlere geçişin teşvik edilmesi,
- Karbon ticaretinin yaygınlaştırılması ve işletmelerin ve endüstrilerin karbon ticareti ve emisyon izleme sistemlerine dahil edilmesi,
- Yeşil altyapı projelerinin desteklenmesi ve çevre dostu ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi,
- Şehirlerde fosil yakıtlardan arındırılmış, herkesin erişebileceği ve teşviklerle desteklenen yeşil ulaşım araçlarının (elektrikli otomobil, elektrikli bisiklet, hibrit araç, elektrikli scooter, biyogazlı otobüs, hidrojen yakıt hücreli araç, doğalgazlı araç, elektrikli otobüs, elektrikli tren ve yeşil otomobil) kullanımının yaygınlaştırılması önemlidir.

Sistematik derleme yöntemi ile gerçekleştirilen süreçler sonucunda elde edilen bulgular kapsamında; Türkiye'deki ulaşımdan kaynaklı emisyonların çevre ve insan sağlığına etkisini araştıran 14 nitel sentez çalışmasının sonuçları sistematik derleme yöntemiyle birleştirilmiş ve elde edilen kanıtlar öyküsel bir şekilde sunulmuştur. Sistematik literatür derlemesine dahil edilen araştırma bulgularında, kara yolu ulaşımdan kaynaklanan emisyonların insan ve çevre sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceğine dair önemli kanıtlar bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, sistematik derlemeye dahil edilen çalışmalarda kullanılan yöntemlerin, kara yolu ulaşımdan kaynaklanan emisyonları belirlemek ve miktarlarını tespit etmek amacıyla odaklandığını göstermektedir. Çalışmada kullanılan bu yöntemler ayrıca, kara yolundaki araçların emisyonlarının bitkilerde ve toprakta ağır metal birikimine yol açtığını, trafik kaynaklı gürültünün insanları gürültü kirliliğine maruz bıraktığını ve dizel yakıtlı araçların diğer yakıtlı araçlara kıyasla daha yüksek karbon ayak izine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca Hizmet sektöründe kullanılan dizel motorlu kamyonların, küçük araçlara kıyasla daha fazla hava kirliliğine sebep olduğu, araçların dur-kalk yapmasıyla atmosfere daha fazla emisyon salındığı ve büyükşehirlerde ulaşımdan kaynaklanan emisyon miktarlarının yıllar içinde sürekli arttığı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur (Özdemir, 2024).

- Sistematik derlemeye dahil edilen, Türkiye'deki kara yolu ulaşımdan kaynaklanan emisyonların insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkilerine odaklanan çalışmaların literatürde yetersiz olduğu

tespit edilmiştir.

- Bu alanda daha fazla araştırma yapılmalı ve bilgi boşluklarını dolduracak daha kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmelidir.
- Araç emisyonlarının insan sağlığı üzerindeki etkilerini analiz eden ve kan içindeki toksik gaz miktarını araştıran daha fazla çalışma yapılmalıdır.
- Kronik hastalığı olan bireylerin taşıt emisyonlarından ne kadar etkilendiğini ve kısa/uzun vadede etkilenme durumlarını inceleyen daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.
- Yapılacak olan çalışmaların, Türkiye'deki şehirlerde ulaşım emisyonlarının etkilerini anlama ve yönetme konusunda daha etkili stratejiler geliştirmeye yardımcı olması önemlidir.

Elde edilen tüm bu sonuçlar ışığında, Ege Bölgesi'nde bulunan Afyon, Aydın, Denizli, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla ve Uşak şehirlerinde, 2010-2019 yılları arasında kara yolu ulaşımından kaynaklanan toplam sera gazı emisyonlarında belirgin artışlar tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, sekiz şehirde ulaşım emisyonlarının azaltılmasının, Türkiye'nin genel sera gazı emisyonlarının ciddi ölçüde azaltılmasına katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Kaynakça

- Aksoy, S. A., Kızıltan, A., Kızıltan, M., Köksal, M. A., Öztürk, F., Tekeli, Ş. E., ... & Güllü, G. (2021). Mortality and morbidity costs of road traffic-based air pollution in Turkey. *Journal of Transport & Health*, 22, 101142. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101142>
- Avrupa Çevre Ajansı (EEA). (2022). *Do lower speed limits on motorways reduce fuel consumption and pollutant emissions?* Erişim tarihi: 25.07.2022. <https://www.eea.europa.eu/themes/transport/speed-limits-fuel-consumption-and>
- Behçet, R., & Yakın, A. (2020). Malatya ili trafik kaynaklı hava kirleticilerinin emisyon envanteri. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2783-2790. <https://doi.org/10.21597/jist.704308>
- Civelekoğlu, G., & Bıyık, Y. (2020). Isparta ilinde kara yolu kaynaklı karbon ayak izinin hesaplanması. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 4(2), 78-87.
- Cardinael, R., Umulisa, V., Toudert, A., Olivier, A., Bockel, L., & Bernoux, M. (2018). Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems. *Environmental Research Letters*, 13(12), 124020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab5f>
- Choudhary, M. P., & Garg, V. (2013). *Causes, consequences and control of air pollution*. All India seminar on methodologies for air pollution control, held at MNIT, Malviya National Institute of Technology, Jaipur, Rajasthan, India.
- Crippa, M., Janssens-Maenhout, G., Guizzardi, D., Van Dingenen, R., & Dentener, F. (2019). Contribution and uncertainty of sectorial and regional emissions to regional and global PM 2.5 health impacts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(7), 5165-5186. <https://doi.org/10.5194/acp-19-5165-2019>
- Cuci, Y., & Polat, E. E. (2015). Gaziantep'in trafik kaynaklı hava kirliliğinin belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(2), 1-11.
- Cüce, H., & Uğur, O. (2021). Nevşehir ilinde kara yolu ulaşımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının Covid-19 salgını başlangıç döneminde değerlendirilmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 118-134. <https://doi.org/10.31466/kfbd.885206>
- Çerçi, M. (2021). *IPCC Tier 1 ve Defra metodları ile karbon ayak izinin belirlenmesi: Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi örneği*. (Yüksek Lisans Tezi), Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Çetin, M., & Ergüder, T. O. (2020). Erzincan'da motorlu taşıtlar tarafından atmosfere bırakılan egzoz emisyonları ve tahmini miktarlarının belirlenmesi. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 13(3), 1403-1412. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.638290>
- Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2022). <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulasimdan-kaynaklanan-hava-kirleticileri-emisyonu-i-85795> Erişim tarihi: 20.08.2023.
- Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). *Çevresel göstergeler*. Erişim tarihi: 25.11.2023. <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/>

- Demirel, H., & Ateş, A. (2018). Sapanca Gölü çevresinde kara yolu trafiğinden kaynaklanan hava kirleticilerinin emisyon envanteri. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 150-158. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.291218>
- Dışişleri Bakanlığı. (2023). *Kyoto Protokolü*. Erişim tarihi: 29.11.2023. <https://www.mfa.gov.tr/kyoto-protokolu.tr.mfa>
- Dündar, A. O. (2021). Türkiye'deki büyükşehirlerin kara yolu ulaşımı kaynaklı sera gazı emisyon miktarının karşılaştırmalı analizi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(2), 318-337. <https://doi.org/10.21324/dacd.862836>
- Dündar, A. O., & Kolay, A. (2021). Kara yolu yük ve yolcu taşımacılığının çevresel sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi ve Konya ili sera gazı emisyonunun hesaplanması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 14(1), 317-334.
- EPDK. (2022). *Yıllık sektör raporu*. Enerji Piyasası Denetleme Kurulu. Erişim tarihi: 16.08.2023. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu>
- EUR Lex. (2023). *Document 32022D0591*. Erişim tarihi: 29.11.2023. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2022/591/oj>
- Gökburun, İ., & Doğan, Ö. S. (2019). İBBS uygulamasında nüfus verilerinin coğrafi açıdan yorumlanmasını kolaylaştıracak bir yol haritası. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 24(41), 39-60. <https://doi.org/10.17295/ataunidcd.533185>
- Harita Genel Müdürlüğü (HGM). (2022). *İl ve ilçe yüz ölçümleri*. Erişim tarihi: 19.09.2023. <https://www.harita.gov.tr/il-ve-ilce-yuzolcumleri>
- Health and Climate Change Countdown Report. (2023). *The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change*. Erişim tarihi: 25.07.2023. <https://www.lancetcountdown.org/about-us/interact-with-the-key-findings>
- International Energy Agency (IEA). (2022). *Transport*. Erişim tarihi: 28.07.2023. <https://www.iea.org/energy-system/transport>
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Energy system of Türkiye*. Erişim tarihi: 02.08.2023. <https://www.iea.org/countries/turkiye>
- IPCC. (2006a). *Chapter 4: Methodological Choice and Identification of Key Categories*. Erişim tarihi: 18.08.2023. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_4_Ch4_MethodChoice.pdf
- IPCC. (2006b). *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Japan: National Greenhouse Gas Inventories Programme (IGES).
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Iturbide, M., Gutiérrez, J. M., Alves, L. M., Bedia, J., Cerezo-Mota, R., Gimenez, E., ... & Vera, C. S. (2020). An update of IPCC climate reference regions for subcontinental analysis of climate model data: Definition and aggregated datasets. *Earth System Science Data*, 12(4), 2959-2970. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2959-2020>
- Karaçam, Z. (2013). Sistemik derleme metodolojisi: Sistemik derleme hazırlamak için bir rehber. *Dokuz Eylül Üniversitesi Hemşirelik Fakültesi Elektronik Dergisi*, 6(1), 26-33.
- Kelen, F. (2014). Motorlu taşıt emisyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerine etkileri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(1-2), 80-87.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). (2022). *Devlet ve il yolu uzunluğu (km)*. Erişim tarihi: 19.09.2023. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Istatistikler/DevletveIlyolEnvanteri.aspx>
- Kılıç, D. D. (2019). Investigation of heavy metal accumulation and biomonitoring of calepina irregularis species growing in Amasya (Turkey) province. *Anatolian Journal of Botany*, 3(2), 44-50. <https://doi.org/10.30616/ajb.516101>
- Kılıç, M. Y., Dönmez, T., & Adalı, S. (2021). Kara yolu ulaşımında yakıt tüketimine bağlı karbon ayak izi değişimi: Çanakkale örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 943-955. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.848016>
- Kurnaz, D., & Karaçam, Z. (2022). İnfertil obez kadınlarda obezitenin yönetiminde kullanılan yöntemlerin obstetrik sonuçlara etkisi: sistemik derleme ve meta-analiz. *Mersin Üniversitesi*

- Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi*, 12(1), 147-169.
<https://doi.org/10.31020/mutftd.1003918>
- Lancet Report. (2023). *Lancet health and climate change countdown report*. Erişim tarihi: 07.09.2023.
[https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(23\)01859-7/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(23)01859-7/fulltext).
- Magowan, D. (2018). *The impact of traffic related air pollution in Northern Ireland*. (PhD), Ulster University, Northern Ireland.
- Matz, C. J., Egyed, M., Hocking, R., Seenundun, S., Charman, N., & Edmonds, N. (2019). Human health effects of traffic-related air pollution (TRAP): A scoping review protocol. *Systematic Reviews*, 8, 223. <https://doi.org/10.1186/s13643-019-1106-5>
- Menteşe, S. (2017). Çevresel sürdürülebilirlik açısından toprak, su ve hava kirliliği: Teorik bir inceleme. *Journal of International Social Research*, 10(53), 381-389.
- Mevzuat Bilgi Sistemi. (2008). *Hava kalitesi değerlendirme ve yönetimi yönetmeliği*. Erişim tarihi: 09.10.2023.
<https://mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=12188&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Prisma Group (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLOS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Munn, Z., Moola, S., Riitano, D., & Lisy, K. (2014). The development of a critical appraisal tool for use in systematic reviews: Addressing questions of prevalence. *International Journal of Health Policy and Management*, 13(3), 123-128. <https://doi.org/10.15171/ijhpm.2014.71>
- Mutlu, A. (2019). Balıkesir şehir merkezinde trafik kaynaklı hava kirliliği seviyelerinin analizi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 152-168.
<https://doi.org/10.25092/baunfbed.532605>
- Ötken, B., & Gümüşay, M. Ü. (2010). Kara yolunda hareket halindeki taşıtların çevreye yaydıkları emisyonların analizi için CBS’de arayüzlerin hazırlanması. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 101.
- Özdemir, T. (2024). *Ege bölgesindeki şehirlerin ulaşım kaynaklı emisyonların analizi; emisyonların çevre ve insan sağlığına etkisi: sistematik derleme*. (Doktora Tezi), Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Aydın, Türkiye.
- Özkan, A. (2017). Antakya-Cilvegözü kara yolu etrafındaki tarım arazilerinde ve bitkilerdeki ağır metal kirliliği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 9-18.
<https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.357176>
- Parlak, F. O. (2017). *Dizel motor emisyon düzenlemeleri için LNT'nin matematiksel olarak modellenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). Erişim tarihi: 07.09.2023.
https://onikinciplan.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/11/On-Ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028.pdf
- Teimourzadeh, S., Tör, O. B., Kat, B., Şahin, Ü., Demirkol, K., Künar, A., ... & Yeldan, E. (2023). *Türkiye'nin karbonsuzlaşma yol haritası dönüşümün takvimi ve coğrafyası (2020-2050)*. İstanbul: İstanbul Politikalar Merkezi, İPM-Sabancı Üniversitesi.
<https://ipc.sabanciuniv.edu/Content/Images/CKeditorImages/20211026-23105368.pdf>
- Tezel, M. N., Sarı, D., Özkurt, N., & Keskin, S. S. (2019). Combined nox and noise pollution from road traffic in Trabzon, Turkey. *Science of the Total Environment*, 696, 134044.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134044>
- Ticaret Bakanlığı. (2022). *Yeşil mutabakat yıllık faaliyet raporu*. Erişim tarihi: 16.10.2023.
<https://ticaret.gov.tr/data/643ffd6a13b8767b208ca8e4/YMEP%202022%20Faaliyet%20Raporu.pdf>
- Ticaret Bakanlığı. (2023). *Yeşil mutabakat*. Erişim tarihi: 16.10.2023. <https://ticaret.gov.tr/disiliskiler/yesil-mutabakat>
- TMMOB. (2022). *2022 Yılı Türkiye Hava Kirliliği Raporu*. Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği. Erişim tarihi: 26.10.2023. <https://www.cmo.org.tr/2022-yili-hava-kirliligi-raporu-yayinlandi>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2020). *Kişi başına düşen gayri saft yurtiçi hasıla (GSYH) oranları*. Erişim tarihi: 19.09.2023. <https://biruni.tuik.gov.tr/ilgosterge/?locale=tr>

- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2021a). *2021 yılı toplam nüfusları*. Erişim tarihi: 19.09.2023. <https://biruni.tuik.gov.tr/ilgosterge/?locale=tr>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2021b). *2021 yılı toplam otomobil sayıları*. Erişim tarihi: 19.09.2023. <https://biruni.tuik.gov.tr/ilgosterge/?locale=tr>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2022). Talep Yönetim Sistemi, Bilgi Dağıtım Grup Başkanlığı. <https://ty.tuik.gov.tr/Request/DetailRequest?reqId=/poZRi3rff8ZQmpF8wJbOin3GQJD6nx38i nMSf/E2jK8qM7zgVpQV90alzi6zcSj>
- Umutlu, H. (2023). Ekonomik büyüme ile karbondioksit emisyonları arasındaki ilişki: Azerbaycan örneği. *Journal of Economics and Political Sciences*, 3(2), 93-105.
- Uyumaz, A., Boz, F., Yılmaz, E., Solmaz, H., & Polat, S. (2017). Taşıt egzoz emisyonlarını azaltma yöntemlerindeki gelişmeler. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 15-24.
- World Health Organization (WHO). (2019). *WHO report on the global tobacco epidemic 2019*. Erişim tarihi: 25.07.2023. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/326043/9789241516204-eng.pdf?ua=1>
- World Health Organization (WHO). (2021). *WHO Global Air Quality Guidelines*. Erişim tarihi: 25.07.2023. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345334/9789240034433eng.pdf?sequence=1&is%20Allowed=y>
- Yakın, A., & Behçet, R. (2019). Van ili trafik kaynaklı hava kirlenmelerinin emisyon envanteri. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(3), 1567-1573. <https://doi.org/10.21597/jist.548606>
- Yalçınkaya, S. (2020). Katı atık toplama ve taşıma sisteminden kaynaklanan hava kirlenmelerini emisyonlarının mekânsal analiz teknikleri ile farklı araç kapasiteleri için hesaplanması: İzmir Çiğli örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(2), 366-376. <https://doi.org/10.21324/dacd.675605>
- Yazıcı, H., Akçay, M., Çay, Y., Sekmen, Y., Yılmaz, T., & Gölcü, M. (2010). Hava kirliliğinin doğal gaz kullanımı ile değişimi, Denizli İli örneği. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 9(3), 205-215.
- Zubair, M., Chen, S., Ma, Y., & Hu, X. (2023). A systematic review on Carbon Dioxide (CO₂) emission measurement methods under PRISMA guidelines: Transportation sustainability and development programs. *Sustainability*, 15(6), 4817. <https://doi.org/10.3390/su15064817>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Copras Yöntemi ile Karadeniz Bölgesi'nde Askeri Üs Bölgesi Seçimi

Ali KILIÇASLAN, Selen AVCI AZKESKİN*, Zerrin ALADAĞ

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 41001, Kocaeli, Türkiye
Ali KILIÇASLAN, ORCID No: 0000-0002-2072-5944, Selen AVCI AZKESKİN, ORCID No: 0000-0001-7433-5696, Zerrin ALADAĞ, ORCID No: 0000-0002-5986-7210

*Sorumlu yazar e-posta: selenavciem@gmail.com

Makale Bilgileri

Geliş: 18.03.2024
Kabul: 20.08.2024
Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1445417

Anahtar Kelimeler

Analytik Hiyerarşi Prosesi (AHP), Askeri üs yeri seçimi, COPRAS (Complex Proportional Assessment), Çok kriterli karar verme (ÇKKV), Karar destek sistemi

Öz: Askeri üsler, komutanlıklar ve içerisinde görev alan personelin barındığı, eğitim ve tatbikatların yapıldığı yerler olarak tanımlanabilir. Üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemiz için üs yeri seçimi oldukça önemli ve stratejik bir karardır. Bu çalışmada, ülkemizin çıkarlarını ve güvenliğini muhafaza etmek, doğalgaz kaynaklarının korunması ve oluşabilecek diğer tehditlere karşı Karadeniz Bölgesi'nde üs yeri seçimi amaçlanmıştır. Alternatif 12 limanın sosyokültürel yapıları analiz edilmiş ve uydu görüntüleri incelenerek coğrafi yapıları incelenmiştir. Literatür taraması ve uzman görüşü alınarak belirlenen 18 kriter "operasyonel" ve "stratejik" olarak sınıflandırılmıştır. Kriter ve alternatiflerin tespit edilmesinden sonra Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile kriterler ağırlıklandırılmış ardından bir başka ÇKKV yöntemi olan COPRAS (Complex Proportional Assessment) ile alternatifler sıralanmıştır. "Kanal derinliği" operasyonel olarak önem derecesi bakımından en yüksek öneme sahip kriter olarak değerlendirilmiştir. Stratejik olarak en önemli kriter ise "doğalgaz kaynaklarına uzaklık" olarak tespit edilmiştir. Operasyonel, stratejik ve genel sıralama ayrı ayrı elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Tüm sıralamalara göre en sondaki alternatif İnebolu olmuştur. En iyi alternatif ise operasyonel sıralamaya göre Karadeniz Ereğli, stratejik sıralamaya göre Samsun, genel sıralamaya göre Çamburnu olmuştur. Çalışmanın karar vericilere fayda sağlaması amaçlanmaktadır.

Military Base Location Selection for Black Sea Region with COPRAS Method

Article Info

Received: 18.03.2024
Accepted: 20.08.2024
Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1445417

Keywords

Analytic Hierarchy Process (AHP), COPRAS (Complex Proportional Assessment), Decision support system, Multi-criteria decision making (MCDM), Selection of military base locations

Abstract: Military bases can be defined as locations where command centers are situated, housing personnel, and serving as sites for training and exercises. Selecting a base location for our country, surrounded by seas on three sides, is a crucial and strategic decision. This study aims to choose a base location in the Black Sea Region to preserve our country's interests and security, protect natural gas resources, and address potential threats. The socio-cultural structures of twelve alternative ports have been analyzed, and their geographical features have been examined through satellite images. Eighteen criteria identified through literature review and expert opinions have been classified as "operational" and "strategic". After identifying the criteria and alternatives, the criteria were weighted using the Analytic Hierarchy Process (AHP), a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method, followed by ranking the alternatives using another MCDM method called Complex Proportional Assessment (COPRAS). "Channel depth" has been evaluated as the criterion with the highest importance regarding operational criteria. The most significant strategic criterion identified is the "distance to natural gas resources". Operational, strategic, and overall rankings

were obtained separately, and the results were compared and interpreted. In terms of all rankings, İnebolu has become the last alternative. The top alternative is Karadeniz Ereğli, according to operational ranking; Samsun, according to strategic ranking; and Çamburnu, according to the overall ranking. The study aims to provide benefits to decision-makers.

1. Giriş

Günümüzde, “güvenlik” ülkeler için en önemli konuların başında gelmektedir. Ülkeler, sınırlardan gelebilecek tehlikelere karşı önlem alabilmek için büyük harcamalar yapmaktadır. Ülkemiz, üç tarafı denizlerle çevrili bir ülke olarak stratejik açıdan çok önemli bir bölgede yer almaktadır. Komşu ülkelerdeki siyasi olaylar, enerji politikaları ve diğer politik ve ticari statüler gereğince denizlerimizin korunması gittikçe daha önemli bir hal almaktadır. Askeri üs, askeri personelin, ekipmanların ve operasyonların barındırıldığı ve desteklendiği tesislerdir. Bu üsler, hazırlık ve operasyonel yeteneklerin sürdürülmesi için kritik öneme sahip olup güvenli eğitim, lojistik ve stratejik planlama ortamları sağlar. Ulusal savunmada önemli bir rol oynayan askeri üsler, hızlı müdahale, askeri çabaların koordinasyonu ve operasyonların güvenliği ile etkinliğini sağlamada hayati öneme sahiptir. Ayrıca, silahlı kuvvetlerin operasyonel hazırlığını ve etkinliğini artırır. Bu çalışmanın amacı, Karadeniz Bölgesi'nde oluşabilecek tehditlere karşı enerji kaynaklarının refakat ve korunması maksadıyla üs yeri bölgesi seçimi yapmaktır.

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), birden fazla ve genellikle birbiriyle çelişen kriterlerin olduğu durumlarda karar vermeye yardımcı olarak geliştirilmiş yöntemlerdir. Literatürde ÇKKV yöntemleri farklı alanlardaki karar problemlerine başarıyla uygulanmıştır. Çalışmada, üs yeri seçimi birçok unsurun göz önünde bulundurularak verilmesi gereken stratejik bir karar olarak bir ÇKKV problemi olarak ele alınmış ve bu kararın objektif şekilde verilmesi amaçlanmıştır. Literatürde farklı ÇKKV yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları kriterlerin ağırlıklandırılması bazıları da alternatiflerin sıralanması için kullanılır. Çalışmada, kriter ağırlıklandırma için Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve alternatiflerin sıralanması için COPRAS (Complex Proportional Assessment) yöntemleri kullanılmıştır.

COPRAS yöntemi literatürde farklı seçim problemlerine başarıyla uygulanmıştır. Örneğin; [Fouladgar ve ark. \(2012\)](#) madencilikte uygulanabilir bakım stratejilerini değerlendirmek için COPRAS ve bulanık AHP yöntemlerini kullanmıştır. [Popovic ve ark. \(2012\)](#) tarım ve inşaat üretimi yapan bir firma için tedarikçi performans değerlendirmesi için COPRAS yöntemini kullanmıştır. [Özdağoğlu \(2013\)](#) makine alımları için bir karar destek sistemi kurulması amacıyla COPRAS yöntemiyle 38 farklı pres makinasını karşılaştırmıştır. [Madić ve ark. \(2014\)](#) yatırım projelerini finansal analiz kriterlerine dayalı olarak COPRAS ve COPRAS-G yöntemleri ile değerlendirmiştir. [Aksoy ve ark. \(2015\)](#) enerji ihtiyacını karşılayabilecek aktif kömür rezervlerinin daha etkin kullanılması ve enerjide dışa bağımlılığın en aza indirilmesi için çevresel faktörleri de dâhil ederek Türkiye'de bulunan 8 kömür işletmesinin etkinliklerini AHP temelli COPRAS ve MULTIMOORA (The Multi- Objective Optimization by Ratio Analysis) yöntemleri ile incelemiştir. [Ömürbek & Eren \(2016\)](#) gıda sektöründe yer alan bir firmanın 2005-2014 arasındaki finansal performansını 13 önemli ekonomik kriter ile COPRAS, MOORA ve PROMETHEE (The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) yöntemleri ile değerlendirmiştir. [Sarıçalı & Kundakçı \(2016\)](#) tatil için bölge ve otel seçimine yardımcı olmak amacıyla COPRAS yöntemini kullanmıştır. Çalışmada; zaman, maliyet, konfor gibi kriterler AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. [Mahdiraji ve ark. \(2018\)](#) çevresel sürdürülebilirlik temasında İran mimarisinde temel faktörlerin belirlenmesi ve en uygun çağdaş mimari alternatifinin belirlenmesi için En İyi-En Kötü (BWM) ve COPRAS yöntemlerini kullanmıştır. [Topak & Çanakçıoğlu \(2019\)](#) Türkiye'de bulunan 11 mevduat bankasının ekonomik performanslarını Entropi ve COPRAS yöntemleri ile değerlendirmiştir. [Karabulut \(2023\)](#) son yıllarda temiz enerji ve düşük yakıt maliyeti ile önem kazanan elektrikli motosiklet seçimi için COPRAS yöntemini tercih etmiştir. COPRAS yer seçimi problemlerinde de kullanılmıştır. [Mishra ve ark. \(2024\)](#) elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi için COPRAS yönteminden faydalanmıştır. [Yıkın & Özcan \(2024\)](#), Kapıkule-Kars arasında demiryolunun karayolu kavşak noktalarıyla kesiştiği 31 nokta ile bir şebeke oluşturarak güzergâh seçimini etkileyecek 6 kriteri pisagor bulanık AHP ile ağırlıklandırmış ve alternatifleri COPRAS ile alternatifler sıralanmıştır.

Literatürde üs seçiminin farklı ÇKKV teknikleriyle değerlendirildiği bazı çalışmalar mevcuttur. [Aryee ve ark. \(2015\)](#), deniz altı mühendislik şirketlerine karar desteği sağlamak amacıyla Gana'da açık deniz destek üssü için en uygun konumun seçimini AHP ile gerçekleştirmiştir. Çalışmada ana kriterler; “rıhtım kenarı tesisi”, “su derinliği”, “arsa büyüklüğü” ve “işletme maliyeti” olarak belirlenmiştir. [Caruzzo ve ark. \(2016\)](#), Brezilya Donanması için yeni bir deniz üssünün seçiminde kriter ve alternatifleri belirlemiş ve kriterleri stratejik ve operasyonel olarak ayrılarak hiyerarşik olarak düzenlemiştir. Çalışmada, Karayip bölgesine uzaklık, Afrika'nın batı kıyısına uzaklık, deniz kontrolü, yakınlardaki önemli ekonomik altyapı ve tesisler, yakın ticari limanlardaki denizcilik faaliyetleri, en yakın başkente uzaklık, gelgit değişimi, kanal derinliği, yerel altyapı gibi alt kriterler kullanılmıştır. Sonuç olarak çok kriterli yaklaşımın, stratejik ve operasyonel kriterler arasındaki dengeyi sağlamak ve karar verme sürecine yardımcı olmak için değerli bir araç olduğu görülmüştür. [Stimers & Lenagala \(2017\)](#), Sri Lanka ordusunda askeri karar verme süreçlerine yardımcı olmak için üs seçiminde coğrafi bilgi sistemi (CBS) temelli AHP'den yararlanmıştır. Çalışmada kullanılan kriterler; iletişim ağı kapsamı, toprak türü, yüzey suyu miktarı, kamp bölgeleri, yol alanı, nüfus ve rakımdır. [Sennaroglu & Celebi \(2018\)](#), askeri havaalanı yer seçimi için iklim, coğrafya, altyapı, güvenlik, ulaşım gibi gereksinimlerin yanı sıra çevresel ve sosyal etkileri de dikkate alınarak dokuz ana kriter ve otuz üç alt kriter belirlemiştir. Kriter ağırlıklarının AHP ile hesaplandığı çalışmada dört alternatifin sıralama ve seçim işlemleri PROMETHEE ve VIKOR yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca PROMETHEE ve VIKOR yöntemlerinin sonuçları COPRAS, MAIRCA ve MABAC yöntemlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin sıralamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı korelasyonlar hesaplanmış ve buna dayalı olarak PROMETHEE, VIKOR (VIseKriterijumsa Optimizacija I Kompromisno Resenje), COPRAS, MAIRCA (MultiAtributive Ideal-Real Comparative Analysis) ve MABAC (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison) yöntemlerinin yer seçimi problemlerinde başarıyla kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. [AsghariSaraskanroud ve ark. \(2019\)](#), Batı Azerbaycan'da askeri üslerin inşası için en uygun konumların analizi için öncelikle ArcGis yazılımı kullanarak arazi yapıları ve diğer verileri analiz etmiş ardından kriterleri Analitik Ağ Prosesi (ANP) ile değerlendirmiştir. [Purnomo ve ark. \(2020\)](#), Endonezya donanması için üs yeri seçiminde Sistem ve Yorumlayıcı Yapısal Modelleme (ISM) yaklaşımını kullanmış ve yer seçiminde etkili olabilecek 4 ana kriter ve 15 alt kriter arasında neden-sonuç ilişkisi kurmayı amaçlamıştır. [Cegan & Golan \(2021\)](#), ABD ordusu askeri üs kampları için en uygun alanın belirlenmesi amacıyla coğrafi, sosyoekonomik ve lojistik kriterleri bir arada değerlendirebilecek bir ÇKKV yöntemi önermişlerdir. Çalışmada kullanılan kriterler; nüfus, düşman/tehdit, girişim/sinyal, yollar, yerel tesisler, eğitim, toprak, arazi örtüsü, akifer (aquifer) erişimi ve arazi kullanımıdır. [Bojer ve ark. \(2023\)](#), Etiyopya'nın Adea Bölgesi'nde stratejik askeri alan uygunluğunu AHP, CBS ve makine öğrenme algoritmalarını kullanarak belirlemiştir. Çalışmada makine öğrenmesi yöntemleri, uydu görüntü verilerinden bilgiyi filtreleme, yorumlama ve tahmin etme amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada ana kriterler; fiziksel, çevresel ve güvenlik olarak belirlenmiştir. Alt kriterler ise rakım, eğitim, dağlık alanlar, jeoloji, toprak, yıllık yağış, nokta yüksekliği, arazi kullanımı ve arazi örtüsü, su kaynağına yakınlık, havaalanına yakınlık, karayollarına ve demiryoluna yakınlık, istasyonlar ve yerleşim alanına yakınlıktır. [Bilgin ve ark. \(2024\)](#), askeri üs yeri seçiminde dikkate alınması gereken kriterlerin belirlenmesini amacıyla nütrosifik AHP yöntemini kullanmıştır. Üç uzmanın görüşünün alındığı çalışmada fikir birliği sağlamak için Delphi yöntemi kullanılmıştır. Belirlenen ana kriterler; stratejik konum, güvenlik, iklim ve coğrafya ve yapı özellikleridir. Stratejik konum ana kriteri altında; sınır çizgisine yakınlık, coğrafi engellerin olmaması ve lojistik erişim kolaylığı alt kriterleri belirlenmiştir. Güvenlik ana kriteri altında; tehditlere yakınlık, doğal barikatların varlığı ve istihbarat ağının etkinliği kriterleri incelenmiştir. İklim ve coğrafya ana kriterinin alt kriterleri hava koşulları, topografya, arkeolojik ve yerleşim alanlarına uzaklık seçilmiştir. Son olarak, yapı özellikleri ana kriterinin alt kriterleri; arazi yapısı, altyapı tesisleri ve doğal kaynakların mevcudiyetidir.

Çalışmada, Türkiye'de Karadeniz Bölgesi'nde üs yeri seçimi literatür taraması ve uzman görüşleri doğrultusunda 12 tanesi stratejik, 6 tanesi operasyonel olmak üzere toplam 18 adet kriter ve alternatif olarak 12 liman belirlenmiştir. Kriterler AHP ile ağırlıklandırılmış ve alternatifler COPRAS ile operasyonel, stratejik ve genel olmak üzere 3 şekilde sıralanmıştır. Problem çözümünden elde edilen sonuçlar Deniz Kuvvetleri Komutanlığı için öneri niteliğindedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi

Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), Saaty (1971) tarafından karar verme problemlerini çözmek amacıyla tanıtılmıştır. AHP, karar vericilerin karmaşık problemleri hiyerarşik bir yapı içinde modellemelerine ve bu yapı aracılığıyla alternatifleri sistematik bir şekilde değerlendirmelerine olanak tanır (Saaty, 1980a). AHP, karar verme sürecini üç ana bileşene ayırır: hedefler, kriterler ve alternatifler. Bu bileşenler, hiyerarşik bir yapıda organize edilerek karar vericilerin farklı seviyelerdeki faktörleri karşılaştırmalarını ve önem derecelerini belirlemelerini sağlar. AHP'nin temelinde yer alan ikili karşılaştırmalar, her bir kriterin ve alternatifin göreceli önemini belirlemek için kullanılır ve bu sayede tutarlı ve mantıklı bir karar verme süreci elde edilir (Wind & Saaty, 1980).

AHP, grup kararları veya bireysel tercihlerin, deneyim, sezgi, bilgi ve fikirlerin karar verme sürecine dâhil edilebileceği karmaşık problemlerin çözümü için kullanılmaktadır. Yöntem adımları aşağıda kısaca verilmiştir (Kumar & Pant, 2023).

1. Problemin tanımlanması: Problemin amacı doğrultusunda alternatifler, kriterler ve alt kriterler açık bir şekilde tanımlanmalıdır.

2. Hiyerarşik yapının oluşturulması: Hiyerarşinin üst seviyesinde “hedef” bulunur. Bunun altında ise ana kriterler ve alt kriterler bulunur. Hiyerarşinin en alt seviyesinde ise alternatifler mevcuttur. Hiyerarşi inşaa edilirken, aynı seviyede bulunan elemanların birbirlerinden bağımsız olduğu kabul edilir.

3. İkili karşılaştırmaların yapılması: Bu aşamada karar vericilere anketler uygulanmakta ve kriterlerin ya da alternatiflerin Tablo 1’de gösterilen 1-9 skalasına göre ikili olarak karşılaştırılması istenmektedir.

Çizelge 1. 1-9 Tercih Skalası

Önem Değerleri	Değer Tanımları
1	Eşit önemde
3	Biraz Daha Önemli (Az Üstünlük)
5	Oldukça Önemli (Fazla Üstünlük)
7	Çok Önemli (Çok Üstünlük)
9	Son Derece Önemli (Kesin Üstünlük)
2, 4, 6 ve 8	Ara Değerler (Uzlaşma Değerleri)

4. Karar verici değerlendirmelerinin birleştirilmesi: Birden fazla karar verici olması durumunda karar vericilerin ikili karşılaştırma matrisleri birleştirilmelidir. Bunun için çoğunluğun kararı yaklaşık çözüm olarak ortak karar olarak belirlenebilir, özdeğer metodu (eigenvalue method) kullanılabilir ya da bu çalışmada tercih edildiği gibi matrislerin geometrik ortalaması alınabilir. Geometrik ortalama, farklı oranların ortalamasını hesaplamak için uygundur. Geometrik ortalama yönteminde, k . uzmanın i . kriter ile j . kriteri karşılaştırma değeri a_{ij}^k olmak üzere n adet uzmanın ortak kararı Eşitlik (1) ile tek bir değere indirgenir.

$$a_{ij} = [a_{ij}^1 * a_{ij}^2 * \dots * a_{ij}^n]^{1/n} \quad (1)$$

5. İkili karşılaştırma matrislerinin normalize edilmesi: Eşitlik (2) kullanılarak ikili karşılaştırma matrisleri normalize edilir. Burada a_{ij}' ikili karşılaştırma matrisindeki normalize edilmiş değerdir.

$$a_{ij}' = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

6. Öncelik vektörünün hesaplanması: Eşitlik (3) kullanılarak öncelik vektörü hesaplanır ve n kriter sayısı olmak üzere ölçütlerin birbirlerine göre önem seviyelerini (W) gösteren yüzde önem dağılımları bulunmuş olur.

$$W_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{j=1}^n a_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

7. Tutarlılık oranının hesaplanması: İkili karşılaştırma matrislerinin tutarlılığının hesaplanması gerekmektedir. Bunun için öncelikle Eşitlik (4) kullanılarak Tutarlılık İndeksi (Consistency Index-CI) hesaplanır.

$$CI = \frac{\lambda_{maks} - n}{n - 1} \quad (4)$$

Ardından, Eşitlik (5) kullanılarak en büyük özdeğer λ_{maks} hesaplanır.

$$\lambda_{maks} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} W_j}{W_i} \right) \quad (5)$$

Tutarlılığı hesaplayabilmek için “Rassal İndeks (Random Index-RI)” değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Kriter sayısına göre kullanılması gereken RI değerleri Çizelge 2’de gösterilmiştir (Saaty, 1980b).

Çizelge 2. Rassal İndeks (Random Index-RI) değerleri

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53	1.56	1.57	1.59

Son olarak Eşitlik (6) kullanılarak “Tutarlılık Oranı (Consistency Ratio-CR)” hesaplanır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

CR'nin 0,10'dan büyük çıkmaması halinde karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu söylenebilir. CR 0,10'dan büyük ise karar vericilerden matrisleri gözden geçirmeleri istenir.

2.2. COPRAS (Complex Proportional Assessment) yöntemi

Karmaşık oransal değerlendirme anlamına gelmekte olan COPRAS (Complex Proportional Assessment) yöntemi [Zavadkas & Kaklauskas \(1996\)](#) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Yöntemin amacı, alternatiflerin önem ve fayda dereceleri bakımından değerlendirilmesi ve sıralanmasıdır. A_i , i . alternatif, C_j , j . değerlendirme kriteri, w_j , j . değerlendirme kriterinin ağırlığı ve x_{ij} , değerlendirme kriteri açısından i . alternatifin değeri olmak üzere yöntemin adımları aşağıda kısaca açıklanmıştır ([Hezam ve ark., 2023](#)):

1. Karar matrisinin oluşturulması

x_{ij} değerlerinden oluşan karar matrisi belirlenir. Matriste, Eşitlik (7)'de görüldüğü üzere kriterler satır kısmında, alternatifler ise sütun kısmında bulunur.

$$D = \begin{matrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{matrix} \quad (7)$$

2. Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulması

Eşitlik (8) kullanılarak normalize edilmiş karar matrisi elde edilir. Burada x_{ij}^* normalize edilmiş değerleri gösterir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad \forall j = 1, 2, 3, 4, 5 \dots n \quad (8)$$

3. Ağırlıklandırılmış karar matrisinin oluşturulması

Eşitlik (9) ile ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi oluşturulur. Burada, d_{ij} ağırlıklandırılmış değer, w_j ise kriter ağırlığıdır. Kriter ağırlıkları eşit kabul edilebilir, subjektif olarak değerlendirilebilir ya da başka bir ÇKKV yöntemiyle elde edilebilir.

$$D' = d_{ij} = x_{ij}^* \cdot w_j \quad (9)$$

4. Fayda ve maliyet ölçütlerinin hesaplanması

Değerinin yüksek olması istenen kriterler “fayda”, değerinin düşük olması istenen kriterler “maliyet” kriteri olarak adlandırılır. Bu adımda, fayda ve maliyet kriterleri için ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisindeki değerlerin toplamı sırasıyla Eşitlik (10) ve Eşitlik (11) kullanılarak hesaplanır.

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^k d_{ij} \quad j=1, 2, 3, \dots, k \quad (10)$$

$$S_i^- = \sum_{j=k+1}^n d_{ij} \quad j=k+1, k+2, k+3, \dots, n \quad (11)$$

5. Seçeneklerin göreceli öneminin hesaplanması

Alternatifler için Eşitlik (12) yardımıyla göreceli önem değeri (Q_i) hesaplanır. Elde edilen en yüksek Q_i değeri en iyi alternatifi göstermektedir.

$$Q_i = S_i^+ + \frac{\sum_{i=1}^m S_i^-}{S_i^- \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_i^-}} \quad (12)$$

6. En yüksek göreceli önem değerlerinin hesaplanması

Göreceli öncelik değerleri arasından en büyük değere sahip olan bulunur.

$$Q_{maks} = \text{en yüksek } \{ Q_i \} \quad \forall j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

7. Alternatiflerin fayda derecelerinin belirlenmesi

Eşitlik (14) kullanılarak her bir alternatif için performans indeksi (P_i) hesaplanır.

$$P_i = \frac{Q_i}{Q_{maks}} \cdot 100 (\%) \quad (13)$$

3. Bulgular

Bu çalışmada, Türk Deniz Kuvvetlerine katkı sağlamak amacıyla Karadeniz’de üs yeri seçimi yapılmıştır. Çalışmada kriterler belirlenirken Aryee ve ark. (2015), Caruzzo ve ark. (2016), Stimers & Lenagala (2017), Sennaroglu & Celebi (2018), AsghariSaraskanroud ve ark. (2019), Cegan & Golan (2021), Bojer ve ark. (2023), Bilgin ve ark. (2024) çalışmaları incelenmiş ve karar vericilerin görüşleri doğrultusunda probleme daha uygun olduğundan Caruzzo ve ark. (2016)’nın modeli temel alınmıştır. Ancak, kriterler ülkemizin iç dinamiklerine göre düzenlenmiştir. Örneğin; Caruzzo ve ark. (2016)’nın modelinde Brezilya İlan donanması üs yerinin okyanusa kıyısı olduğu için “gelgit” önemli bir kriter olarak belirlenmiştir. Ülkemizin okyanusa kıyısı olmadığı için gelgit olayının az olacağı öngörülmüş bu nedenle kriter olarak değerlendirilmemiştir. Kriterler bu şekilde Deniz Kuvvetlerinden yetkililer ile görüşülerek belirlenmiştir. Ardından kriterler “stratejik” ve “operasyonel” olarak gruplandırılmıştır. Kriter ağırlıkları AHP yöntemi ile hesaplanmış ve belirlenen alternatifler COPRAS yöntemi ile üç farklı şekilde sıralanmıştır. Çalışmanın, üs yeri belirleme sürecinde karar vericilere bakış açısı kazandırması amaçlanmıştır.

3.1. Alternatiflerin belirlenmesi

Alternatiflerin tümü uzman görüşleri ile belirlenmiş ve özellikleri yine aynı uzmanlar tarafından değerlendirilerek kontrol edilmiştir. Söz konusu alternatifler aşağıda uydu görüntüleri ile kısaca açıklanmıştır.

Şekil 1'de yer alan İğneada, Kırklareli'nin bir beldesi olup Trakya'nın Karadeniz sahilindedir. Kırklareli merkeze 100 kilometre uzaklıkta olan bölge 22 kilometrelik bir sahile sahiptir. Doğal koruma özelliğine sahip bir limanı olan bölgede ticari liman ve havaalanı bulunmamaktadır. Limandaki kanal derinliği 5 metredir.



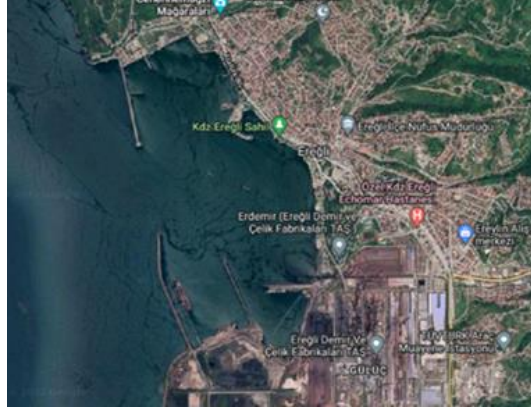
Şekil 1. İğneada Limanı (Google Earth, 2023).

Şekil 2'de Batı Karadeniz Bölgesi'nde, Düzce iline bağlı bir ilçede yer alan Akçakoca Limanı gösterilmiştir. Bölge, Ankara ve İstanbul gibi büyük şehirlere karayolu ile 3 saatlik mesafede olup 35 kilometrelik sahile sahiptir. Tarihi ve coğrafi durumu ile turistlerin ilgisini çeken bölge ticari bir limana da sahiptir. Ancak bölgede korunaklı bir yapı bulunmamaktadır ve eğitim imkânları üst seviyede değildir. Havaalanı bulunmayan bölgenin limandaki kanal derinliği 4 metredir.



Şekil 2. Akçakoca Limanı (Google Earth, 2023).

Şekil 3'te gösterilen Karadeniz Ereğli Limanı Zonguldak il sınırları içerisinde bulunur. 80 kilometrelik sahile sahip bölgede Türkiye'nin en büyük limanları ve balıkçı barınakları ile uluslararası nitelikte tersaneler bulunmaktadır. Bölge, sahip olduğu fabrikalarla istihdam da sağlamaktadır. Askeri güç olarak iyi düzeyde olup doğal yapısı gereği güvenlidir. Limandaki kanal derinliği 10 metre civarındadır.



Şekil 3. Ereğli Limanı (Google Earth, 2023).

Şekil 4'te Zonguldak il merkezine 25 kilometre uzaklıkta Karadeniz kıyısında kurulu bir yerleşim olan Filyos Limanı gösterilmiştir. Bölgede Türkiye'nin en büyük sanayi komplekslerinden biri olması planlanan Filyos vadisi projesi yürütülmektedir. Proje, Karadeniz'de yeni keşfedilen gaz rezervlerinin taşımacılığı için kullanılacaktır. Bölgede ticari liman bulunmakta ancak havaalanı bulunmamaktadır. Limandaki kanal derinliği 10 metredir.



Şekil 4. Filyos Limanı (Google Earth, 2023).

Şekil 5'te yer alan Amasra Limanı, Batı Karadeniz Bölgesi'nde Bartın iline bağlı olup Başkent Ankara'ya yakındır. Ticari liman ve havaalanına sahip değildir. Karadeniz fay hattı üzerinde bulunan limandaki kanal derinliği 7.5 metre olup liman doğalgaz rezervlerine yakındır.



Şekil 5. Amasra Limanı (Google Earth, 2023).

Şekil 6'da Karadeniz Bölgesi'nde Kastamonu'da yer alan İnebolu Limanı gösterilmiştir. Kastamonu şehir merkezine 89 kilometre uzaklığındadır. Ticari liman ve havaalanı bulunmayan bölge Karadeniz fay hattı üzerinde bulunur. Korunaklı bir yapı ve askeri güç bakımından üst düzeyde değildir. Limandaki kanal derinliği 3.5 metre civarındadır.



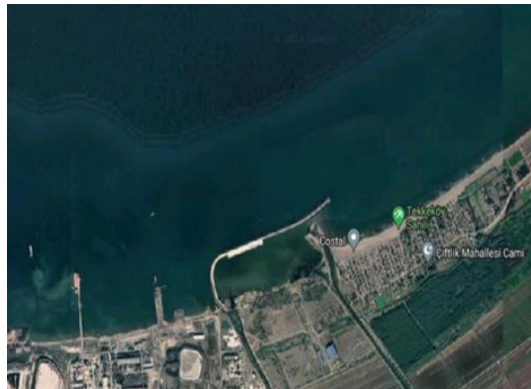
Şekil 6. İnebolu Limanı (Google Earth, 2023).

Şekil 7'de Orta Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Sinop Limanı gösterilmiştir. Güvenli bir lokasyona sahip olan bu liman açıkta olduğu için fırtına riski barındırır. Ticari limana sahiptir ancak havaalanına sahip değildir. Limandaki kanal derinliği 5 metre civarındır.



Şekil 7. Sinop Limanı (Google Earth, 2023).

Şekil 8'de gösterilen Samsun Limanı Türkiye'nin en büyük limanıdır. Karadeniz'de demiryolu bağlantısı olan tek limandır ve güvenli bir lokasyona sahiptir. Ticari limanı ve havaalanı bulunmaktadır. Bölgenin yakınından fay hattı geçmektedir ve limandaki kanal derinliği 7.5 metre civarındır.



Şekil 8. Samsun Limanı (Google Earth, 2023).

Şekil 9'da Ordu ilinde yer alan Ünye Limanı gösterilmiştir. Altınordu'ya 63 kilometre, Samsun merkeze ise 87 kilometre uzaklıkta bulunur. Ticari liman ve havaalanına sahiptir. Güvenli bir lokasyonda bulunmayan limandaki kanal derinliği yaklaşık 3 metredir.

Şekil 10'da gösterilen Görele Limanı, Giresun ilinin kuzeydoğusunda bulunur ve Giresun il merkezine 63 kilometre uzaklıktadır. Ticari liman ve havaalanına sahip değildir. Doğası ile görülmesi

gereken bir yer olan limanın askeri olarak güvenli bir lokasyonda olduğu söylenemez. Limanın kanal derinliği 5 metre civarındır.

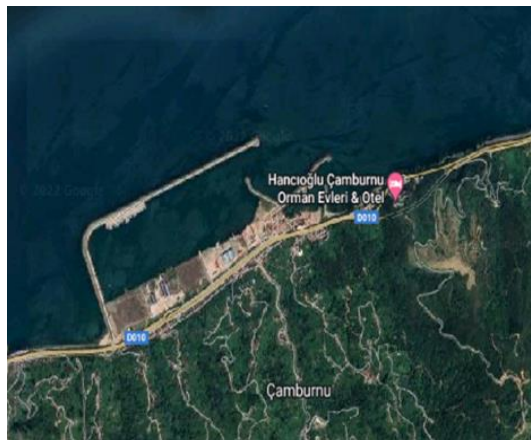


Şekil 9. Ünye Limanı (Google Earth, 2023).



Şekil 10. Görele limanı (Google Earth, 2023).

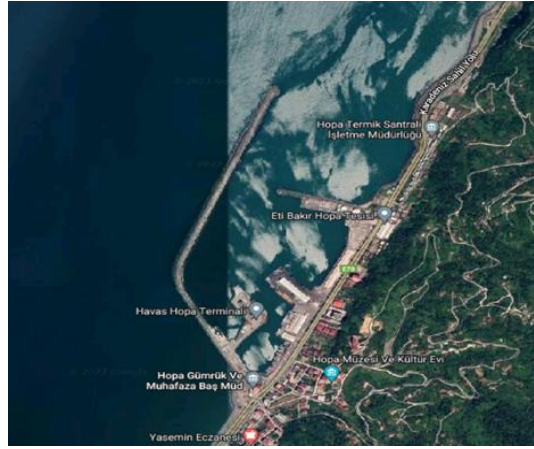
Şekil 11'de gösterilen Çamburnu, Trabzon ilinin Sürmene ilçesine bağlı olup Trabzon iline 49 kilometre, Sürmene ilçesine ise 6 kilometre uzaklıkta bulunur. Anadolu'nun ilk ticaret odası; denizcilik, deniz ticareti ve tersanecilikten kaynaklanan zengin bir alt yapıdan dolayı burada kurulmuştur. Ticari liman ve havaalanına sahiptir. Askeri güç bakımından kuvvetli durumdadır. Limanın kanal derinliği 10 metre civarındır.



Şekil 11. Çamburnu (Google Earth, 2023).

Şekil 12'de yer alan Hopa limanı Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Artvin iline bağlıdır. Gürcistan sınır kapısına yaklaşık 20 kilometre uzaklıktadır. Bölgede, ticari liman olarak

yurtdışına maden sevki yapılır. Havaalanı yoktur ancak Batum Havaalanı'na 35 kilometre uzaklıktadır. Güvenli bir lokasyonda yer alır ve askeri güç bakımında iyi düzeydedir. Limanın kanal derinliği 10 metre civarındadır.



Şekil 12. Hopa limanı (Google Earth, 2023).

3.2. Kriterlerin belirlenmesi ve ağırlıklarının hesaplanması

Askeri kararlar taktiksel, operasyonel, stratejik ve grand stratejik olarak ayrılabilir. Grand stratejik kararlar bir ülkenin önündeki 50-100 seneyi kapsar ve bu çalışmaya konu olan probleme göre daha uzun vadeli. Taktiksel kararlar ise üs bölgesi seçildikten sonra verilecek kararlarla ilgilidir. Bu bağlamda üs yeri seçiminin stratejik ve operasyonel bir karar olduğu düşünülmüştür. Buna göre üs yeri seçimi için 18 kriter belirlenmiş olup aşağıda kısaca açıklanmıştır:

- *Novorossiysk limanına uzaklık:* Rusya'nın Karadeniz kıyısında bulunan liman kentidir. Rusya Federasyonu Deniz Kuvvetleri'nin Karadeniz Filosunun karargâhının Sivastopol'dan Novorossiysk'e taşınması için hazırlık yapılmaktadır.
- *Sivastopol limanına uzaklık:* Coğrafi konumu sayesinde, stratejik bir liman olmuştur. Sovyet Deniz Kuvvetleri'nin Karadeniz Filosunun deniz üssü olan bölge günümüzde Rusya Deniz Kuvvetleri tarafından kullanılmaktadır.
- *Odessa limanına uzaklık:* Ukrayna'nın en önemli liman kentidir. Jeopolitik konumu bakımından Karadeniz'in incisi olarak bilinir.
- *Poti limanına uzaklık:* Gürcistan'ın Doğu Karadeniz kıyılarında büyük bir limandır.
- *Varna limanına uzaklık:* Bulgaristan'ın en büyük limanıdır.
- *İstanbul boğazına uzaklık:* Jeopolitik konumu bakımından ülkemizin en önemli bölgelerindendir.
- *Ankara'ya uzaklık:* Deniz Kuvvetleri Ana Karargâhı Ankara'da bulunur.
- *Doğalgaz kaynaklarına uzaklık:* Ülkemizin geleceği için çok önemli olan bölgeleri güvende tutmak amacıyla probleme dâhil edilmiştir.
- *Sivil yapılara uzaklık:* Seçilecek üs bölgesinin sivil yapılara uzaklığı probleme dâhil edilmiştir.
- *İkmal faaliyetleri:* Çalışan personel ve gemilerin ihtiyaçlarının karşılanması bakımından önemlidir.
- *Eğitim imkânları:* Bölgedeki halk ve personelin eğitim ihtiyaçlarının karşılanabilmesi gerekmektedir.
- *Enerji altyapısı:* Üs kurulacak bölgede enerji ihtiyacı fazla olacaktır.
- *Kanal derinliği:* Limana yanaşabilecek olan gemilerin tespit edilmesini sağlar.
- *Askeri güç:* Hava Kuvvetleri üslerine uzaklığı, hava savunma füze bataryalarına mesafesi ve Kara Kuvvetlerinin tugay ve üstü birliklere mesafesi dikkate alınmıştır.
- *Lokasyon güvenliği:* İskelenin açık-kapalı olması, doğal bir korumaya sahip olmaması gibi özelliklerin değerlendirilmesidir.

- *Ticari liman*: Olası harp durumunda lojistikte oluşabilecek problemler için önemlidir.
- *Hava yollarına uzaklık*: Seçilecek üs bölgesinin hava yollarına uzaklığı ulaşım için önemli bir kriter olduğundan probleme dâhil edilmiştir.
- *Deprem riski*: Üs bölgesinin fay hattı üzerinde olmaması dikkate alınmıştır.

Yukarıda açıklanan kriterler “stratejik” ve “operasyonel” olarak sınıflandırılmıştır. Söz konusu stratejik kriterler; Poti limanına uzaklık, Novorossiysk limanına uzaklık, Odessa limanına uzaklık, Varna limanına uzaklık, Sivastopol’a uzaklık, İstanbul Boğazına uzaklık, Ankara’ya uzaklık, doğalgaz kaynaklarına uzaklık, ikmal faaliyetleri, eğitim imkânları, enerji altyapısı ve sivil yapılara uzaklık olarak belirlenmiştir. Operasyonel kriterler ise; kanal derinliği, askeri güç, lokasyon güvenliği, ticari liman, hava yollarına uzaklık ve deprem riskidir.

AHP yönteminde hiyerarşinin herhangi bir bölümünde en fazla 9 (7+2) kriter/alternatif olması önerilmektedir (Saaty & Ozdemir, 2003). Çalışmada, 12 stratejik kriter bulunmaktadır. Ancak bu kriterlerden dokuz adedi limanlara veya yapılara uzaklık kriteridir. Uzaklığı tek bir kriter olarak almanın elde edilecek sonucu gerçeklikten uzaklaştıracağı düşüncesi ile ve ikili karşılaştırma matrislerinin alanında uzman üç asker tarafından oldukça dikkatli bir şekilde doldurulması sebebiyle kriter sayısı azaltılamamıştır.

Ana kriterler ve alt kriterler Albay, Yarbay ve Binbaşı rütbesinde bulunan 3 subay tarafından gerçekleştirilen ikili karşılaştırmalar ile AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Tüm ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlılıkları Eşitlik (3), (4), (5) ve (6) kullanılarak hesaplanmış ve 0.1’den küçük bulunmuştur. Çizelge 2’ye göre ana kriterler için kullanılan *RI* değeri 0, stratejik kriterler için kullanılan *RI* değeri 1.53 ve operasyonel kriterler için kullanılan *RI* değeri 1.24’tür.

Uzmanların ikili karşılaştırma matrisleri geometrik ortalamalar alınarak birleştirilmiştir. Geometrik ortalaması alınan ikili karşılaştırma matrislerinin de tutarlılık oranı hesaplanmış olup Çizelgeler üzerinde belirtilmiştir. Kriter ağırlıkları ana kriterler için Çizelge 3’te gösterilmiştir. Stratejik kriterler için yerel kriter ağırlıkları Çizelge 4’te ve operasyonel kriterler için yerel kriter ağırlıkları Çizelge 5’te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Ana kriter ağırlıkları

İkili Karşılaştırma Matrisi			Kriter Ağırlıkları	Tutarlılık oranı
Askeri Üs Bölgesi Seçimi	Stratejik	Operasyonel		
Stratejik	1.00	2.00	0.6667	0.00
Operasyonel	0.50	1.00	0.3333	

Çizelge 4. Stratejik kriterler için yerel ağırlıklar

Stratejik Kriterler	İkili Karşılaştırma Matrisi												Yerel Kriter Ağırlıkları	Tutarlılık oranı
	SK ₁	SK ₂	SK ₃	SK ₄	SK ₅	SK ₆	SK ₇	SK ₈	SK ₉	SK ₁₀	SK ₁₁	SK ₁₂		
SK ₁	1.00	1.00	0.33	0.21	0.50	0.12	0.11	1.00	1.00	0.33	0.33	0.20	0.0259	0.10
SK ₂	1.00	1.00	0.33	0.33	0.50	0.20	0.11	1.00	1.00	0.33	0.33	0.20	0.0269	
SK ₃	3.00	3.00	1.00	1.00	1.00	0.15	0.11	0.20	1.00	1.71	0.33	0.50	0.0536	
SK ₄	3.00	3.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.11	0.17	0.50	0.11	0.21	0.20	0.0314	
SK ₅	2.00	2.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.11	1.00	1.00	0.20	0.25	0.33	0.0339	
SK ₆	7.00	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00	0.33	3.03	3.03	1.00	1.00	1.00	0.1279	
SK ₇	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	3.00	1.00	5.00	5.00	1.00	1.00	3.03	0.2314	
SK ₈	1.00	1.00	5.00	2.00	1.00	0.33	0.20	1.00	1.00	0.33	0.33	0.50	0.0488	
SK ₉	1.00	1.00	1.00	2.00	1.00	0.33	0.20	1.00	1.00	0.33	0.33	0.50	0.0382	
SK ₁₀	3.00	3.00	3.00	9.00	5.00	1.00	1.00	3.00	3.00	1.00	1.00	3.03	0.1445	
SK ₁₁	3.00	3.00	3.00	9.00	4.00	1.00	1.00	3.00	3.00	1.00	1.00	0.33	0.1237	
SK ₁₂	5.00	5.00	2.00	5.00	3.00	1.00	0.33	2.00	2.00	0.33	3.00	1.00	0.1139	

Çizelge 5. Operasyonel kriterler için yerel ağırlıklar

Operasyonel kriterler	İkili Karşılaştırma Matrisi						Yerel Kriter Ağırlıkları	Tutarlılık oranı
	OK ₁	OK ₂	OK ₃	OK ₄	OK ₅	OK ₆		
OK ₁	1.00	5.00	3.03	6.25	5.00	5.00	0.4492	0.03
OK ₂	0.20	1.00	3.03	5.00	3.03	3.03	0.2245	
OK ₃	0.33	0.33	1.00	3.03	1.00	1.00	0.1071	
OK ₄	0.16	0.20	0.33	1.00	0.31	0.50	0.0438	
OK ₅	0.20	0.33	1.00	2.00	1.00	1.00	0.0878	
OK ₆	0.20	0.33	1.00	2.00	1.00	1.00	0.0878	

Çizelge 2'ye göre stratejik kriterlere 0.67, operasyonel kriterlere ise 0.33 önem verilmiştir. Buna göre alt kriterlerin genel (global) ağırlıkları Çizelge 6'da verilmiştir. Çizelge 6'ya göre ağırlığı en yüksek kriter stratejik kriterlerden “doğalgaz kaynaklarına uzaklık”tır. Bu kriteri sırasıyla, operasyonel kriterlerden “kanal derinliği” ve stratejik kriterlerden “Sivastopol'a uzaklık” takip etmiştir.

Çizelge 6. Kriterlerin nihai (global) ağırlıkları

Ana Kriter	Alt Kriterler	Nihai Ağırlıklar
Stratejik kriterler (0.67)	SK ₁ -Poti limanına uzaklık	0.0173
	SK ₂ -Novorossiysk limanına uzaklık	0.0179
	SK ₃ -Odessa limanına uzaklık	0.0357
	SK ₄ -Varna limanına uzaklık	0.0209
	SK ₅ -İstanbul boğazına uzaklık	0.0226
	SK ₆ -Ankara'ya uzaklık	0.0852
	SK ₇ -Doğalgaz kaynaklarına uzaklık	0.1543
	SK ₈ -İkmal faaliyetleri	0.0325
	SK ₉ -Eğitim imkânları	0.0255
	SK ₁₀ -Sivastopol'a uzaklık	0.0963
	SK ₁₁ -Enerji altyapısı	0.0825
	SK ₁₂ -Sivil yapılara uzaklık	0.0759
Operasyonel kriterler (0.33)	OK ₁ -Kanal derinliği	0.1497
	OK ₂ -Askeri güç	0.0748
	OK ₃ -Lokasyon güvenliği	0.0357
	OK ₄ -Ticari liman	0.0146
	OK ₅ -Hava yollarına uzaklık	0.0293
	OK ₆ -Deprem riski	0.0293

Çizelge 6'da belirlenen nihai kriter ağırlıkları doğrultusunda alternatiflerin sıralanması için COPRAS yöntemi adımları uygulanmıştır. Yöntem uygulanırken kriterlerin fayda veya maliyet olma durumu karar vericiler tarafından belirlenmiştir. Çizelge 7'de operasyonel kriterler için karar matrisi gösterilmiş ve Çizelge 8'de alternatiflerin göreceli önemleri hesaplanmış ve alternatifler sıralanmıştır. Matriste, kanal derinliği ve hava yollarına uzaklık kesin sayılarla verilmiş, diğer kriter için karar vericiler tarafından derecelendirme yapılmıştır.

Operasyonel sıralamaya göre en iyi alternatif %100 performans indeks değerine sahip olan Karadeniz Ereğli; en sondaki alternatif ise %38.7 performans indeks değeri ile İnebolu olmuştur.

Çizelge 7. Operasyonel kriterler temelinde COPRAS değerlendirme matrisi

Alternatifler	OK ₁	OK ₂	OK ₃	OK ₄	OK ₅	OK ₆
Çamburnu	10	5	3	5	41	2
Amasra	7.5	1	3	3	54	5
Hopa	10	3	3	3	59	3
Karadeniz Ereğli	10	5	5	3	94	4
Akçakoca	4	1	1	1	131	5
Samsun	7.5	3	5	5	24	4
Sinop	5	3	5	1	7	2
İnebolu	3.5	1	1	1	105	5

Çizelge 7. Operasyonel kriterler temelinde COPRAS değerlendirme matrisi (devam)

Alternatifler	OK ₁	OK ₂	OK ₃	OK ₄	OK ₅	OK ₆
Görelle	5	1	1	1	78	3
Ünye	3	1	3	3	74	3
İğneada	5	1	3	1	220	2
Filyos	10	3	5	3	16	2
Kriter Ti	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda	Maliyet
Dereceleme	Metre (m)	1:Kötü 3:Orta 5:İyi	1:Kötü 3:Orta 5:İyi	1:Kötü 3:Orta 5:İyi	Kilometre (km)	1:Çok Az 2:Az 3:Orta 4:Yüksek 5:Çok Yüksek

Çizelge 8. Operasyonel kriterler temelinde görel önem değerlerinin hesaplanması ve alternatiflerin sıralanması

Alternatifler	S_i^+	S_i^-	Q_i	P_i	Sıralama
Çamburnu	0.108	0.012	0.118	92.346	2
Amasra	0.064	0.015	0.071	55.464	8
Hopa	0.094	0.011	0.104	81.611	4
Karadeniz Ereğli	0.119	0.013	0.127	100.000	1
Akçakoca	0.046	0.012	0.055	42.883	10
Samsun	0.082	0.016	0.089	69.938	5
Sinop	0.067	0.006	0.085	66.950	6
İnebolu	0.041	0.012	0.049	38.708	12
Görelle	0.046	0.008	0.060	46.958	9
Ünye	0.040	0.011	0.050	39.495	11
İğneada	0.066	0.006	0.084	66.196	7
Filyos	0.095	0.009	0.108	84.699	3

Çalışma, operasyonel kriterler için olduğu gibi stratejik kriterler için de tekrarlanmıştır. Çizelge 9'da stratejik kriterler için karar matrisi gösterilmiş ve Çizelge 10'da alternatiflerin göreceli önemleri hesaplanmış ve alternatifler sıralanmıştır. Stratejik sıralamaya göre en iyi alternatif %100 performans indeksi değerine sahip olan Samsun; en sondaki alternatif ise %29.1 performans indeksi değeri ile İnebolu olmuştur.

Çizelge 9. Stratejik kriterler temelinde COPRAS değerlendirme matrisi

Alternatifler	SK ₁	SK ₂	SK ₃	SK ₄	SK ₅	SK ₆	SK ₇	SK ₈	SK ₉	SK ₁₀	SK ₁₁	SK ₁₂
Çamburnu	160	282	643	615	593	741	423	3	5	348	5	98
Amasra	493	358	343	272	214	310	93	5	3	208	3	16
Hopa	29	304	661	715	694	897	497	3	1	457	1	103
Karadeniz Ereğli	559	420	370	226	170	304	106	5	5	261	5	33
Akçakoca	144	441	382	231	127	273	121	1	1	273	3	46
Samsun	293	250	464	476	479	402	313	5	5	270	5	3
Sinop	334	236	401	404	406	412	180	5	3	196	1	16
İnebolu	413	284	359	308	286	331	117	1	1	180	1	88
Görelle	154	262	617	592	542	658	402	1	1	370	1	82
Ünye	227	252	502	500	507	494	328	1	1	320	3	72
İğneada	732	554	358	116	100	678	199	1	1	335	3	68
Filyos	524	360	345	237	150	271	68	3	3	225	3	54
Kriter Tipi	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet
Dereceleme	Km	Km	Km	Km	Km	Km	Km	3:Orta 5:İyi	1:Kötü 1:Kötü 5:İyi	Km	3:Orta 5:İyi	Km

Çizelge 10. Stratejik kriterler temelinde görelî önem değerlerinin hesaplanması ve alternatiflerin sıralanması

Alternatifler	S_i^+	S_i^-	Q_i	P_i	Sıralama
Çamburnu	0.112	0.016	0.114	73.380	2
Amasra	0.058	0.003	0.058	36.973	9
Hopa	0.108	0.017	0.110	70.364	3
Karadeniz Ereğli	0.071	0.006	0.077	49.228	6
Akçakoca	0.051	0.008	0.055	35.483	11
Samsun	0.093	0.001	0.156	100.000	1
Sinop	0.060	0.003	0.072	46.290	8
İnebolu	0.043	0.015	0.045	29.124	12
Görece	0.086	0.014	0.089	56.859	4
Ünye	0.080	0.012	0.083	53.120	5
İğneada	0.072	0.011	0.075	48.264	7
Filyos	0.052	0.009	0.055	35.619	10

Son olarak tüm kriterler kullanılarak tam sıralama yapılmış ve Çizelge 11'de gösterilmiştir. Genel sıralamaya göre en iyi alternatif %100 performans indeks değerine sahip olan Çamburnu; en sondaki alternatif ise %41.5 performans indeks değeri ile İnebolu olmuştur

Çizelge 11. Karar problemi nihai alternatif sıralamaları

Alternatifler	S_i^+	S_i^-	Q_i	P_i	Sıralama
Çamburnu	0.111	0.015	0.117	100.000	1
Amasra	0.060	0.007	0.060	51.097	10
Hopa	0.103	0.015	0.109	93.189	2
Karadeniz Ereğli	0.087	0.008	0.097	83.536	4
Akçakoca	0.049	0.009	0.059	50.148	11
Samsun	0.089	0.006	0.104	89.158	3
Sinop	0.062	0.004	0.085	72.926	5
İnebolu	0.042	0.014	0.048	41.466	12
Görece	0.073	0.012	0.080	68.622	6
Ünye	0.067	0.012	0.074	63.500	9
İğneada	0.070	0.010	0.079	67.734	7
Filyos	0.066	0.009	0.076	65.072	8

Tüm sıralamalar Çizelge 12'de gösterilerek karşılaştırılmıştır. Operasyonel ve stratejik sıralamalarda yerel kriter ağırlıkları, genel sıralamada ise nihai kriter ağırlıkları kullanıldığından sıralamada farklılıklar bulunmaktadır.

Çizelge 12. Operasyonel sıralama, stratejik sıralama ve nihai sıralamanın karşılaştırılması

Alternatifler	Operasyonel sıralama	Stratejik sıralama	Genel sıralama
Çamburnu	2	2	1
Amasra	8	9	10
Hopa	4	3	2
Karadeniz Ereğli	1	6	4
Akçakoca	10	11	11
Samsun	5	1	3
Sinop	6	8	5
İnebolu	12	12	12
Görece	9	4	6
Ünye	11	5	9
İğneada	7	7	7
Filyos	3	10	8

4. Tartışma ve Sonuç

Son yıllarda Karadeniz Bölgesi'nde yaşanan Rusya-Ukrayna savaşı, Karadeniz'de bulunan gaz rezervleri, Montrö Boğazlar Sözleşmesi'nin korunması gibi faktörler göz önüne alındığında Karadeniz Bölgesi'nin barış ve huzur ortamında istikrar sağlanmasının gerekliliği anlaşılmıştır. Bu sebeple bölgede kurulabilecek askeri üssün Karadeniz'e kıyıdaş ülkelere karşı caydırıcılık açısından önemli olduğu değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada caydırıcılığın arttırılması amacıyla Karadeniz'e alternatif üs kurulması fikri ortaya çıkmıştır. Karadeniz'de alternatif üs yerlerinin seçimi uzman personel tarafından uydu görüntüleri baz alınarak ve bölgenin coğrafyası incelenerek belirlenmiştir. Bölgede kurulacak üssün stratejik açıdan Karadeniz'e kıyıdaş ülkeleri etkileyebileceği değerlendirildiğinden "stratejik kriterler", kendi operasyonlarımızı yapmamız açısından "operasyonel" kriterler belirlenmiştir. Stratejik ve operasyonel kriterler detaylandırılarak alt kriterlerin oluşturulması için beyin fırtınası yapılmıştır. Alternatif 12 limanın coğrafi yapıları uydu görüntüleri ile incelenmiş ve sosyokültürel yapıları tartışılmıştır. Literatür taramasına dayandırılarak ve uzman görüşü alınarak belirlenen 18 kriter "operasyonel" ve "stratejik" olarak sınıflandırılmıştır. Kriterler AHP ile ağırlıklandırılmış ardından COPRAS ile alternatifler sıralanmıştır. Operasyonel, stratejik ve genel sıralama ayrı ayrı elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada ağırlıkların stratejik ve operasyonel kriterler açısından eşit olmaması, farklı sıralamaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Tüm sıralamalara göre en sondaki alternatif İnebolu olmuştur. En iyi alternatif ise operasyonel sıralamaya göre Karadeniz Ereğli, stratejik sıralamaya göre Samsun, genel sıralamaya göre Çamburnu olmuştur. Operasyonel kriterler bakımından ilk sırada yer alan Karadeniz Ereğli'nin stratejik kriterler bakımından 6. sırada, stratejik kriterler bakımından ilk sırada yer alan Samsun'un operasyonel sıralamada 5. sırada yer alması Çamburnu'nun operasyonel ve stratejik sıralamada 2. sırada yer alsa da genel sıralamada ilk sıraya yükselmesini sağlamıştır. Genel sıralamada en öncelikli iki kriter 0.1543 kriter ağırlığı ile "doğalgaz kaynaklarına uzaklık" ve 0.1497 ile "kanal derinliği"dir. Çamburnu, doğalgaz kaynaklarına uzaklık bakımından Hopa'dan sonra en iyi ikinci alternatif ve kanal derinliği bakımından Hopa, Karadeniz Ereğli ve Filyos ile birlikte en iyi alternatiftir. Karadeniz Ereğli; kanal derinliği, askeri güç ve lokasyon güvenliği bakımından iyi değerlere sahip olduğundan operasyonel sıralamaya göre 1. sırada yer alması olabilir. Stratejik sıralamaya göre 1. olan Samsun ise ikmal faaliyetleri, eğitim imkânları, enerji altyapısı ve sivil yapılara uzaklık kriterlerine göre ön plana çıkmış olabilir. Çamburnu, operasyonel ve stratejik olarak 2., genelde 1. sırada yer aldığından iyi bir alternatif olarak gözükmemektedir. Ayrıca, kriter ağırlıkları dikkate alındığında bölgede bulunan tersanelerin, hava limanlarının, eğitim imkânlarının, doğal korumanın ve ikmal faaliyetlerinin sıralamada oldukça önemli olduğu görülmüştür. Stratejik olarak en önemli kriter "doğalgaz kaynaklarına uzaklık" olarak tespit edilmiş ve bunu Sivastopol'a uzaklık takip etmiştir. "Kanal derinliği" ve "askeri güç" operasyonel olarak önem derecesi bakımından en yüksek öneme sahip kriterler olarak değerlendirilmiştir. Genel olarak en öncelikli üç kriter ise sırasıyla; "doğalgaz kaynaklarına uzaklık", "kanal derinliği" ve "Sivastopol'a uzaklık" olarak belirlenmiştir. COPRAS yöntemi ile gerçekleştirilen bu üs yeri seçimi problemi, diğer ÇKKV yöntemleri ile de değerlendirilerek sonuçların güvenilirliği artırılabilir. Ayrıca, kriter ağırlıklandırma aşamasında farklı yöntemlerin kullanılmasının sonuçların çeşitliliği ve güvenilirliğini artırabileceği ve farklı kriterlerin de tanımlanabileceği göz ardı edilmemelidir. Bu çalışma, Ege ve Akdeniz Bölgelerinde yapılabilecek benzer çalışmalara da ışık tutabilecek niteliktedir. Çalışmada öngörülemeyen jeopolitik değişkenler, üs yerinin stratejik önemini ve uygunluğunu etkileyebilir. Özellikle bölgedeki siyasi ve askeri dinamiklerin hızlı değişimi, sonuçların geçerliliğini sınırlayabilir. Ayrıca askeri teknolojideki hızlı gelişmeler, mevcut kriterlerin ve değerlendirmelerin bir süre sonra geçerliliğini yitirmesine neden olabilir. Bu nedenle, üs yerinin seçimi zaman içinde yeniden gözden geçirilmelidir.

Kaynakça

- Aksoy, E., Ömürbek, N., & Karaatlı, M. (2015). AHP temelli Multimoora ve Copras yöntemi ile Türkiye kömür işletmelerinin performans değerlendirmesi. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 33(4), 1-28. <https://doi.org/10.17065/huiibf.10920>
- Aryee, J., Gohoho, E. S., & Kobina vanDyck, G. (2015). Offshore support base location of Subsea Engineering Companies (SECs) for Tweneboa, Enyenra and Ntomme (TEN) project in Ghana

- using analytic hierarchy process. *International, Journal of Social Science and Economics Invention*, 1(04), 205-219. <https://doi.org/10.23958/ijsssei/vol01-i04/02>
- AsghariSaraskanroud, S., Mosavi, M. N., & Mahdavi, S. (2019). Geomorphological analysis in site selection of military centers using GIS, ANP (case studies: garrisons border cities of west Azerbaijan). *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 9(33), 77-96. <https://doi.org/10.30488/gps.2019.91871>
- Bilgin, N. G., Bozma, G., & Riaz, M. (2024). Location selection criteria for a military base in border region using N-AHP method. *AIMS Mathematics*, 9(3), 7529-7551. <https://doi.org/10.3934/math.2024365>
- Bojer, A. K., Woldesilassie, F. F., Debelee, T. G., Kebede, S. R., & Esubalew, S. Z. (2023). AHP and machine learning-based military strategic site selection: a case study of Adea District East Shewa Zone, Ethiopia. *Journal of Sensors*, 6651486. <https://doi.org/10.1155/2023/6651486>
- Caruzzo, A., Cardoso, P. R. B., Junior, H. V., & Belderrain, M. C. N. (2016). Strategic decisions in transport: a case study for a naval base selection in Brazil. *Transportes*, 24(1), 5-18. <https://doi.org/10.14295/transportes.v24i1.874>
- Cegan, J. C., & Golan, M. S. (2021). Siting military base camps through an MCDA framework. *Journal of Military Studies*, 1-12. <https://doi.org/10.2478/jms-2021-0011>
- Fouladgar, M. M., Chamzini, Y. A., Lashgari, A., Zavadskas, K. E., & Turskis, Z. (2012). Maintenance strategy selection using AHP and COPRAS under fuzzy environment. *International Journal of Strategic Property Management*, 16(1), 85-104. <https://doi.org/10.3846/1648715X.2012.666657>
- Google Earth. (2023). Erişim tarihi: 26.09.2023. <https://earth.google.com>
- Hezam, I. M., Mishra, A. R., Rani, P., Saha, A., Smarandache, F., & Pamucar, D. (2023). An integrated decision support framework using single-valued neutrosophic-MASWIP-COPRAS for sustainability assessment of bioenergy production technologies. *Expert Systems with Applications*, 211, 118674. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118674>
- Karabulut, T. (2023). Critic-Copras yöntemi ile elektrikli motosiklet seçimi. In A. T. Bayram (Ed.), *Sosyal bilimler üzerine araştırmalar-V* (pp. 69-82). Özgür Yayın Dağıtım Ltd. Şti.
- Kumar, A., & Pant, S. (2023). Analytical hierarchy process for sustainable agriculture: An overview. *MethodsX*, 10, 101954. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101954>
- Madić, M., Marković, D., Petrović, G., & Radovanović, M. (2014, Mayıs). *Application of copras method for supplier selection*. The 5th International Conference Transport And Logistics-TIL, Niš, Sırbistan.
- Mahdiraji, H. A., Arzaghi, S., Staukis, G., & Zavadskas, K. E. (2018). A hybrid fuzzy BWM-Copras method for analyzing key factors of sustainable architecture. *Sustainability*, 10(5), 1626. <https://doi.org/10.3390/su10051626>
- Mishra, A. R., Alrasheedi, M., Lakshmi, J., & Rani, P. (2024). Multi-criteria decision analysis model using the q-rung orthopair fuzzy similarity measures and the COPRAS method for electric vehicle charging station site selection. *Granular Computing*, 9, 23. <https://doi.org/10.1007/s41066-023-00447-1>
- Ömürbek, N., & Eren, H. (2016). Promethee, Moora ve Copras yöntemleri ile oran analizi sonuçlarının değerlendirilmesi: bir uygulama. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 8(16), 174-187. <https://doi.org/10.20875/sb.69615>
- Özdağoğlu, A. (2013). İmalat işletmeleri için eksantrik pres alternatiflerinin Copras yöntemi ile karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 4(8), 1-22.
- Popovic, G., Stanujkic, D., & Stojanovic, S. (2012). Investment project selection by applying copras method and imprecise data. *Serbian Journal of Management*, 7(2), 257-269. <https://doi.org/10.5937/sjm7-2268>
- Purnomo, J., Fanani, Z., Domai, T., & Hariswanto, A. (2020). Model development of naval base determination. A system dynamics and interpretative structural modeling (ism) approach. *Journal of Defense Resources Management*, 11(1), 55-66.
- Saaty, T. L. (1980a). The analytic hierarchy process (AHP). *The Journal of the Operational Research Society*, 41(11), 1073-1076.
- Saaty, T. L. (1980b). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill International Book Company.

- Saaty, T. L., & Ozdemir, M. S. (2003). Why the magic number seven plus or minus two. *Mathematical and Computer Modelling*, 38(3-4), 233-244. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(03\)90083-5](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(03)90083-5)
- Sarıçalı, G., & Kundakçı, N. (2016). Ahp ve Copras yöntemleri ile otel alternatiflerinin değerlendirilmesi. *International Review of Economics and Management*, 4(1), 45-66.
- Sennaroglu, B., & Celebi, G. V. (2018). A military airport location selection by AHP integrated PROMETHEE and VIKOR methods. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, 160-173. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.022>
- Stimers, M., & Lenagala, S. (2017). The Analytic Hierarchy Process in gis-driven military operation base selection: a case study in Sri Lanka. *Journal of Defense Management*, 7(1), 157. <https://doi.org/10.4172/2167-0374.1000157>
- Topak, M. S., & Çanakçıoğlu, M. (2019). Banka performansının Entropi ve Copras yöntemi ile değerlendirilmesi: Türk bankacılık sektörü üzerine bir araştırma. *Mali Çözüm Dergisi*, 29(154), 107-132.
- Wind, Y., & Saaty, T. L. (1980). Marketing applications of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 26(7), 641-658. <https://doi.org/10.1287/mnsc.26.7.641>
- Yıkın, M. T., & Özcan, E. (2024). Demir ipek yolu güzergahında kuruluş yeri seçimi: Kapıkule-Kars örneği. *Demiryolu Mühendisliği*, 19, 225-240. <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1320992>
- Zavadskas, E. K., & Kaklauskas, A. (1996). *Pastatų sistemotechninis įvertinimas*. Vilnius Tech., Vilnius. <https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/147525>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Nar Çekirdeğinin Bazı Fizikokimyasal Özellikleri ve Yağ Asidi Bileşimi

Dilara ASLAN BAKKALBAŞI¹, İsa CAVİDOĞLU*²

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği ABD, 65080, Van, Türkiye

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye

Dilara ASLAN BAKKALBAŞI, ORCID No: 0000-0001-8056-6925,

İsa CAVİDOĞLU, ORCID No:0000-0001-7896-5871

*Sorumlu yazar e-posta: isacavidoglu@yyu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 17.02.2024

Kabul: 02.05.2024

Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1438794

Anahtar Kelimeler

Nar çekirdeği yağı,
Punica granatum L.,
Punikik asit,
Yağ asidi

Öz: Bu çalışmada Türkiye’de yetiştirilen Katırbaşı, Devediş, Hicaznar ve Zivzik çeşidine ait narların meyve ağırlıkları, çekirdek oranları ile çekirdeklerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Araştırma kapsamındaki nar çeşitlerinin meyve ağırlıklarının 241.05-520.90 g ve çekirdek oranlarının %3.47-4.03 arasında değiştiği saptanmıştır. Çekirdeklerin nem, yağ, protein ve kül miktarları sırasıyla, %3.76-5.60, %10.18-23.55, %10.77-16.64 ve %1.54-1.90 arasında değişmiştir. Nar çekirdeği yağlarında palmitik, stearik, oleik, linoleik, linolenik, punikik, α -eleostearik, katalpik ve araşidik asit olmak üzere toplam 9 yağ asidi tespit edilmiştir. Nar çekirdeği yağının karakteristik yağ asidi olan punikik asit oranı en çok Hicaznar (%84.12) ve en az Katırbaşı çeşidinde (%80.98) bulunmuştur. Punikik asidi sırasıyla, oleik (%4.75-6.66), linoleik (%4.77-6.29), palmitik (%2.19-2.94), stearik (%1.83-2.36), linolenik (%0.53-0.77), araşidik (%0.42-0.47), α -eleostearik (0.29-0.70) ve katalpik (0.04-0.26) asit izlemiştir. İncelenen çeşitler arasında Hicaznar çeşidinin en yüksek protein, yağ ve punikik asit içeriğine sahip olması nedeniyle çekirdeklerin değerlendirilmesinde bu çeşit üzerinde yoğunlaşmanın uygun olabileceği düşünülmektedir.

Some Physicochemical Properties and Fatty Acid Composition of Pomegranate Seeds

Article Info

Received: 17.02.2024

Accepted: 02.05.2024

Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1438794

Keywords

Fatty acid,
Pomegranate seed oil,
Punica granatum L.,
Punikic acid

Abstract: In this study, fruit weights, seed ratios and some chemical and physical properties of Katırbaşı, Devediş, Hicaznar and Zivzik pomegranate varieties grown in Türkiye were investigated. It was determined that the fruit weights and the seed ratios of the pomegranate varieties ranged from 241.05 to 520.90 g and 3.47 to 4.03%, respectively. The seeds' moisture, oil, protein and ash contents varied in the ranges of 3.76-5.60%, 10.18-23.55%, 10.77-16.64% and 1.54-1.90%, respectively. Nine different fatty acids, including palmitic, stearic, oleic, linoleic, linolenic, punicic, α -eleostearic, catalpic and arachidic acid were detected in pomegranate seed oils. Punicic acid, the characteristic fatty acid of pomegranate seed oil was highest in the Hicaznar (84.12%) and lowest in the Katırbaşı (80.98%) variety. Punicic acid was followed by oleic (4.75-6.66%), linoleic (4.77-6.29%), palmitic (%2.19-2.94%), stearic (1.83-2.36%), linolenic (0.53-0.77%), arachidic (0.42-0.47%), α -eleostearic (0.29-0.70%) and catalpic (0.04-0.26%) acids. Since Hicaznar showed the highest protein, oil and punicic acid contents among the tested pomegranate varieties, the evaluation of pomegranate seeds is recommended to be focused on this variety.

1. Giriş

Nar (*Punica granatum* L.) *Punicaceae* familyasına ait, genellikle tropik ve subtropik bölgelerde yetişen bir bitkidir (Kurt & Şahin, 2013). Anavatanı İran, Himalaya, Pakistan, Hindistan (Jing ve ark., 2012) ve Akdeniz Bölgesi (Paul & Radhakrishnan, 2020) olarak kabul edilen nar, antik çağlardan beri Akdeniz Bölgesi'nin tümünde yetişmektedir (Ahangari & Sargolzaei, 2012). Türkiye en fazla nar yetiştirilen ülkelerin arasında yerini almış olup üretimi giderek artmaktadır (Caliskan & Bayazit, 2012). Türkiye'de nar üretimi 2021 yılına oranla %5.2 artarak 2022 yılında 681 460 ton olmuştur (Anonim, 2022). Ülkemizde nar üretimi ağırlıklı olarak Akdeniz, Ege ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri'nde yapılmaktadır (Kurt & Şahin, 2013). Nar meyvesi anatomik olarak dış kabuk, iç kabuk (zar) ve daneden (yenebilen kısım) oluşmaktadır (Fernandes ve ark., 2015). Yenilebilen kısım tüm meyvenin yaklaşık % 52'sini oluşturmaktadır (Mohaghenghi ve ark., 2011). Bu yenilebilen kısmın %20'si ise çekirdekten oluşmaktadır (Habibnia ve ark., 2012). Nar meyvesinin çekirdek içeriği tüm meyvenin %3.7-7.9'unu oluşturmaktadır (Fernandes ve ark., 2015).

Nar meyvesi taze olarak tüketilmesinin yanında meyve suyu, konsantre, dane konservesi, jel, ekşi, şarap ve sos gibi birçok ürün üretiminde kullanmakla birlikte şifalı bitki preparatları ve gıda takviyelerinin bileşiminde yer alan ekstraktları geliştirmek için de kullanılmaktadır (Goula & Adamopoulos, 2012). Nar endüstrisinin yan ürünü olan nar çekirdeği, nar ürünlerinin üretiminden sonra posa olarak çıkan kısmın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır (Fernandes ve ark., 2015). Bu posa çoğunlukla hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Ticari olarak nar çekirdeği, güneşte ya da ısı uygulaması suretiyle kurutularak elde edilmektedir. Nar çekirdeği yağı ise soğuk pres, sıcak veya soğuk çözücü ekstraksiyonu gibi geleneksel yöntemlerin yanında sulu enzimatik yöntemler uygulanarak da elde edilmektedir. Son yıllarda nar çekirdeğinden elde edilen yağın tıp ve kozmetik alanlarındaki olumlu etkilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte bu yağa olan ilgi artmıştır.

Nar meyvesinin bileşimi büyük ölçüde çeşide, yetiştirme bölgesine, iklime, olgunluğa, kültürel uygulama gibi faktörlere bağlı olarak değişim göstermektedir (Kıralan ve ark., 2009; Hernandez ve ark., 2011). Nar çekirdeğinin yağ oranı % 4.44-24.13 arasında değişmektedir (Gölküçü ve ark., 2008; Fernandes ve ark., 2015). Yapılan farklı çalışmalar, nar çekirdeği yağının çoklu doymamış yağ asitleri açısından önemli bir kaynak olduğunu göstermektedir (Eikani ve ark., 2012; Jing ve ark., 2012). Nar çekirdeği yağının % 75-90 gibi önemli kısmı konjuge linolenik asitlerden (CLnA) oluşmaktadır (Ahangari & Sargolzaei, 2012). Punikik asit (9-cis,11-trans,13-cis, octadekatrienoik asit; n-5) nar çekirdeği yağında bulunan, etkileri diğer konjuge linolenik asitlerden daha fazla olan ve "süper CLnA" olarak anılan önemli bir konjuge linolenik asittir (Aruna ve ark., 2016). Nar çekirdeği yağında bulunan punikik asit, toplam yağ asitlerinin yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır (Koba & Yanagita, 2011). Bu konjuge yağ asidi antikanserojenik (Grossmann ve ark., 2010), anti-inflamatuvar (Boussetta ve ark., 2009) ve hipolipidemik (Arao ve ark., 2004) etkilere sahiptir. Nar çekirdeği yağında punikik asit dışında düşük miktarda α -eleosterik ve katalpik asitler gibi konjuge linolenik asitler de bulunmaktadır (Paul & Radhakrishnan, 2020). Bu yağ asitlerinin antiobez ve hipolipidemik etkileri rapor edilmiştir (Nagao & Yanagita, 2005). Diyetle nar çekirdeği takviyesinin, beslenmeye bağlı obeziteyi ve insülin direncini iyileştirdiği de bildirilmiştir (Vroegrijk ve ark., 2011).

Bu konjuge yağ asitleri dışında nar çekirdeği yağında oleik, linoleik ve linolenik gibi doymamış yağ asitlerinin yanı sıra miristik, palmitik, stearik, araşidik gibi doymuş yağ asitleri de bulunmaktadır (Okan ve ark., 2020; Paul & Radhakrishnan, 2020). Diyetle alınan yağ asitlerinin sağlık üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri bulunmaktadır. Doymuş yağ asitlerinin özellikle kalp-damar hastalıklarına ve kilo alımına neden oldukları, doymamış yağ asitlerinin etkilerinin ise çoğunlukla olumlu yönde olduğu belirtilmektedir. Ancak yeterli ve dengeli beslenme bakımından doymuş ve doymamış yağ asitlerinin belirlenen limitlerde ve birbiriyle belirli oranlarda tüketilmesi gerekliliği vurgulanmaktadır (Çakmakçı & Tahmas-Kahyaoğlu, 2012). Doymuş/doymamış yağ asidi oranının sağlık üzerine önemli etkiye sahip olduğu bildirilmiştir (Lunn & Theobald, 2006). Gıdaların doymamış yağ asidi miktarının doymuş yağ asidi miktarından daha fazla olması besin içeriği açısından olumlu bir kriter olarak değerlendirilmektedir (Tsanev ve ark., 1998).

Bu çalışmada Türkiye'de yetiştirilen nar çeşitlerinden Katırbaşı, Hicaznar, Devediş ve Zivzik nar çekirdeklerinin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ile bu çeşitlerin çekirdek yağlarının yağ asidi dağılımı incelenmiştir. Çalışmada incelenen bu özellikler açısından zengin olan çeşitlerin belirlenmesi

amaçlanmıştır. Böylece endüstri açısından daha verimli, sağlık açısından ise daha üstün özelliklere sahip ürünlerin üretilmesine katkı sağlanacaktır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında meyveler hasat olgunluğuna geldiği dönemde (Ekim-Kasım 2021) Katırbaşı çeşidi Adıyaman, Devedişli çeşidi Bilecik, Hicaznar çeşidi Mersin ve Zivzik çeşidi Siirt illerindeki yerel üreticilerden temin edilmiştir. Her bir çeşit için örnekler aynı sezonda 2 farklı bahçedeki 3 farklı ağaçtan toplam 15 meyve olacak şekilde 3 tekerrürlü toplanmıştır. Çalışma süresince meyveler +4°C’de muhafaza edilmiştir. Meyveler paslanmaz manüel meyve sıkacağında (0103, Cancan, Türkiye) sıkılıp çekirdekleri ayıklanmıştır. Çekirdeklerin üzerindeki meyve eti parçacıkları, su akışı altında çelik elekten geçirilerek uzaklaştırılmıştır. Elde edilen nar çekirdeği örnekleri laboratuvar ortamında 20-22°C’de ortalama %5 nem içeriğine kadar kurutulduktan sonra kahve öğütücüsünde öğütölüp 0.85 mm’lik elekten geçirilmiştir. Öğütölümüş örnekler analiz edilinceye kadar -18°C’de depolanmıştır.

2.2. Yöntem

2.2.1. Meyve ağırlığı ve çekirdek oranı

Nar meyvelerinin ağırlıkları ve çekirdek oranları hassas terazide (Shimadzu ATX-224) tartım yöntemi ile belirlenmiştir (Gölükçü ve ark., 2008).

2.2.2. Kuru madde tayini

5 g nar çekirdeği örneği darası alınan kurutma kabına tartılıp 105°C’deki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur (AOAC, 2006, metot no: 934.01).

2.2.3. Protein tayini

Nar çekirdeklerinin protein tayininde Kjeldahl yönteminden yararlanılmıştır. Yöntemde öğütölün örneklerin toplam azot içeriği belirlenmiş ve sonuç 6.25 faktörü ile çarpılarak % protein miktarı hesaplanmıştır (AOAC, 2006, metot no: 984.13).

2.2.4. Kül tayini

Homojenize edilmiş 1 g örnek darası alınmış krozelere konularak kül fırınında 550°C’de siyah bölge kalmayınca kadar yakılmıştır. Krozeler tartılarak % kül miktarı hesaplanmıştır (AOAC, 2006).

2.2.5. Yağ tayini

Nar çekirdeğinin yağ tayininde Soxhlet yönteminden yararlanılmıştır. Bunun için 10 g nar çekirdeği örneği 150 mL n-hekzan ile soxhlet ekstraktöründe 6 saat süresince ekstrakte edilmiştir. Süre sonunda n-hekzan rotary evaporatörde vakum altında 40°C’de uzaklaştırılmıştır. Daha sonra geriye kalan yağ etüvde 85°C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulup tartılarak sonuçlar g/100g olarak verilmiştir (AOAC, 1995). Elde edilen yağ -18°C’de muhafaza edilmiştir.

2.2.6. Yağ asidi bileşimi

Nar çekirdeği yağının yağ asitleri bileşiminin belirlenmesi için yağ asitleri metil esterleri IUPAC Method 2.301’e göre hazırlanmıştır (IUPAC, 1991). Örneklerin yağ asidi bileşimi gaz kromatografisi alev iyonizasyon dedektörü (GC-FID) cihazı ile belirlenmiş ve uygulanan analiz koşulları Çizelge 1.’de verilmiştir.

Çizelge 1. Yağ asitleri analizi için kullanılan GC cihazının çalışma koşulları

Gaz Kromatografisi	: Agilent 6890N Model
Dedektör	: FID
Kolon	: HP-88 column (0.25 mm id × 100 m; Agilent J&W, Santa Clara, CA, USA
Taşıyıcı Gaz ve Akış Oranı	: He, 1.2 mL/dk
Split Oranı	: 1:100
Sıcaklıklar	
Enjeksiyon Bloğu Sıcaklığı	: 230°C
Kolon Sıcaklığı	: 37°C'de 5 dk., 75°C'ye (8°C/dk.), 220°C'ye (40°C/dk), 220°C'de 10 dk.
Dedektör Sıcaklığı	: 240°C
Enjeksiyon Süresi	: 50 dk
Enjeksiyon Miktarı	: 1.0 µL

2.2.7. İstatistiksel analiz

Elde edilen veriler arasındaki fark SPSS Statistic 25.0 paket programı kullanılarak tek yönlü (One-way) varyans analizi (Anova) ile belirlenmiştir. Gruplar arasındaki farklılıklar Duncan çoklu karşılaştırma testi ile değerlendirilmiştir ($p<0.05$).

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada incelenen Katırbaşı, Devediši, Hicaznar ve Zivzik nar çeşitlerinin meyve ağırlıkları ve çekirdek oranları izelge 2.'de verilmiştir. Çeřitler arasındaki meyve ağırlıkları farkı istatistiksel açıdan önemli ($p<0.05$) bulunmuştur. Nar çeşitlerin meyve ağırlıkları karşılaştırıldığında en yüksek meyve ağırlığını gösteren Katırbaşı örneğini sırasıyla, Hicaznar, Devediši ve Zivzik narı izlemiştir. Türkiye'nin farklı bölgelerinde yetişen nar çeşitlerinin incelendiği farklı çalışmalarda Hicaznar eřidinin meyve ağırlıkları 319.8-621.4 g olarak bulunmuştur (Gölükçü ve ark., 2008; Özden ve ark., 2017). Çalışmamızda bulunan değerler bu aralıkta olduğu saptanmıştır. İkinci & Dursun (2021), şanlıurfa ilinin Merkez, Bozova ve Harran ilçelerindeki nar bahçelerinden hasat edilen Hicaznar eřidinin meyve ağırlıklarını sırasıyla, 213.66 g, 260.00 g ve 637.50 g olarak saptamışlardır. Araştırmacılar meyve ağırlıkları arasındaki bu farklılıkların ağacın yaşı, budama, sulama, hasat zamanı gibi faktörlerden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmamızdaki Devediši narının meyve ağırlığı, Ak ve ark. (2009)'un şanlıurfa'da yetiştirilen Devediši narının meyve ağırlıkları (256.8-387.5g) ile uyumlu; İkinci & Dursun (2021)'in yine şanlıurfa'da yetiştirilen Devediši narının meyve ağırlığından (492.36g) daha düşük bulunmuştur. Fernandes ve ark. (2015), Katırbaşı narının meyve ağırlığını 277.6 g, Gölükçü ve ark. (2008) ise 399 g olarak saptamışlardır. Bu değerler bizim tespit ettiğimiz değerlerin altındadır. Bu farklılıklar bölge ve iklim farklılıklardan kaynaklanabilmektedir.

Çizelge 2. Narı eşitlerinin meyve ağırlıkları ve çekirdek oranları (ortalama±standart sapma)

Nar eşidi	Meyve Ağırlığı (g)	ekirdek Oranı (%)
Katırbaşı	520.90±74.36 ^c	4.03±0.89 ^b
Devediši	289.69±47.42 ^a	3.75±0.59 ^{ab}
Hicaznar	424.41±89.13 ^b	3.52±0.70 ^{ab}
Zivzik	241.05±38.97 ^a	3.47±0.06 ^a

Aynı sütundaki farklı harfler ortalamalar arasında $p<0.05$ seviyesinde fark olduğunu göstermektedir

Çeřitler arasındaki çekirdek oranları farkı istatistiksel açıdan önemli ($p<0.05$) bulunmuştur. Katırbaşı eřidi en yüksek çekirdek oranına sahipken, bu çeşidi sırasıyla, Devediši, Hicaznar ve Zivzik eřitleri izlemiştir (izelge 2). Fernandes ve ark. (2015), İspanya'da yetiştirilen 9 nar çeşidinin çekirdek oranlarını %3.7-7.9 arasında tespit etmişlerdir. Bu oran bizim aynı çeşitte tespit ettiğimiz değerlerle uyumludur.

Farklı nar çeşitlerinin çekirdeklerinin bazı fizikokimyasal özellikleri incelenmiş ve Çizelge 3'te gösterilmiştir. Katırbaşı, Devediş, Hicaznar ve Zivzik narlarına ait çekirdeklerin nem oranları sırasıyla, %5.38, 4.71, 3.76 ve 5.60 olarak belirlenmiştir (Çizelge 3). Rojo-Gutiérrez ve ark. (2021), nar çekirdeğinin nem oranını %4.65 olarak tespit etmişlerdir.

Nar çekirdeklerinin yağ oranları %10.18-23.55 arasında tespit edilmiş (Çizelge 3) ve çeşitlerin yağ oranları arasındaki fark istatistiksel açıdan önemli ($p < 0.05$) bulunmuştur. En yüksek yağ oranı Hicaznar çeşidinde, en düşük yağ oranı ise Katırbaşı çeşidinde saptanmıştır. Gölükçü ve ark. (2008), ülkemizde yetişen bazı nar çeşitlerinin yağ oranlarını % 13.95-24.13 arasında saptarken, Hicaznar çeşidine ait çekirdeğin yağ oranını bizim değerden daha düşük (% 21.03), Katırbaşı çeşidine ait nar çekirdeğinin yağ oranını ise daha yüksek (% 15.93) bulmuşlardır.

Çizelge 3. Nar çeşitlerinin çekirdeğine ait bazı fizikokimyasal özellikler (ortalama±standart sapma)

Nar Çeşidi	Nem (%)	Yağ (%)	Protein (%)	Kül (%)
Katırbaşı	5.38±0.14 ^c	10.18±0.07 ^a	10.77±0.21 ^a	1.54±0.00 ^a
Devediş	4.71±0.09 ^b	15.40±0.06 ^c	12.20±1.04 ^{ab}	1.79±0.06 ^a
Hicaznar	3.76±0.034 ^a	23.55±0.38 ^d	16.64±0.25 ^c	1.90±0.04 ^a
Zivzik	5.60±0.05 ^c	11.69±0.07 ^b	13.14±0.20 ^b	1.60±0.40 ^a

Aynı sütundaki farklı harfler ortalamalar arasında $p < 0.05$ seviyesinde fark olduğunu göstermektedir

Çeşitler arasındaki protein oranları farkı istatistiksel açıdan önemli ($p < 0.05$) bulunmuştur. Nar çeşitlerinin protein oranları %10.77-16.64 arasında saptanmıştır (Çizelge 3). En yüksek protein içeriği Hicaznar çeşidinde, en düşük protein içeriği ise Katırbaşı çeşidinde saptanmıştır. Gölükçü ve ark. (2008), Hicaznar çeşidinin protein içeriğini % 14.91, Katırbaşı narının protein içeriğini %16.91 olarak tespit etmişlerdir. Juhaimi ve ark. (2017), Hicaznar ve Devediş nar çeşitlerinin protein içeriklerini sırasıyla, %6.74 ve 7.56 olarak saptamışlardır. Gölükçü ve ark. (2008), farklı nar çeşitlerinin protein oranlarının %12.35-21.28 arasında olduğunu bildirmişlerdir. Rojo-Gutiérrez ve ark. (2021), ise nar çekirdeğinin protein oranını %16.33 olarak saptamışlardır.

Katırbaşı, Devediş, Hicaznar ve Zivzik narlarının kül içerikleri sırasıyla %1.54, %1.79, %1.90 ve %1.60 olarak belirlenmiş ve çeşitler arasındaki fark istatistiksel açıdan önemli değildir ($p > 0.05$). Devediş ve Hicaznar çeşitlerine ait çekirdeklerinin kül oranları Juhaimi ve ark. (2017)'nin tespit ettiği değerlerden (sırasıyla, %2.9 ve 2.17) daha düşük bulunmuştur. Katırbaşı çeşidi çekirdeklerinin kül oranı Gölükçü ve ark. (2008)'nin tespit ettiği değerden (%2.41) daha düşük bulunmuştur. Bu farklılıklar farklı iklim koşullarından kaynaklanabilmektedir.

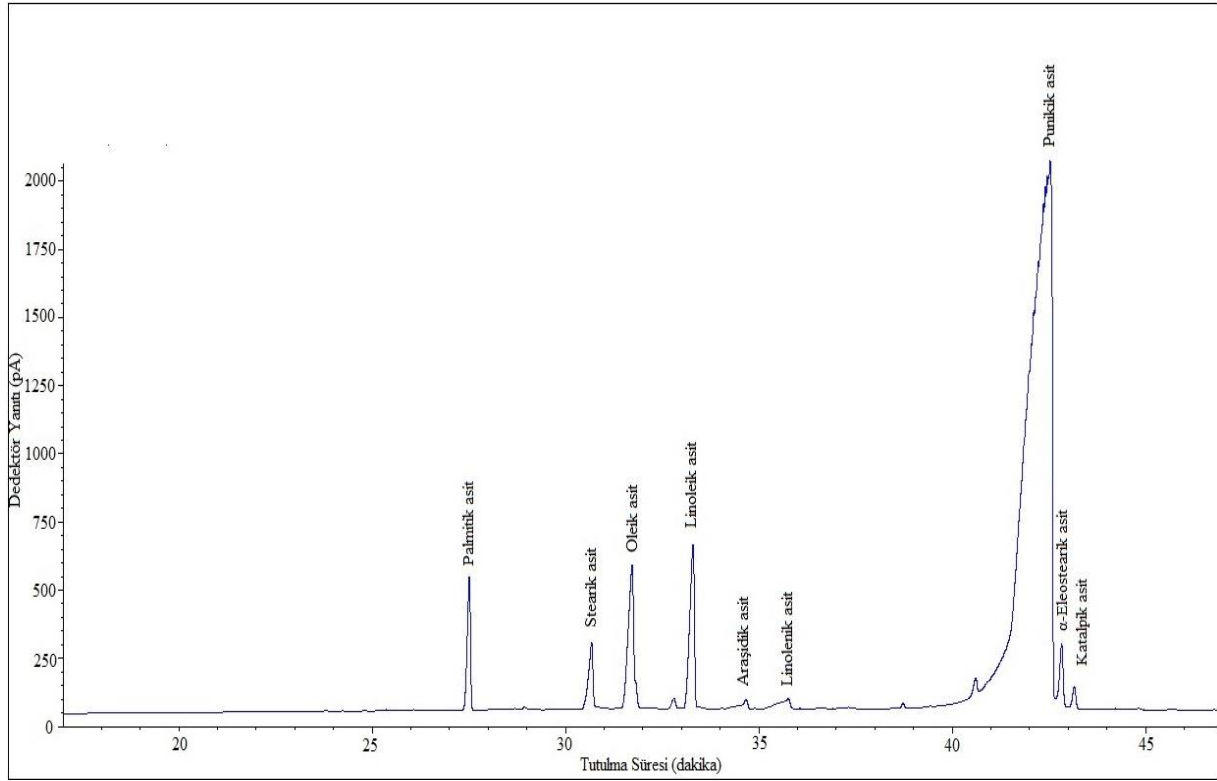
Çizelge 4. Nar çekirdeği yağlarının yağ asidi bileşimleri (%Metil Ester) (ortalama±standart sapma)

Yağ Asidi		Nar Çeşidi			
		Katırbaşı	Devediş	Hicaznar	Zivzik
Palmitik asit	(C16:0)	2.61±0.04 ^c	2.94±0.03 ^d	2.38±0.03 ^b	2.19±0.03 ^a
Stearik asit	(C18:0)	2.04±0.04 ^b	2.36±0.04 ^c	1.83±0.03 ^a	2.00±0.03 ^b
Oleik asit	(C18:1)	6.66±0.04 ^d	6.02±0.01 ^c	4.75±0.03 ^a	5.47±0.03 ^b
Linoleik asit	(C18:2)	6.29±0.04 ^d	6.18±0.03 ^c	4.77±0.04 ^a	5.45±0.04 ^b
Linolenik asit	(C18:3)	0.67±0.01 ^c	0.53±0.00 ^a	0.77±0.01 ^d	0.57±0.06 ^a
Punikik asit	(C18:3)	80.98±0.02 ^a	81.08±0.08 ^a	84.12±0.04 ^c	83.52±0.06 ^b
α -eleostearik asit	(C18:3)	0.29±0.04 ^a	0.43±0.03 ^b	0.70±0.07 ^c	0.30±0.04 ^a
Katalpik asit	(C18:3)	0.04±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a	0.26±0.04 ^b	0.05±0.01 ^a
Araşidik asit	(C20:0)	0.44±0.04 ^a	0.42±0.03 ^a	0.42±0.01 ^a	0.47±0.01 ^a
Σ Doymuş (SFA)		5.07±0.05 ^b	5.72±0.06 ^c	4.63±0.08 ^a	4.66±0.01 ^a
Σ Doymamış (UFA)		94.92±0.05 ^b	94.28±0.06 ^a	95.38±0.08 ^c	95.34±0.01 ^c
Doymuş/Doymamış		0.05±0.00 ^b	0.06±0.00 ^c	0.05±0.00 ^a	0.05±0.00 ^a

Aynı satırdaki farklı harfler ortalamalar arasında $p < 0.05$ seviyesinde fark olduğunu göstermektedir

Nar çekirdeği yağlarında palmitik, stearik, oleik, linoleik, linolenik, punikik, α -eleostearik, katalpik ve araşidik asit olmak üzere toplam 9 yağ asidi tespit edilmiştir (Çizelge 4). Nar çeşitlerinin yağ asidi bileşimi arasındaki fark araşidik asit için istatistiksel açıdan önemsiz ($p > 0.05$) bulunurken, diğer yağ asitleri için önemli ($p < 0.05$) bulunmuştur. Punikik asit tüm çeşitlerde tespit edilen en baskın

yağ asidi olup en yüksek oranda (%84.12) Hicaznar, en düşük oranda (%80.98) Katırbaşı çeşidinde tespit edilmiştir. Türkiye'de yetiştirilen ve ticari açıdan önemli olan 15 nar çeşidine ait çekirdeklerin yağ ve CLnA içeriklerini inceleyen [Kıralan ve ark. \(2009\)](#), tüm çeşitlerdeki baskın olan punikik asit oranını % 70.42-76.17 arasında tespit etmişlerdir. Çeşitlerin yağ asidi dağılımına ilişkin kromatogram Şekil 1'de verilmiştir. Beş farklı nar çeşidine ait çekirdek yağlarının kimyasal yapısını inceleyen [Habibnia ve ark. \(2012\)](#), tüm örneklerde baskın yağ asidinin punikik asit olduğunu ve bu yağ asidinin toplam yağ asidi içeriğinin %78.25-82.40'nı oluşturduğunu belirlemişlerdir. Çizelge 4'teki değerler incelendiğinde, Katırbaşı ve Devediş çeşitlerinin bu değerler aralığında, Hicaznar ve Zivzik çeşitlerinin ise bu değerlerden daha yüksek oranda punikik asit içerdikleri görülmektedir. Çalışmada punikik asit dışında, palmitik (%2.19-2.94), stearik (%1.83-2.36), oleik (%4.75-6.66), linoleik (%4.77-6.29), linolenik (%0.53-0.77), α -eleostearik (0.29-0.70), katalpik (0.04-0.26) ve araşidik asit (%0.42-0.47) saptanmıştır. Literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında stearik, oleik, linoleik ve araşidik yağ asitleri değerleri diğer çalışmalar ile uyumlu, palmitik, α -eleostearik ve katalpik asit değerleri ise daha düşük düzeyde olduğu saptanmıştır ([Hernandez ve ark., 2011](#); [Siano ve ark., 2016](#); [Okan ve ark., 2020](#)). [Siano ve ark. \(2016\)](#), nar çekirdeği yağının linolenik, α -eleostearik ve katalpik asit içeriklerini sırasıyla, %0.40, 2.50 ve 1.61 olarak saptamışlardır. Yapılan bazı çalışmalarda nar çekirdeği yağında düşük düzeylerde gadoleik (C20:1), behenik (C22:0) ve lignoserik (C24:0) gibi yağ asitleri de tespit edilmiştir ([Okan ve ark., 2020](#)). Bizim çalışmada bu yağ asitlerine rastlanılmamıştır.



Şekil 1. Nar çekirdeği yağının yağ asidi bileşimine ait kromatogram.

Sağlık açısından önemli bir gösterge olan doymuş/doymamış yağ asitleri oranı Katırbaşı, Hicaznar ve Zivzik çeşitlerinde 0.05, Devediş çeşidinde 0.06 olarak belirlenmiş ve çeşitler arasındaki fark istatistiksel açıdan önemli ($p < 0.05$) bulunmuştur. İspanya'da yetiştirilen 9 farklı nar çeşidinde bu oran 0.069-0.079 olarak belirlenmiştir ([Fernandes ve ark., 2015](#)).

4. Sonuç

Nar çekirdeği yağı, içerdiği yağ asitlerinin insan sağlığı için gerekli olan, vücutta sentezlenemeyip dışarıdan alınması gereken çoklu doymamış yağ asitlerini yüksek miktarda içermesinden dolayı, tüketimi ve kullanımı her geçen gün artan ve ekonomik olarak da oldukça değerli

bir üründür. Nar yetiştiriciliği açısından uygun bir iklime sahip olan ülkemizde, nar üretimi her yıl artmakta ve bu durum işlenmiş nar ürünlerine de yansımaktadır.

Çalışmamızda incelenen nar çeşitleri arasında Hicaznar çeşidine ait nar çekirdeklerinin yağ ve protein açısından en zengin bileşime sahip oldukları saptanmıştır. Ayrıca Hicaznar çeşidine ait yağlar, nar çekirdeği yağının karakteristik yağ asidi olan punikik asidi diğer çeşitlere göre daha yüksek oranda içerdiği saptanmıştır. Hammaddesi nar meyvesi olan farklı ürünlerin üretimi için Hicaznar çeşidinin tercih edilmesi, ortaya çıkacak atık ürünlerin nar çekirdek yağına işlenmesinde avantaj sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu alışma doktora çalışmasının bir parçası olup Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No: FDK-2021-9786).

Kaynakça

- Ahangari, B., & Sargolzaei, J. (2012). Extraction of pomegranate seed oil using subcritical propane and carbone dioxide. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 46(3), 258-265. <https://doi.org/10.1134/S0040579512030013>
- Ak, B. E., Özgüven, A. I., İkinci, A., Yılmaz, C., & Parlakçı, H. (2009, Ekim). *Some pomological traits of different pomegranate varieties grown in Sanliurfa-Turkey*. I. International Symposium on Pomegranate and Minor Mediterranean Fruits, Adana.
- Anonim. (2022). *Bitkisel üretim istatistikleri*. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). Erişim tarihi: 28.12.2023. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2022-45504>
- AOAC. (1995). *Official methods of analysis*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
- AOAC. (2006). *Official methods of analysis* (18th edition). Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, USA.
- Arao, K., Yotsumoto, H., Han, S. Y., Nagao, K., & Yanagita, T. (2004). The 9cis, 11trans, 13cis isomer of conjugated linolenic acid reduces apolipoprotein B100 secretion and triacylglycerol synthesis in HepG2 cells. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 68(12), 2643-2645. <https://doi.org/10.1271/bbb.68.2643>
- Aruna, P., Venkataramanamma, D, Singh, A, K., & Singh, R, P. (2016). Health benefits of punicic acid: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 16-27. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12171>
- Boussetta, T., Raad, H., Lettéron, P., Gougerot-Pocidallo, M. A., Marie, J. C., Driss, F., & El-Benna, J. (2009). Punicic acid a conjugated linolenic acid inhibits TNF α -induced neutrophil hyperactivation and protects from experimental colon inflammation in rats. *PLoS ONE*, 4(7), e6458. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006458>
- Caliskan, O., & Bayazit, S. (2012). Phytochemical and antioxidant attributes of autochthonous Turkish pomegranates. *Scientia Horticulturae*, 147, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.08.032>
- akmakçı, S., & Tahmas-Kahyaoğlu, D. (2012). Yağ Asitlerinin Sağlık ve Beslenme Üzerine Etkilerine Genel Bir Bakış. *Akademik Gıda*, 10(1), 103-113.
- Eikani, M. H., Golmohammad, F., & Homami, S. S. (2012). Extraction of pomegranate (*Punica granatum* L.) seed oil using superheated hexane. *Food and Bioproducts Processing*, 90(1), 32-36. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.01.002>
- Fernandes, L., Pereira, J. A., Lopez-Cortes, I., Salazar, D. M., Ramalhosa, E., & Casal, S. (2015). Fatty acid, vitamin E and sterols composition of seed oils from nine different pomegranates (*Punica granatum* L.) cultivars grown in Spain. *Journal of Food Composition and Analysis*, 39, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.11.006>
- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2012). A method for pomegranate seed application in food industries: seed oil encapsulation. *Food and Bioproducts Processing*, 90(4), 639-652. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.06.001>
- Gölükçü, M., Tokgöz, H., & Kıralan, M. (2008). Ülkemizde yetiştirilen önemli nar (*Punica granatum* L.) çeşitlerine ait çekirdeklerin özellikleri. *Gıda*, 33(6), 281-290.

- Grossmann, M. E., Mizuno, N. K., Schuster, T., & Cleary, M. P. (2010). Punicic acid is an ω -5 fatty acid capable of inhibiting breast cancer proliferation. *International journal of oncology*, 36(2), 421-426. https://doi.org/10.3892/ijo_00000515
- Habibnia, M., Ghavami, M., Ansari-pour, M., & Vosough, S. (2012). Chemical evolution of oils extracted from different varieties of Iranian Pomegranate Seeds. *Journal of Food Biosciences and Technology*, 2, 35-40.
- Hernandez, F., Melgarejo, P., Martinez, J. J., Martinez, R., & Legua, P. (2011). Fatty acid composition of seed oils from important Spanish pomegranate cultivars. *Italian Journal of Food Science*, 23, 188-193.
- IUPAC. (1991). *International union of pure and applied chemistry*, method No 2.301. In: Standard methods for analysis of oils, fats and derivatives, 7th edn. Blackwell Scientific, Oxford.
- İkinci, A., & Dursun, E. (2021). Şanlıurfa'da yetiştirilen bazı nar (*Punica granatum* L.) çeşitlerinin pomolojik ve kimyasal özellikleri. *Uluslararası Anadolu Ziraat Mühendisliği Bilimleri Dergisi*, 3(3), 63-72.
- Jing, P., Ye, T., Shi, H., Sheng, Y., Slavin, M., Gao, B., ... & Yu, L. (2012). Antioxidant properties and phytochemical composition of China-grown pomegranate seeds. *Food Chemistry*, 132(3), 1457-1464. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.12.002>
- Juhaimi, F. A., Ozcan, M. M., & Ghafoor, K. (2017). Characterization of pomegranate (*Punica granatum* L.) seed and oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(10), 1-6. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700074>
- Kıralan, M., Gölükçü, M., & Tokgöz, H. (2009). Oil and conjugated linolenic acid contents of seeds from important pomegranate cultivars (*Punica granatum* L.) grown in Turkey. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 86, 985-990. <https://doi.org/10.1007/s11746-009-1436-x>
- Koba, K., & Yanagita, T. (2011). Potential health benefits of pomegranate (*Punica granatum*) seed oil containing conjugated linolenic acid. In V. R. Preedy, R. R. Watson., & V. B. Patel (Eds.), *Nuts and seeds in health and disease prevention*. (pp. 919-924). Academic Press, London, UK. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375688-6.10108-2>
- Kurt, H., & Şahin, G. (2013). Bir ziraat coğrafyası çalışması: Türkiye'de nar (*Punica granatum* L.) tarımı. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 27, 551-574.
- Lunn, J., & Theobald, H. E. (2006). The health effects of dietary unsaturated fatty acids. *Nutrition Bulletin*, 31(3), 178-224. <https://doi.org/10.1111/j.1467-3010.2006.00571.x>
- Mohaghenghi, M., Rezaei, K., Labbafi, M., Mousavi, S. M. E. (2011). Pomegranate seed oil as a functional ingredient in beverages. *European Journal Lipid Science Technology*, 113(6), 730-736. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201000334>
- Nagao, K., & Yanagita, T. (2005). Conjugated fatty acids in food and their health benefits. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 100(2), 152-157. <https://doi.org/10.1263/jbb.100.152>
- Okan, O. T., Kılıç-Pekgözlü, A., Onaran, A., Öz, M., & Deniz, İ. (2020). Determination of chemical composition, antioxidant and antifungal properties of pomegranate (*Punica granatum* L.) seed oil produced in industrial scale. *Artvin Coruh University, Journal of Forestry Faculty*, 21(2), 143-153. <https://doi.org/10.17474/artvinofd.683260>
- Özden, A. N., Ak, B. E., & Özden, M. (2017). Farklı nar (*Punica granatum* L.) çeşitlerinin pomolojik, fitokimyasal özellikleri ve antioksidan kapasiteleri. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 21(2), 164-176.
- Paul, A., & Radhakrishnan, M. (2020). Pomegranate seed oil in food industry: Extraction, characterization, and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 273-283. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.014>
- Rojo-Gutiérrez, E., Carrasco-Molinar, O., Tirado-Gallegos, J. M., Levario-Gómez, A., Chávez-González, M. L., Baeza-Jiménez, R., & Buenrostro-Figueroa, J. J. (2021). Evaluation of green extraction processes, lipid composition and antioxidant activity of pomegranate seed oil. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15, 2098-2107. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00804-7>
- Siano, F., Straccia, M. C., Paolucci, M., Fasulo, G., Boscaino, F., & Volpe, M. C. (2016). Physico-chemical properties and fatty acid composition of pomegranate, cherry and pumpkin seed oils. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(5), 1730-1735. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7279>

- Tsanev, R., Russeva, A., Rizov, T., & Dontcheva, I. (1998). Content of trans-fatty acids in edible margarines. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(2), 143-145. <https://doi.org/10.1007/s11746-998-0025-8>
- Vroegrijk, I. O. C. M., Diepen, J. A., Berg, S., Westbroek, I., Keizer, H., Gambelli, L., ... & Voshol, P. J. (2011). Pomegranate seed oil, a rich source of punicic acid, prevents diet-induced obesity and insulin resistance in mice. *Food and Chemical Toxicology*, 49(6), 1426-1430. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.03.037>



Research Article

Physicochemical and Mechanical Properties of Sodium Alginate Films Containing Thyme Essential Oil

Cansu TOROL, Özgül ÖZDESTAN OCAK*

Ege University, Engineering Faculty, Food Engineering Department, 35100, İzmir, Türkiye

Cansu TOROL, [ORCID No: 0000-0001-6369-1062](#),

Özgül ÖZDESTAN OCAK, [ORCID No: 0000-0003-0967-8865](#)

*Corresponding author e-mail: ozgul.ozdestan@ege.edu.tr

Article Info

Received: 19.02.2024

Accepted: 17.07.2024

Online August 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1439609](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1439609)

Keywords

Edible film,

Film characterization,

Sodium alginate,

Thyme essential oil

Abstract: In this study, it was aimed to develop edible film by the casting technique from sodium alginate (SA) (%2 w/v) using three different concentrations of thyme essential oil (TEO) (0.5%, 1%, 1.5% v/v). The physicochemical, mechanical, structural, and antioxidant properties of enriched SA films were also characterized. The highest film solubility (FS) was found as 91.78% in SA (control) films. The mechanical properties of films were found between 27.14 MPa and 50.06 MPa for tensile strength (TS) and between 13.88% and 32.02% for elongation at break (EAB). The highest total phenolic content (TPC) and antioxidant activity were found as 382.19 mg GAE/kg and 16.20% in SA film incorporated with TEO 1.5% respectively. As the concentration of TEO increased, the L^* value increased, leading the film colors to approach white. Additionally, it was observed that as the b^* value increased the film colors tented towards yellow. When the results of SEM analysis were evaluated, it was found that SA films were more homogeneous than other films. In general, it was concluded that TEO at a concentration of %1 (v/v) improves the physical and chemical properties of sodium alginate film compared to other groups.

Kekik Esansiyel Yağı İçeren Sodyum Aljinat Filmlerinin Fizikokimyasal ve Mekanik Özellikleri

Makale Bilgileri

Geliş: 19.02.2024

Kabul: 17.07.2024

Online Ağustos 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1439609](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1439609)

Anahtar Kelimeler

Film karakterizasyonu,

Kekik esansiyel yağı,

Sodyum aljinat,

Yenilebilir film

Öz: Bu çalışmada dökme yöntemi kullanılarak üç farklı konsantrasyonda kekik esansiyel yağı (KY) (%0.5, %1, %1.5 h/h) katkı sodyum aljinat (%2 a/h) (SA) filmlerin yenilebilir film olarak geliştirilmesi amaçlanmıştır. Zenginleştirilmiş sodyum aljinat filmlerin fizikokimyasal, mekaniksel, yapısal ve antioksidan özellikleri karakterize edilmiştir. En yüksek film çözünürlüğü %91.78 olarak SA (kontrol) filmlerde bulunmuştur. Filmlerin kopma mukavemeti 27.14 MPa ve 50.06 MPa arasında, kopma anında uzama değerleri ise 13.88% ve 32.02% arasında bulunmuştur. En yüksek toplam fenolik içerik ve antioksidan aktivite sırasıyla %1.5 KY içeren SA filminde 382.19 mg GAE/kg ve %16.20 olarak bulunmuştur. KY'nin artan konsantrasyonlarına bağlı olarak L^* değeri arttı ve film renkleri beyaza yaklaştı. Ayrıca b^* değerinin artması ile film renkleri sarıya yaklaştığı görülmüştür. SEM analiz sonuçları değerlendirildiğinde SA filmlerin diğer filmlere göre daha homojen olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak %1 (h/h) konsantrasyonunda KY'nin sodyum aljinat filminin fiziksel ve kimyasal özelliklerini diğer gruplara kıyasla daha iyi geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

1. Introduction

Food packaging technology has been used for many years to prevent food from being affected by adverse environmental conditions and to transport them to consumers while preserving their quality. Recently, the development of coating technology has been a new direction in food technology in relation to film-forming materials (Mahcene et al., 2021).

Biodegradable edible films and coatings are one of the methods used to maintain quality, extend shelf life, contribute to the efficiency of packaging materials as an alternative to traditional petroleum-based food packaging for optimizing food quality (Aguirre-Joya et al., 2018). Edible films and coatings prepared with proteins, polysaccharides and lipids have become increasingly important in food preservation applications (Okcu et al., 2018). Edible films and coatings are materials obtained from natural sources (polysaccharides, proteins, lipids, enzymes, bacteriocins and other biologically edible components) that can be used together with food by applying them to the surface or inside of food in a thin layer (Dehghani et al., 2018; Bhagath & Manjula, 2019). They can also be prepared by combining these components with each other and using them. These natural components used to ensure that the film or coatings have different properties. Because the chemical structures of these components differ from each other. In general, polysaccharides are used to control the diffusion of oxygen and other gases, proteins are used to give mechanical strength to films, and lipids are used to reduce water transfer (Pavlat & Orts, 2009; Umaraw & Verma, 2015; Kurek et al., 2017; Okcu et al., 2018; Ulusoy et al., 2018).

The most commonly used natural polymers (such as starch/modified starch, chitin/chitosan, pectin, galactomannans, cellulose/modified cellulose, alginate, carrageenan, gums (gelatin, xanthan, etc.), and pullulan) in the formulation of edible packaging include polysaccharides (Aguirre-Joya et al., 2018). Polysaccharides are abundant in nature, non-toxic, cost-effective, can act as stabilizers, are often edible, easily accessible, and possess numerous hydrogen bonds and hydroxyl groups. These properties support film formation, making them widely used in various applications (Pop et al., 2019; Mohamed et al., 2020).

Alginate, found in the outer cell wall of brown algae, is an anionic polysaccharide. Sodium alginate, known for its physical properties, is non-toxic and environmentally stable. It can gel, create films, and interact with various molecules (Gaowa et al., 2023). Alginates have been used for many years in the food, beverage, pharmaceutical, textile, printing and pharmaceutical industries as a thickener, stabilizer, emulsifier, chelating and encapsulating agent, colloidal stabilizer, gels, films and membrane. This polymer is low-cost, biocompatible and biodegradable (Gokbulut & Ozturk, 2018; Senturk Parreidt et al., 2018).

Alginate-based edible films and coatings are used in various applications including fruits, vegetables, red and white poultry meats, seafood, cheeses, etc. It provides reduction of dehydration, control of respiration, improvement of the appearance of the product, improvement of its mechanical properties, preservation of its qualities and increase of its shelf life. The most commonly used alginate salt in films or coatings is sodium alginate. Sodium alginate is included in the GRAS (generally safe) category by the FDA (Food and Drug Administration) (Senturk Parreidt et al., 2018; Anonymous, 2021).

Essential oils are added to the film forming solutions for various purposes, such as improving the chemical and physical structure of films, observing microbial activity. In this way, it is ensured that the prepared films have the desired properties (such as low water vapor permeability, high elongation at break, high antioxidant activity). Thyme essential oil consists of over 60 components, the majority of which possess significant antioxidant and antimicrobial properties (Saricaoglu & Turhan, 2020). The use of thyme essential oil in edible film and coating applications prepared from many different sources is available in literature studies (Emiroglu et al., 2010; Kavooosi et al., 2013; Sarengaowa et al., 2018; Mahcene et al., 2019; Tabassum & Khan, 2020; Saricaoglu & Turhan, 2020; Chen et al., 2021; Shakerardekani et al., 2021; Venturini Antunes et al., 2023). However, literature information on the characterization analyses of sodium alginate films with thyme essential oil added at different concentrations is limited.

The main objective of this study was to develop sodium alginate (SA) films enriched with thyme essential oils (TEO) at different ratios and evaluate the effects of TEO incorporation SA based films. Characterization analyses of the films (solubility, thickness, light transmittance, elongation at break and tensile strength, color, total amount of phenolic substance, antioxidant activity and scanning electron

microscope imaging (SEM) were performed in each prepared film group. This study is expected to serve as an example for characterization analyses of sodium alginate films with added thyme oil at concentrations of 0.5%, 1%, and 1.5% for future studies. The study aims to determine the optimal concentration of thyme essential oil, making the film formulation solution suitable as a coating material for a specific food product.

2. Materials and Methods

SA (Sigma-Aldrich W201502), glycerol (Sigma-Aldrich 104092), Tween 80 (Sigma-Aldrich 9005-65-6), were used for film production. TEO (*Thymus vulgaris*) was supplied from the shop that sells spices (Doğan Baharatçılık, Turkey). Ultra-pure distilled water was used for analyses. All other chemicals were supplied from Merck (Germany)

2.1. Film preparation

The films were prepared by modifying the method used by Peretto et al. (2014). The ratios of SA, glycerol, and Tween 80 used in the production of films were determined through preliminary trials. The TEO ratios used in the production of the film were prepared based on the study conducted by Tabassum & Khan (2020), with changes according to the results of the preliminary trial. SA solution (2%, w/v) was dissolved in distilled water at 70 °C for 15 min with a magnetic stirrer until homogeneity. Glycerol 2% (v/v) was added to the solution at the same temperature as a plasticizer and mixed for another 15 min. When the film forming solution cooled to 40°C, 0.15% (v/v) Tween 80 was added and mixed. To prevent TEO from being affected by temperature, the solution was cooled to room temperature (20-25 °C). 0%, 0.5%, 1% and 1.5% (v/v) TEO were added to the solution at the desired concentrations and mixed for a while. The prepared solutions were homogenized with ultra-turrax by mixing at 13400 rpm for 4 min (Peng & Li, 2014). After the procedure, the foaming was removed by slightly shaking the solutions for a while. The film forming solutions were poured into petri dishes, 25 mL each, and left to dry at room temperature uncovered. The dried films were kept in a desiccator at room temperature until analysis.

2.2. Film characterizations

2.2.1. Film solubility and thickness

The film solubility (%) and thickness (mm) of the films were determined by using the method of Ahmad et al. (2012). The film samples were prepared by cutting 2 x 3 cm² in size and placed in petri dishes and left for 7 days in the desiccator. The film samples were mixed with 80 mL of distilled water at room temperature for 24 h. The mixture was filtered through filter paper. The remaining particules of solid film were held in the oven for 24 h at 105°C. After drying, the film samples were weighed and the film solubility values were determined by taking into account the ratios of the initial and final weights of the film samples. The film's thickness was measured using a digital micrometer (Mitutoyo Digimatic Micrometer Absolute Digimatic 2, Japan) for 10 randomly selected points.

2.2.2. Tensile strength and elongation at break values

According to the standard ASTM method D 882-88 (2001) the tensile strength (TS, MPa) and elongation at break (EAB, %) values of films were determined using a TA. XT-plus Texture Analyser (Stable Micro Systems, UK). The films with measured thicknesses were cut into dimensions of 7 × 2 cm² and stored in a desiccator at a relative humidity of 50 ± 5% for 48 hours at 25 ± 0.5 °C. TS and EAB values of films were detected under 5 kg load with 50 mm/min speed. At least three replications were conducted per experiment.

2.2.3. Color, light transmission and opacity of the films

The color values of the films (CIE L^* , a^* , and b^*) were determined according to the method used by Özdestan & Uren (2009) using Hunter colorimetry (Colorflex HunterLab, USA). After the colorimetry was calibrated with black and white plates the color measurement of the films was applied in daylight. The sample chamber was closed with a white plate and applied 10 times. According to the method applied by Peng & Li (2014), the light transmittance and opacity values were determined in the film samples. The film samples cut into 1 x 4 cm² sizes were placed in a quartz cuvette and the transmittance values of the film sample were measured at wavelengths of 200-800 nm using a UV-Vis spectrophotometer (Agilent Technologies Cary 60 UV-Vis, USA). The opacity value of the film samples was calculated by the ratio of the absorbance at 600 nm to the thickness.

2.2.4. Total phenolic content of the films

When determining the total phenolic content (TPC) of film samples, modifications were made to the method originally used by Xu & Chang (2007). The sample extraction process was carried out according to the method applied by Boulekbache-Makhlouf et al. (2013). 3 mL of pure water, 0.25 mL of Folin-Ciocalteu reagent and 0.75 mL of 7% (w/v) Na²CO³ were added to 50 µL of extract taken from film samples and mixed. And it was kept at room temperature for 8 min. Then 0.95 mL of pure water was added to them and kept in the dark for 2 h. Absorbances were measured at 760 nm by UV-Vis spectrophotometer and the measurement results were given as gallic acid equivalent (µg of GAE/g sample).

2.2.5. Antioxidant activity of the films

Some modifications have been made to the DPPH method used for analyzing the antioxidant activity of films by Brand-Williams et al. (1995). The sample extraction process was carried out according to the method applied by Boulekbache-Makhlouf et al. (2013). 1.98 mL of DPPH (60 µM) solution was mixed with 30 µL of the extract taken from film samples. Absorbance value of the solution was determined with UV-Vis spectrophotometer at 515 nm. The inhibition (%) was calculated as follows (1);

$$inhibition\% = \frac{(Absorbance_{control}) - (Absorbance_{sample})}{(Absorbance_{control})} * 100 \quad (1)$$

2.2.6. Scanning electron microscopy analysis

The surface morphology of the films was imaged by scanning electron microscopy (SEM) (Thermo Scientific ApreoS, ABD) using at 5000× magnification.

2.2.7. Statistical analysis

SPSS Statistics 25.0 was used for statistical analysis of the experimental data. One-way analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple interval tests were performed to evaluate the confidence of the scale at 95% (P≤0.05). The analyses were conducted in at least 3 parallels and 3 replicates.

3. Results and Discussion

3.1. Thickness of the films

The thickness of the films directly affects the film solubility, tensile strength, elongation at break and barrier properties of the films. Therefore, the fact that the film thickness is an important parameter contributes to its selection as a packaging material (Gutiérrez et al., 2015; Khodaei et al., 2020). Table 1 shows the average thickness values of SA and TEO/SA films. It has been shown that the pure SA (control) film thickness has the lowest value (0.087 mm) among all film formulations (Table 1). It is

observed that the film thicknesses increased due to the increase in the concentration of thyme oil added to the film forming solution, and the sample with the highest thickness value was SA/TEO 1.5% (0.231 mm) film. In the study conducted by [Jouki et al. \(2014\)](#), films prepared from quince seed mucilage with added thyme essential oil at concentrations of 0%, 1%, 1.5%, and 2% (v/v) showed thicknesses of 0.063 mm for the control film. As the concentration of thyme essential oil increased, the thicknesses of the films also increased to 0.066 mm, 0.070 mm, and 0.076 mm, respectively. Parallel results were obtained to the findings of this study. The lipid phase in essential oils can affect the sequence of the polymer chain in such a way as to cause a loose and irregular structure, and it has been reported that this can lead to an increase in film thickness ([Tongnuanchan et al., 2012](#)).

3.2. Mechanical properties of the films

While TS gives information about the strength of the films against breaking, EAB gives information about the stretching capacity of the films before breaking ([Liu et al., 2020](#)) Table 1 shows the TS and EAB values of the developed films. According to the results, the TEO concentration used during film preparation had a remarkable effect on the TS and EAB values of SA based films. It was found that the significant differences were determined in TS values between TEO added films and SA (control) films ($P < 0.05$). While the TS value of SA films was high at 50.06 MPa, the TS value of the films decreased from 37.29 to 27.14 MPa with the addition of 1.5% TEO. The essential oils added to the film forming solutions cause the degradation of the film matrix network and therefore a decrease in the TS values occurs ([Hosseini et al., 2009](#)). It has been observed that the EAB values increase with the increase of TEO concentration. The group with the highest EAB value was SA/TEO 1.5% film (32.02 %). In the study by [Abdel Aziz et al. \(2018\)](#), film formulation solutions were prepared using 1% (w/v) sodium alginate with different concentrations of cumin oil (0%, 1%, 2%, and 3%). For the control (SA) films, the tensile strength was measured at 17.35 MPa. At a concentration of 1% castor oil, this value increased to 48.15 MPa, but it decreased to an average of 30 MPa at concentrations of 2% and 3%. In the control (sodium alginate) films, the elongation at break was measured at 10.04%, and this value increased up to 15.86% with increasing concentrations of castor oil. Parallel results were obtained to the findings of this study. With the addition of TEO to the films, the EAB values increased and, depending on this situation, the films became more elastic and extensible. By adding essential oils to the film formulation, a heterogeneous structure is formed with matrix networks that do not show stability. This leads to an increase in the EAB values of the films and a decrease in the TS values ([Benavides et al., 2012](#); [Shojaee-Aliabadi et al., 2013](#); [Moey et al., 2018](#)).

3.3. Film solubility

The FS, which is an important feature of edible films, is one of the characteristics should be low in order to increase the integrity and water resistance of food in potential food applications ([Ghasemlou et al., 2011](#)). Table 1 shows the FS levels for SA (control) and SA/TEO films prepared at different TEO concentrations. The SA film prepared was very soluble in water (91.78%). A decrease in FS values occurred due to the addition of TEO to the film matrix. There was a 17% decrease in FS values compared to the SA/TEO 0.5% film with the SA (control) film; a 24% decrease in FS values compared to the SA/TEO 1% film with the SA (control) film and a 27% decrease compared to the SA/TEO 1.5% film with the SA (control) film. There was no significant difference between the FS values of SA/TEO 1% and SA/TEO 1.5% film samples ($P > 0.05$). It is observed that TEO added to the film forming solution caused a decrease in film solubility due to their concentration.

Table 1. Thickness, mechanical properties, and FS values of SA and SA/TEO films

Types of films	Thickness (mm)	FS (%)	TS (MPa)	EAB (%)
SA	0.087±0.001 ^d	91.78±1.11 ^a	50.06±6.59 ^a	13.88±2.53 ^c
SA/TEO- 0.5%	0.142±0.004 ^c	76.06±1.70 ^b	37.29±3.86 ^{ab}	24.56±1.27 ^b
SA/TEO- 1%	0.206±0.005 ^b	68.98±1.88 ^c	29.34±1.29 ^b	30.90±2.98 ^{ab}
SA/TEO- 1.5%	0.231±0.006 ^a	66.50±4.06 ^c	27.14±1.30 ^b	32.02±5.77 ^a

SA: sodium alginate, SA/TEO-0.5%: sodium alginate/ 0.5% thyme essential oil, SA/TEO-1%: sodium alginate/ 1% thyme essential oil, SA/TEO-1.5%: sodium alginate/ 1.5% thyme essential oil.

3.4. Optical properties of the films

The color characteristics affect the appearance, suitability, marketability of the coated products and the consumer's purchasing decisions (Shahbazi, 2017). Table 2 shows the color values (CIE L^* , a^* , and b^*) measured of the film samples. When taken from the point of view of L^* values, it was observed that the SA (control) and SA/TEO 0.5% films did not differ ($P>0.05$), but increased slightly in the SA/TEO 1.5% film group, when the concentration of TEO was the highest. With this increase in the L^* value, it was concluded that the color of the films was closer to white and clearer. When a^* (redness-greenness) values were compared, three other films other than the SA (control) film did not have significant differences ($P>0.05$). In addition, as the TEO concentration increased, the b^* value increased from 12.09 to 13.14. In other words, it was seen that the film colors yellow with an increase in b^* value. It was observed that the SA/TEO 1.5% film is more yellow and less opaque than other films with an increased concentration of TEO. When considering the a values, there was no significant difference among the first three groups ($P > 0.05$). However, there was a significant difference observed in the % 1.5 KY-SA film group ($P < 0.05$). Regarding the a^* values, except for the control (SA) film, the other three films did not show significant differences ($P > 0.05$). According to Yan et al. (2012), color differences between a^* and b^* values in films containing TEO may be caused by phenolic compounds that contribute to the yellowish color. Color changes in films can be related to the properties of the components added to the film matrix and the drying conditions of the films. In the study by Mahcene et al. (2019), a film formulation solution was prepared using 3% (w/v) sodium alginate, 2.5% (w/v) glycerol, and various essential oils. The color values (L^* , a^* , b^*) for sodium alginate films were found to be 87.86, -0.348, and 10.34, respectively. Upon addition of various essential oils derived from plants, the L^* value ranged from 85.83 to 88.68, the a^* value ranged from -0.446 to -0.329, and the b^* value ranged from 11.3 to 12.21.

The opacity values of the films were interpreted based on values at 600 nm and were measured between 2.69 and 1.64 (Table 2). Opacity is the measure of a substance's ability to block the penetration of light. Transparent films allow consumers to easily see the food, which is desirable as it allows more light to penetrate through (Pereda et al., 2014). Thus, the aesthetic value of the product increases. But with more light penetration, foods can become more susceptible to spoilage. Opaque films exhibit light barrier properties and serve as a measure to protect foods from oxidation. It was determined that the opacity values of SA (control) films were higher than other film samples. Adding TEO at concentrations of 0.5% and 1% to films resulted in a decrease in opacity values, whereas TEO added at a concentration of 1.5% increased the opacity values of the films. According to Acosta et al. (2015) it has been reported that opacity is affected by intramolecular interactions and the distribution of components in the film matrix. In this study, it was concluded that interactions within the film matrix led to a decrease in light transmission. Transparency increased in SA/TEO 0.5% and SA/TEO 1% films, whereas transparency decreased in SA/TEO 1.5% films, approaching the transparency values of SA films. Similar results were observed in the study by Hammoudi et al. (2019). In this study, lemon essential oil was added to sodium alginate film solutions along with certain amounts of montmorillonite and Tween 80 (0.5%, 1%, 1.5%). The opacity values of the films were measured at 600 nm. The opacity value of sodium alginate films was found to be approximately 2.04 nm/mm. When montmorillonite and 0.5% and 1% (v/v) lemon essential oils were added, an increase in opacity was observed. However, with 1.5% (v/v) lemon oil, a decrease in opacity was observed.

Table 2. Colour parameters and opacity values of SA and SA/TEO films

Types of films	Color Parameters				Opacity _{600 nm}
	L^*	a^*	b^*	E	
SA	84.59±0.16 ^b	-1.51±0.01 ^a	12.09±0.14 ^b	2,64±0.75 ^b	2.69±0.09 ^a
SA/TEO- 0.5%	84.50±0.61 ^b	-1.59±0.03 ^b	13.85±0.55 ^a	3,04±0.73 ^{ab}	2.40±0.06 ^a
SA/TEO- 1%	84.94±0.71 ^{ab}	-1.60±0.03 ^b	14.22±0.97 ^a	3,71±0.23 ^{ab}	1.64±0.11 ^b
SA/TEO- 1.5%	85.78±0.18 ^a	-1.61±0.00 ^b	13.14±0.10 ^{ab}	4,12±0.41 ^a	2.29±0.38 ^a

SA: sodium alginate, SA/TEO-0.5%: sodium alginate/ 0.5% thyme essential oil, SA/TEO-1%: sodium alginate/ 1% thyme essential oil, SA/TEO-1.5%: sodium alginate/ 1.5% thyme essential oil

The light barrier capacity and visible light transmittance of the films are important for the packaging material. For the prevention and reduction of the effect of UV radiation, the visible light transmission of films is an important characteristic (Hu et al., 2020). Increased light transmittances in films can catalyze oxidation reactions in foods and thus cause undesirable reactions to begin. Table 3 shows the light transmission of SA (control) and SA/TEO films ranging from 200 to 800 nm. The average light transmittance values (%T) of the film samples in the visible region (350-800 nm) were measured as the highest SA (control) films. It is observed that a decrease in the light transmittance values occurs in films with the addition of TEO. As the concentration of TEO added to the film forming solution increased, light transmittance decreased. The samples exhibiting the lowest transmittance value among the groups were the SA/TEO 1.5% film samples. It is observed that the light transmittance values of the films are lower in the UV (200-280 nm) region compared to the values measured in the visible region. When the obtained results were considered statistically, it was found that there were significant differences in light transmittances between the film samples ($P < 0.05$). The high light transmittance values of the control (SA) films were decreased with thyme oil added to the film formulation. This is important in terms of protecting foods from oxidation and being acceptable for the consumer. In general, it can be seen that SA (control) films are not very effective in terms of UV barrier, whereas SA films containing TEO have better UV barrier properties.

Table 3. UV and visible light transmission values of SA and SA/TEO films

Types of films	Wavelengths (nm)							
	200 nm	280 nm	300 nm	400 nm	500 nm	600 nm	700 nm	800 nm
SA	0.03±0.00 ^a	7.05±0.66 ^a	27.28±2.67 ^a	36.57±2.56 ^a	49.68±2.41 ^a	58.30±1.10 ^a	61.01±2.48 ^a	65.23±1.29 ^a
SA/TEO-0.5%	0.03±0.00 ^b	1.91±0.21 ^b	33.98±2.21 ^a	35.13±2.67 ^a	45.26±0.66 ^b	45.58±0.88 ^b	50.73±4.57 ^a	55.48±2.25 ^{ab}
SA/TEO-1%	0.03±0.00 ^b	0.08±0.00 ^c	33.10±2.38 ^a	35.13±4.26 ^a	45.18±0.42 ^b	45.98±7.79 ^b	49.85±1.02 ^a	51.70±6.07 ^b
SA/TEO-1.5%	0.02±0.00 ^c	0.02±0.00 ^c	26.00±8.29 ^a	29.69±10.54 ^a	21.95±0.77 ^c	29.55±5.64 ^c	34.97±8.16 ^b	37.06±8.14 ^c

SA: sodium alginate, SA/TEO-0.5%: sodium alginate/ 0.5% thyme essential oil, SA/TEO-1%: sodium alginate/ 1% thyme essential oil, SA/TEO-1.5%: sodium alginate/ 1.5% thyme essential oil

3.5. Total phenolic content and antioxidant activity of the films

The mean TPC values of the film samples were measured between 86.21 mg/kg and 382.84 mg/kg (Table 4). When the results were considered statistically, it was determined that there were significant differences between the film samples in terms of TPC ($P < 0.05$). It is observed that the total amount of phenolic content in the films increases as the concentration of TEO added to the film forming solution increases. The group with the highest total amount of phenolic content is the SA/TEO 1.5% group. The mean antioxidant activity values (inhibition%) of the film samples were measured between 0.53% and 16.20% (Table 4.). When the results were considered statistically, it was determined that there were significant differences between the film samples from the point of antioxidant activity ($P < 0.05$). It is observed that the antioxidant activity values of the films increase due to the increase in the concentration of TEO added to the film forming solution, and the group with the highest antioxidant activity value has SA/TEO 1.5% film samples. There was no statistically significant difference between the SA film group and the SA/TEO 0.5% film group ($P > 0.05$). The total TPC has free radical scavenging capabilities. Because of this, it also has an effect on antioxidant capacity. Therefore, it is expected that there is a correlation between TPC and antioxidant capacity. This situation has been the same for all film samples. TEO contains high phenolic components. Therefore, an increase in the total phenolic content and antioxidant activity of the films has been observed with increasing concentrations of TEO. In the study by Jouki et al. (2014), edible films were prepared from quince seed mucilage by adding thyme essential oil at concentrations of 0%, 1%, 1.5%, and 2% (v/v). Depending on the increasing concentrations of thyme oil (1%, 1.5%, and 2%), significant increases were observed both in antioxidant activity values and phenolic content. The findings in this study have shown parallels with the results obtained in the mentioned study.

Table 4. TPC and antioxidant activity values (DPPH) of SA and SA/TEO films

Types of films	TPC content (mg GAE/kg)	Antioxidant activity (%inhibition)
SA	86.1±9.07d	0.53±0.82c
SA/TEO- 0.5%	134.44±1.61c	4.27±1.87c
SA/TEO- 1%	264.64±3.97b	8.47±3.64b
SA/TEO- 1.5%	382.84±19.70a	16.20±0.12a

SA: sodium alginate, SA/TEO-0.5%: sodium alginate/ 0.5% thyme essential oil, SA/TEO-1%: sodium alginate/ 1% thyme essential oil, SA/TEO-1.5%: sodium alginate/ 1.5% thyme essential oil

3.6. SEM

Depending on the structure of the film matrix, changes may occur in the morphology of the film. The SA (control) films have a homogeneous and uniform structure, as shown in the surface images (Fig 1). The addition of TEO caused a heterogeneous appearance on the film surface areas. It is seen that SA/TEO 0.5% films are also close to a homogeneous appearance, but there are some air bubbles on their surfaces (Fig 1). While SA/TEO 1% films have a partially heterogeneous appearance, it is observed that SA/TEO 1.5% films have a heterogeneous appearance (Figure 1). It is observed that the emulsion stability cannot be maintained with the increase in the concentration of TEO and it causes a heterogeneous appearance on the film surfaces. The emulsion has a heterogeneous and rough surface due to the formation of two phases (oil-polysaccharide) in the film matrix. This rough structure occurs during the drying of the films by migrating the lipids to the film surface, causing irregularities to form on the surface. As reported by [Jouki et al. \(2014\)](#) the addition of TEO lipid droplets at concentrations of 1% and 1.5% caused a heterogeneous structure in the films by their retention in the film matrix containing polysaccharide-based continuity. The molecular bonding between TEO and SA may differ depending on the film forming solution. Lipid droplets vary depending on the chemical composition and physical properties of TEO, and therefore also affect the morphology of the film.

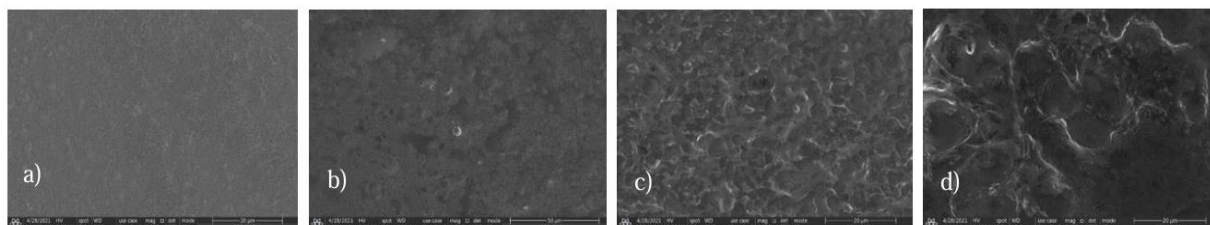


Figure 1. The surface SEM images of SA and SA/TEO films at 5000 magnifications (a) SA; b) SA/TEO 0.5%; c) SA/TEO 1%; d) SA/TEO 1.5%).

4. Conclusion

In this study, sodium alginate-based films with functional properties were enriched with thyme essential oil, and their physical and chemical properties were examined. The films prepared from sodium alginate SA (2% w/v) were aimed to be enhanced in their physical and chemical properties by adding thyme essential oil at different concentrations. TEO added to the SA based film forming solution caused the EAB and light transmittance properties of the films to improve, while the FS and TS properties of the films to decrease. Changes in the mechanical properties of films as a result of chemical bonds occurring in the structure with the addition of TEO show consistency with SEM images. According to the SEM images of the films, TEO has shown that it causes a heterogeneous structure in the film structure as a result of an increasing concentration. This situation supported that the emulsion structure was affected due to the increased concentration of TEO added. With TEO added to the films, the b^* value increased as a result of the occurrence of yellowness in the films and it has been observed that FT values have also increased. The components of carvacrol and thymol in TEO provide antioxidant properties to the essential oil ([Dashipour et al., 2015](#)). Therefore, an increase in the concentration of TEO has led to an increase in the antioxidant activity and TPC values of the films. In general, based on the results obtained, SA films with TEO addition are a promising alternative as edible packaging

materials due to their low light transmittance, increased extensibility, improved antioxidant activity, and total phenolic content (TPC). For future studies, microbial analysis of SA/TEO films will open avenues for further investigation.

Acknowledgements

This work was supported by Ege University Scientific Research Projects Coordination Unit (Project number FYL 2020 22112).

References

- Abdel Aziz, M. S., Salama, H. E., & Sabaa, M. W. (2018). Biobased alginate/castor oil edible films for active food packaging. *LWT- Food Science and Technology*, 96, 455-460. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.049>
- Acosta, S., Jiménez, A., Cháfer, M., González-Martínez, C., & Chiralt, A. (2015). Physical properties and stability of starch-gelatin based films as affected by the addition of esters of fatty acids. *Food Hydrocolloids*, 49, 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.03.015>
- Aguirre-Joya, J. A., De Leon-Zapata, M. A., Alvarez-Perez, O. B., Torres-León, C., Nieto-Oropeza, D. E., Ventura-Sobrevilla, J. M., ... & Aguilar, C. N. (2018). Basic and applied concepts of edible packaging for foods. In: A. M. Grumezescu, & A. M. Holban (Eds.), *Food packaging and preservation handbook of food bioengineering*, Vol 9, (pp 1-46). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811516-9.00001-4>
- Ahmad, M., Benjakul, S., Prodpran, T., & Agustini, T. W. (2012). Physico-mechanical and antimicrobial properties of gelatin film from the skin of unicorn leatherjacket incorporated with essential oils. *Food Hydrocolloids*, 28(1), 189-199. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.12.003>
- Anonymous. (2021). Food and drug administration title 21, part 184 sec. 184.1724 sodium alginate. FDA, U.S. Access date: 23 July 2021. <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/cfrsearch.cfm?fr=184.1724>
- ASTM. (2001). *Standard D882 annual book of american standard testing methods; Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting*. Philadelphia, PA, USA, 162-170 pp.
- Benavides, S., Villalobos-Carvajal, R., & Reyes, J. E. (2012). Physical, mechanical and antibacterial properties of alginate film: Effect of the crosslinking degree and oregano essential oil concentration. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.023>
- Bhagath, Y. B., & Manjula, K. (2019). Influence of composite edible coating systems on preservation of fresh meat cuts and products: a brief review on their trends and applications. *International Food Research Journal*, 26(2), 377-392.
- Boulekbache-Makhlouf, L., Slimani, S., & Madani, K. (2013). Total phenolic content, antioxidant and antibacterial activities of fruits of Eucalyptus globulus cultivated in Algeria. *Industrial Crops and Products*, 41, 85-89. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.019>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT- Food Science and Technology*, 28(1), 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Chen, J., Wu, A., Yang, M., Ge, Y., Pristijono, P., Li, J., ... & Mi, H. (2021). Characterization of sodium alginate-based films incorporated with thymol for fresh-cut apple packaging. *Food Control*, 126, 108063. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108063>
- Dashipour, A., Razavilar, V., Hosseini, H., Shojaee-Aliabadi, S., German, J. B., Ghanati, K., ... & Khaksar, R. (2015). Antioxidant and antimicrobial carboxymethyl cellulose films containing Zataria multiflora essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 606-613. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.09.006>
- Dehghani, S., Hosseini, S. V., & Regenstien, J. M. (2018). Edible films and coatings in seafood preservation: A review. *Food Chemistry*, 240, 505-513. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.034>

- Emiroğlu, Z. K., Yemis, G. P., Coskun B. K., & Candogan, K. (2010). Antimicrobial activity of soy edible films incorporated with thyme and oregano essential oils on fresh ground beef patties. *Meat Science*, 86(2), 283-288. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.016>
- Gaowa, S., Feng, K., Yuanzheng, L., Long, Y., & Wenzhong, H. (2023). Effect of alginate-based edible coating containing thyme essential oil on quality and microbial safety of fresh-cut potatoes. *Horticulturae*, 9(5), 543. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9050543>
- Ghasemlou, M., Khodaiyan, F., & Oromiehie, A. (2011). Physical, mechanical, barrier, and thermal properties of polyol-plasticized biodegradable edible film made from kefirin. *Carbohydrate Polymers*, 84(1), 477-483. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.010>
- Gokbulut, I., & Ozturk, F. S. (2018). Use of alginate in food microencapsulation. *Batman University Journal of Life Sciences*, 8(1/2), 16-28.
- Gutiérrez, T. J., Tapia, M. S., Perez, E., Fama', L. (2015) Structural and mechanical properties of edible films made from native and modified cush-cush yam and cassava starch. *Food Hydrocolloids*. 45, 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.017>
- Hammoudi, N., Cherif, H. Z., Borsali, F., Benmansour, K., & Meghezzi, A. (2019). Preparation of active antimicrobial and antifungal alginatemontmorillonite/ lemon essential oil nanocomposite films. *Materials Technology*, 35(7), 383-394. <https://doi.org/10.1080/10667857.2019.1685292>
- Hosseini, M. H., Razavi, S. H., & Mousavi, M. A. (2009). Antimicrobial, physical and mechanical properties of chitosan-based films incorporated with thyme, clove and cinnamon essential oils. *Journal of Food Processing and Preservation*, 33(6), 727-743. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2008.00307.x>
- Hu, X., Yuan, L., Han, L., Li, S., & Zhou, W. (2020). The preparation, characterization, anti-ultraviolet and antimicrobial activity of gelatin film incorporated with berberine-HP-β-CD. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 586, 124273. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124273>
- Jouki, M., Mortazavi, S. A., Yazdi, F. T., & Koocheki, A. (2014). Characterization of antioxidant antibacterial quince seed mucilage films containing thyme essential oil. *Carbohydrate Polymers*, 99, 537-546. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.077>
- Kavoosi, G., Dadfar, S. M. M., & Purfard, A. M. (2013). Mechanical, physical, antioxidant, and antimicrobial properties of gelatin films incorporated with thymol for potential use as nano wound dressing. *Journal of Food Science*, 78(2), E244-E250. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12015>
- Khodaei, D., Oltrogge, K., & Hamidi-Esfahani, Z. (2020). Preparation and characterization of blended edible films manufactured using gelatin, tragacanth gum and, Persian gum. *LWT Food Science and Technology*, 117, 108617. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108617>
- Kurek, M., Scetar, M., & Galic, K. (2017). Edible coatings minimize fat uptake in deep fat fried products: A review. *Food Hydrocolloids*, 71, 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.05.006>
- Liu, C., Huang, J., Zheng, X., Liu, S., Lu, K., Tang, K., & Liu, J. (2020). Heat sealable soluble soybean polysaccharide/gelatin blend edible films for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100485. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100485>
- Mahcene, Z., Khelil, A., Hasni, S., Akman, P. K., Bozkurt, F., Birech, K., ... & Tornuk, F. (2019). Development and characterization of sodium alginate based active edible films incorporated with essential oils of some medicinal plants. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.093>
- Mahcene, Z., Hasni, S., Goudjil, M. B., & Khelil, A. (2021). Food edible coating systems: A review. *European Food Science and Engineering*, 2(1), 26-33.
- Moey, S. W., Abdullah, A., & Ahmad, I. (2018). Effect of cinnamomum zeylanicum essential oil on the physical and mechanical properties of edible films from kappaphycus alvarezii. *Malaysian Applied Biology*, 47(5), 197-203.
- Mohamed, S. A. A., El-Sakhawy, M., & El-Sakhawy, M. A.-M. (2020). Polysaccharides, protein and lipid-based natural edible films in food packaging: A review. *Carbohydrate Polymers*, 238, 116178. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116178>

- Okcu, Z., Yavuz, Y., & Kerse, S. (2018). Edible film and coating applications in fruits and vegetables. *Alinteri Journal of Agricultural Science*, 33(2), 221-226. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.368362>
- Özdestand, Ö., & Üren, A. (2009, Mayıs). *Piyasada satılan bazı şalgam suyu örneklerinin renk değerlerinin (L^* , a^* , b^*) belirkenmesi*. II. Geleneksel Gıdalar Sempozyumu, Van.
- Pavlath, A. E., & Orts, W. (2009). Edible films and coatings: why, what, and how? In K. C. Huber & M. E. Embuscado (Eds.), *Edible films and coatings for food applications* (pp 1-23). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92824-1_1
- Peng, Y., & Li, Y. (2014). Combined effects of two kinds of essential oils on physical, mechanical and structural properties of chitosan films. *Food Hydrocolloids*, 36, 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.10.013>
- Pereda, M., Dufresne, A., Aranguren, M. I., & Marcovich, N. E. (2014). Polyelectrolyte films based on chitosan/olive oil and reinforced with cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, 101, 1018-1026. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.046>
- Peretto, G., Du, W.-X., Avena-Bustillos, J., De J., Berrios, R. J., Sambo, P., & McHugh, T. H. (2014). Optimization of antimicrobial and physical properties of alginate coatings containing carvacrol and methyl cinnamate for strawberry application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(4), 984-990. <https://doi.org/10.1021/jf4042886>
- Pop, O. L., Pop, C. R., Dufrechou, M., Vodnar, D. C., Socaci, S. A., Dulf, F. V., ... & Suharoschi, R. (2019). Edible films and coatings functionalization by probiotic incorporation: A Review. *Polymers*, 12(1), 12. <https://doi.org/10.3390/polym12010012>
- Sarengaowa, Hu, W., Jiang, A., Xiu, Z., & Feng, K. (2018). Effect of thyme oil-alginate-based coating on quality and microbial safety of fresh-cut apples. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(6), 2302-2311. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8720>
- Sarıcaoglu, F. T., & Turhan, S. (2020). Physicochemical, antioxidant and antimicrobial properties of mechanically deboned chicken meat protein films enriched with various essential oils. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100527. <https://doi.org/10.1016/j.foodpsl.2020.100527>
- Senturk Parreidt, T., Müller, K., & Schmid, M. (2018). Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications. *Foods*, 7(10), 170. <https://doi.org/10.3390/foods7100170>
- Shahbazi, Y. (2017). The properties of chitosan and gelatin films incorporated with ethanolic red grape seed extract and Ziziphora clinopodioides essential oil as biodegradable materials for active food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 99, 746-753. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.065>
- Shakerardekani, A., Hashemi, M., Shahedi, M., & Mirzaalian Dastjerdi, A. (2021) Enhancing the quality of fresh pistachio fruit using sodium alginate enriched with thyme essential oil. *Journal of Agricultural Science Technology*, 23(1), 65-82.
- Shojaee-Aliabadi, S., Hosseini, H., Mohammadifar, M. A., Mohammadi, A., Ghasemlou, M., Ojagh, S. M., ... & Khaksar, R. (2013). Characterization of antioxidant-antimicrobial κ-carrageenan films containing Satureja hortensis essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 52, 116-124. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.08.026>
- Tabassum, N., & Khan, M. A. (2020). Modified atmosphere packaging of fresh-cut papaya using alginate based edible coating: Quality evaluation and shelf-life study. *Scientia Horticulturae*, 259, 108853. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108853>
- Tongnuanchan, P., Benjakul, S., & Prodpran, T. (2012). Properties and antioxidant activity of fish skin gelatin film incorporated with citrus essential oils. *Food Chemistry*, 134(3), 1571-1579. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.094>
- Ulusoy, B. H., Yıldırım, F. K., & Hecer, C. (2018). Edible films and coatings: A good idea from past to future technology. *Journal Food Science and Technology*, 5(1), 28-33. <https://doi.org/10.18488/journal.58.2018.51.28.33>
- Umaraw, P., & Verma, A. K. (2015). Comprehensive review on application of edible film on meat products: An eco-friendly approach. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1270-1279. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.986563>
- Venturini Antunes, G., Sodr , G. M., Rad niz, M., Silva da Rosa, R., Rodrigues, A., Arocha Gularte, M., ... & Avila Gandra, E. (2023). Bioactive coating of sodium alginate and agar added with essential oils of thyme (*thymus vulgaris* L.) and sweet orange (*citrus aurantium* var. *dulcis*) with

- antimicrobial properties applied over strawberries. *Revista Chilena de Nutrición*, 50(3), 281-290. <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182023000300281>
- Xu, B. J., & Chang, S. K. C. (2007). A comparative study on phenolic profiles and antioxidant activities of legumes as affected by extraction solvents. *Journal of Food Science*, 72(2), 159-166. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00260.x>
- Yan, Q., Zhang, J., Dong, H., Hou, H., & Guo, P. (2012). Properties and antimicrobial activities of starch-sodium alginate composite films incorporated with sodium dehydroacetate or rosemary extract. *Journal of Applied Polymer Science*, 127(3), 1951-1958. <https://doi.org/10.1002/app.37570>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Duvara Yakın Tandem Silindirler Etrafındaki Akış Yapıları

Engin PINAR^{*1}, Gökhan YAŞAR²

¹Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 01950, Adana, Türkiye

²Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş., 33450, Mersin, Türkiye

Engin PINAR, ORCID No: 0000-0002-7484-8616, Gökhan YAŞAR, ORCID No: 0009-0007-6611-363X

* Sorumlu yazar e-posta: epinar@cu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 25.01.2024
Kabul: 20.03.2024
Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1425502](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1425502)

Anahtar Kelimeler

Akış yapısı,
Ard izi,
Dairesel silindir,
Türbülans,
Yakın duvar

Öz: Bu çalışmada, ard arda yerleştirilmiş dairesel kesitli iki silindirin tabanla aralarındaki mesafenin değiştirilmesi ile oluşan akış yapısının karşılaştırmalı bir çalışması Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Tekniği (PIV) kullanılarak deneysel olarak araştırıldı. Su kanalında $h/D = 0.5$ ve 1 olmak üzere üç farklı yükseklik oranı için deneyler yapılmıştır. Yükseklik oranı, boşluk yüksekliğinin (daireSEL silindirin alt yüzeyi ile duvar yüzeyi arasındaki) silindir çapına oranı olarak tanımlanmaktadır. Ard arda yerleştirilen silindirler arasındaki mesafe G/D boşluk oranı olarak tanımlanmış olup, $G/D = 1$ olarak deneyler süresince sabit tutulmuştur. Silindir çapına bağlı, D , Reynolds sayısı, $Re = 2100$ ve sınır tabakasının kalınlığı $\delta/D = 0.4$ olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları zaman ortalamalı akım çizgileri $\langle \psi \rangle$, zaman ortalamalı girdap eş düzey eğrileri, $\langle \omega \rangle$, ve Reynolds gerilmeleri, dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bulgular, yükseklik oranının, h/D silindirler etrafındaki akış yapıları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Deneyden elde edilen akış verilerinden de anlaşılacağı üzere, silindir üzerindeki ayrılma noktasının ve silindir arkasındaki ard izi bölgesinin farklı silindir yüksekliklerinde değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, ölü akış bölgesinde oluşan vorteks büyüklüklerinin ve Reynolds kayma gerilmesi değerlerinin de silindir yüksekliğine bağlı olarak farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Silindir çiftinin etrafındaki akışın tek silindire göre daha karmaşık, kararsız ve çok değişken bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir.

Flow Structures Around Tandem Cylinders Near Wall

Article Info

Received: 25.01.2024
Accepted: 20.03.2024
Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1425502](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1425502)

Keywords

Circular cylinder,
Flow structure,
Near wall,
Turbulence,
Wake region

Abstract: In this study, a comparative study of the flow structure formed by changing the distance between two consecutively placed circular cross-section cylinders and the base was investigated experimentally using the Particle Imaging Velocimetry Technique (PIV). Experiments were carried out for three different height ratios in the water channel: $h/D = 0, 0.5$ and 1 . The height ratio is defined as the ratio of the cavity height (between the bottom surface of the circular cylinder and the wall surface). The distance between consecutively placed cylinders was defined as the G/D gap ratio, and it was kept constant throughout the experiments as $G/D = 1$. Depending on the cylinder diameter, D is determined as the Reynolds number, $Re = 2100$, and the thickness of the boundary layer is $\delta/D = 0.4$. Experimental results were evaluated by taking into account time-averaged streamlines $\langle \psi \rangle$, time-averaged vortex contour lines, $\langle \omega \rangle$, and Reynolds stresses. The findings showed that the void ratio, G/D and height ratio have a significant impact on the flow structures around H/D cylinders. As can be seen from the flow data obtained from the experiment, it has been observed that the separation point on the cylinder and the dead flow zone behind the cylinder vary at different cylinder heights. In addition, it was determined that the vortex sizes, $\langle \omega \rangle$, and Reynolds shear stress values formed

in the dead flow region differ depending on the cylinder height. It has been determined that the flow around a pair of cylinders has a more complex, unstable, and highly variable structure than that of a single cylinder.

1. Giriş

Akışla ilgili sorunlarla doğada ve mühendislik uygulamalarının çoğunda düzenli olarak karşılaşılmaktadır. Bunun nedeni, nesnelere bir akış ortamında var olması ve bu durumun, nesnelere çevreleyen akış üzerinde kontrol uygulanması gerekliliğiyle sonuçlanmasıdır. Bu sorunların en önemlileri akıştan kaynaklanan titreşimler ve nesnenin akış boyunca hareketine karşı direnç kuvveti olarak adlandırılan dirençtir. Akışkanlar mekaniğinin çok sayıda uygulaması kararsız akışların varlığını içerir. Bu uygulamaların bazı örnekleri arasında yüksek binalar, köprü ayakları, havacılık ve otomotiv endüstrileri, rüzgâr türbini kanatları, turbomakineler ve diğerleri yer almaktadır. Akış kontrolü yaklaşımlarının oluşturulması söz konusu olduğunda, bu akışların yapısının sağlam bir şekilde anlaşılması önemlidir. Sonuç olarak akış içerisinde yerleştirilen silindirin arkasında gelişen kararsız akış yapısının kontrol altına alınması amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara literatürde rastlamak mümkündür. Bu çalışma sayesinde, düz bir silindirin ve tabana göre farklı yüksekliklerde arka arkaya yerleştirilmesi sonucu oluşan akış yapısının, silindirlerin tabana olan mesafelerin değişimi ve silindirlerin arasındaki boşluğun akış yapısı üzerine olan etkileri ortaya çıkarılmıştır. Silindir etrafında oluşan akış yapıları ile ilgili çalışmalar [Bloor & Gerrard \(1966\)](#), [Lin ve ark. \(1995\)](#), [Balachandar ve ark. \(1997\)](#), [Akilli ve ark. \(2004\)](#), [Ozgoren \(2006\)](#), [Sahin ve Ozturk \(2009\)](#) tarafından yapılan araştırmalarla verilmiştir. Silindir etrafında oluşan akış yapıları ile ilgili pratik detaylı bilgiye referanslarda verilen kaynaklardan ulaşılabilir. Ard arda sıralı silindirler, girdapların saçılmasının bir sonucu olarak titreşime maruz kalacaktır. Silindirin belirli bir frekans ve genlikte titreşme durumu, girdabın parçalanmasıyla üretilen salınım kuvvetlerinden kaynaklanır.

Tek silindireli FIV (akış kaynaklı titreşimler), hem sayısal hem de deneysel toplulukların önemli miktarda ilgi odağı olmuştur. [Williamson & Roshko \(1988\)](#), girdap saçılımının frekansı yapının (silindir) doğal frekansı ile senkronize olduğunda büyük genlikli salınımın meydana geldiğini bildirdikleri bir deney gerçekleştirdiler. "Senkronizasyon" veya "kilitlenme" gibi çeşitli isimlerle bilinen bu büyük genlikli salınım olgusu, geniş bir frekans aralığında meydana gelir ([Williamson & Govardhan, 2004](#)). Kilitlenmeyi içeren titreşimli bir silindirden meydana gelen girdap kopmaları, aslında sabit bir silindirden meydana gelen girdap kopmalarından daha karmaşıktır. [Sarpkaya \(2004\)](#) ile [Williamson & Govardhan \(2004\)](#) incelemelerinde, kilitlenme sırasında tek bir titreşimli silindirin spesifik girdap kopma özelliklerini ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Sabit tandem silindirler veya elastik olarak yerleştirilmiş tek silindirlerle karşılaştırıldığında, elastik üzerine monte edilmiş iki tandem silindir arasında meydana gelen etkileşimler bu noktada daha karmaşıktır. İki tandem silindir etrafındaki akış yapıları [Zdravkovich \(1988\)](#) ve [Alam ve ark. \(2003\)](#) tarafından özetlenmiştir. [Zhou & Alam \(2016\)](#) boşluk oranı ile akış arasındaki ilişkiye dayanarak üç akış rejimi tanımlamışlardır. Aşağı yöndeki silindirin salınımının, üst yöndeki silindirin salınımından daha büyük olduğu genel olarak doğrudur; ancak yukarı yöndeki silindir salınımının, aşağı yöndeki silindir salınımından daha baskın hale geldiği belirli durumlar vardır ([Qin ve ark., 2019](#)). [Kim ve ark. \(2009\)](#), iki tandem silindir düzenlemesi için hem serbest akım hızının hem de silindirler arasındaki boşluk oranının akış yapıları ve titreşim üzerindeki etkisini araştırmıştır.

[Alam & Meyer \(2013\)](#) tarafından tanımlandığı gibi, yeniden bağlanma akış rejiminde aşağı akış silindirinin izinden kaynaklı titreşimler olarak da bilinen dörtlü girdap titreşimi, boşluk kesme katmanları ile aşağı akış silindiri arasında mevcut olan güçlü temas tarafından sağlanır. Öte yandan, bu olay, boşluk girdapları ile aşağı yönde konumlanan silindir arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak ortak atılım rejiminde meydana gelir. Üst akış silindiri, üst akış silindiri ile alt silindirin sınır katmanları arasındaki temasın bir sonucu olarak şiddetli bir dörtlü girdap titreşimine maruz kalır. [Papaioannou ve ark. \(2008\)](#) tandem silindirlerde akış kaynaklı titreşimler üzerine sayısal bir analiz gerçekleştirdiler. Bu araştırmanın sonuçları boşluk oranının salınım genliği üzerinde etkisi olduğunu gösterdi. Araştırmacılar, boşluk oranının değeri arttığında iki silindirin sanki tek bir silindirmiş gibi salınım yaptığını gözlemlediler. [Borazjani & Sotiropoulos \(2009\)](#) yaptıkları sayısal araştırmada çapraz akışa yerleştirilen iki tandem silindirin boşluk oranının 1.5 D değerinden sonra her iki silindirden kopan

girdapların sıralı salınımlı bir akış yapısı meydana getirdiğini belirlediler. Her iki silindirin salınımlarının çok büyük bir genliğe sahip olduğunu ve kilitleme aralığının, tek bir silindirin salınımlarının toplamından çok daha geniş olduğunu buldular. Aşağı yöndeki silindir, daha önce tartışıldığı gibi, boşluk oranı ve serbest akış hızından büyük ölçüde etkilenir ve aynı çaptaki iki silindir sisteme aynı anda eklendiğinde daha büyük bir genlikte salınım yapar. Ek olarak, farklı çaplara sahip silindirler, silindirlerin salınım genliği akış yapısı üzerinde etkiye sahiptir. Yukarıda tartışılan çalışmaların tümü, aynı çapa sahip iki tandem silindirin akış kaynaklı titreşimleri ile ilgilidir. Öte yandan tandem silindirler, endüstriyel uygulamalarda ve okyanus mühendisliğinde karşılaşılanlar da dâhil olmak üzere, çalıştıkları koşullara bağlı olarak çeşitli çaplara sahip olabilir. Bu nedenle, boşluk oranına ek olarak d/D çap oranı (burada d ve D sırasıyla üst ve alt silindirlerin çaplarıdır) akışın ve buna bağlı salınımların belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Her ne kadar çap oranının akış yapısı ve titreşim tepkileri üzerindeki etkisi geçmişte incelenmiş olsa da (Qin ve ark., 2017; Alam ve ark., 2018; Wang ve ark., 2018; Huera-Huarte & Jiménez- González, 2019), araştırma aynı çaptaki iki silindirle olduğu kadar kapsamlı bir şekilde yürütülmemiştir. Bu çalışma sayesinde, ard arda yerleştirilen dairesel silindir çiftinin tabana göre farklı yüksekliklerde konumlandırılması sonucu oluşan akış yapısı, silindirlerin tabana olan mesafelerin değişimi ve silindirlerin arasındaki boşluğun akış yapısı üzerine olan etkileri ortaya çıkarılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

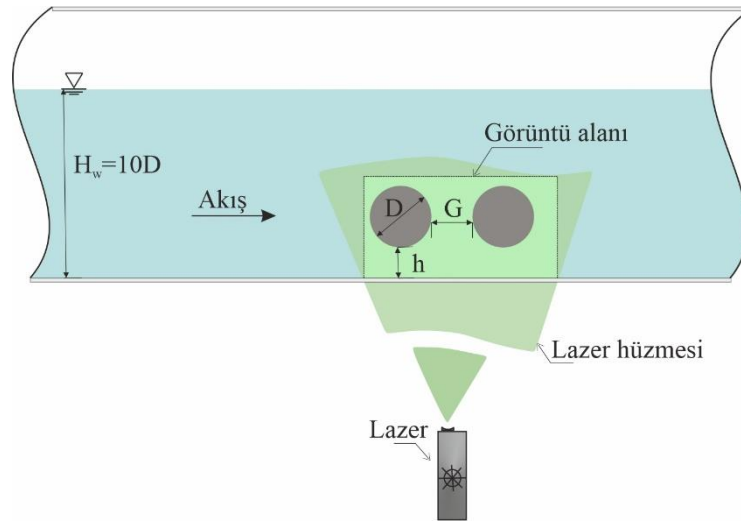
Duvar yakınındaki katı cisim etrafındaki akışa, ısı değiştiricilerinde, borularda, binalarda vb. gibi birçok mühendislik uygulamasında karşılaşılmaktadır. Duvar yakınındaki katı cisimden elde edilen akış yapısı, Reynolds sayısından, Re sınır tabakası kalınlığından, δ/D 'den ve duvar ile katı cismin alt yüzeyi arasındaki yükseklik oranından, h/D değerlerinden önemli ölçüde etkilenir. Bu çalışmanın amacı, parçacık görüntülü hız ölçümünü kullanarak ard arda yerleştirilen dairesel silindir çiftinin etrafında oluşan akış yapısını incelemektir. Şekil 1'de deney düzeneğinin şematik gösterimi görülmektedir. Deneyler üç farklı yükseklik oranında ($h/D = 0.5$ ve 1), boşluk oranının $G/D = 1$ değeri için silindir çapına bağlı Reynolds sayısının, $Re = 2100$ değerinde ve test modellerinin bulunduğu bölgede sınır tabakası kalınlığının $\delta/D = 0.4$ değerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya ait deneyler Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı'nda kapalı devreli açık su kanalında gerçekleştirilmiştir. Su kanalını oluşturan iki su deposu arasına akrilikten bir bölüm konumlandırılmıştır. Su kanalının ölçüleri 8000 mm uzunluğunda, 1000 mm genişliğinde ve 750 mm yüksekliğindedir.

Kanaldaki suyun akışını kontrol eden pompa, hız kontrol ünitesi ile birlikte çalışarak değişken su debileri sağlar. Deneyler boyunca Reynolds sayısının, $Re_D = 2100$ değerine karşılık gelen serbest akış hızı $U = 71$ mm/s olarak sabit tutulmuştur. Deneyler Froude sayısının $Fr = 0.035$ değeri için gerçekleştirilmiştir. Test modellerinin bulunduğu bölgede sınır tabakası kalınlığı $\delta/D = 0.4$ 'tür. Plexiglas, dairesel silindirin malzemesidir. Kanalın türbülans yoğunluğu %0.5 civarındadır. Deneylerde kullanılan silindirin çapı $D = 30$ mm'dir ve test modelleri üç farklı yükseklik oranında tabana yatay olarak monte edilmiştir. Silindirin akışta oluşturduğu kesit daralması ise yaklaşık %3 olarak ayarlanmıştır. Lazer ışığının geçeceği silindir düzleminde mercek etkisini minimize etmek için silindirin içinde su ile doldurulan boş bir hazne oluşturulmuştur. Işığın geçtiği yerin cidar kalınlığı yaklaşık 1.5 mm'dir.

Deneyler boyunca su derinliği $H_w = 400$ mm'de sabit tutulmuştur. Akış özelliklerini herhangi bir hasara yol açmadan gözlemlenmenin bir yolu PIV yaklaşımını kullanmaktır. PIV yöntemi iki aşamada gerçekleşir: görselleştirme ve görüntü inceleme. Akışı incelemeye başlamak için akış karakteristiğiyle uyumlu bir parçacık tanıtılır. Darbeli lazer ışını belirtilen bölgeyi aydınlatır. 1. ve 2. kareler, anlık görüntüler yakalamak için yüksek çözünürlüklü bir kamera kullanılarak yakalanır. Bu iki üst üste bindirilmiş çerçeve görüntüsü, parçacık konumunu ve hareketliliğini değerlendirmeye olanak tanır (Caliskan ve ark., 2021). PIV ile hız ölçümü yönteminde, suyun içerisine, üzerine gelen lazer ışığını yansıtan ve ortalama 10 mikrometre çapa yoğunluğu yaklaşık 1100 kg/m³ olan gümüş kaplı parçacıklar serpiştirilmektedir. Bu parçacıklar, çok küçük çapa sahip olduklarından ve yoğunlukları suyun yoğunluğuna çok yakın olduğundan içinde buldukları su ile aynı hızda hareket etmektedir. Ölçüm süresince de homojen bir şekilde su içinde askıda kalmaktadırlar. Ölçüm yapılacak alan darbeli lazer ışık kaynağı ile aydınlatıldığında bu parçacıklar parlamaktadır. Mevcut lazer ışık kaynağı ile

saniyede en çok 15 hız ölçümü alınabilmektedir. Lazerin, ölçüm yapılan akış alanını aydınlattığı anda dijital bir kamera ile akış alanında parlayan katı parçacıkların fotoğraf çekimi yapılmakta ve bilgisayara aktarılmaktadır. Çekim yapan kameranın çözünürlüğü yüksek olup, 1.600 x 1.186 piksel boyutundadır.

Kameranın örnekleme sayısı ise 15 Hz dir. Ard arda çok kısa zaman aralığında iki adet resim çekilir ve fotoğraflardaki partiküllerin yer değiştirilmesine iki resim arasındaki zaman aralığı ve ölçek değerine bölünerek hız değerleri hesaplanır. Anlık hız değerlerini hesaplamak için ard arda çekilen iki resim arasındaki zaman farkı 1 ile 10 milisaniye alınmıştır. Hız hesaplanmasında çapraz korelasyon tekniği kullanılmıştır. Hızların belirlenmesinde Fast Fourier analizi yapılmıştır. Vektör sayısını arttırmak ve Nyquist kriterini sağlamak için hızı vektörü hesaplanacak ağ yapısı %50 üst üste bindirilerek kaydırılmıştır. Bilgisayara aktarılan bu resimlerin prosesi neticesinde anlık hız vektörleri hesaplanmaktadır. Prosesler Dantec firmasına ait bilgisayar programıyla kısmen yapılmıştır. Hız vektörlerini kullanarak girdap eş düzey eğrileri ve akım çizgilerini hesaplamak mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, her bir deney seti için 350 adet anlık hız alanı ölçülmüş ve bu anlık hız alanlarından her bir deney seti için ortalama hız, Reynolds gerilmeleri ve çalkantı hızları hesaplanmıştır. Deneyler boyunca lazer kaynağı silindir çiftinin merkezinden geçecek şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

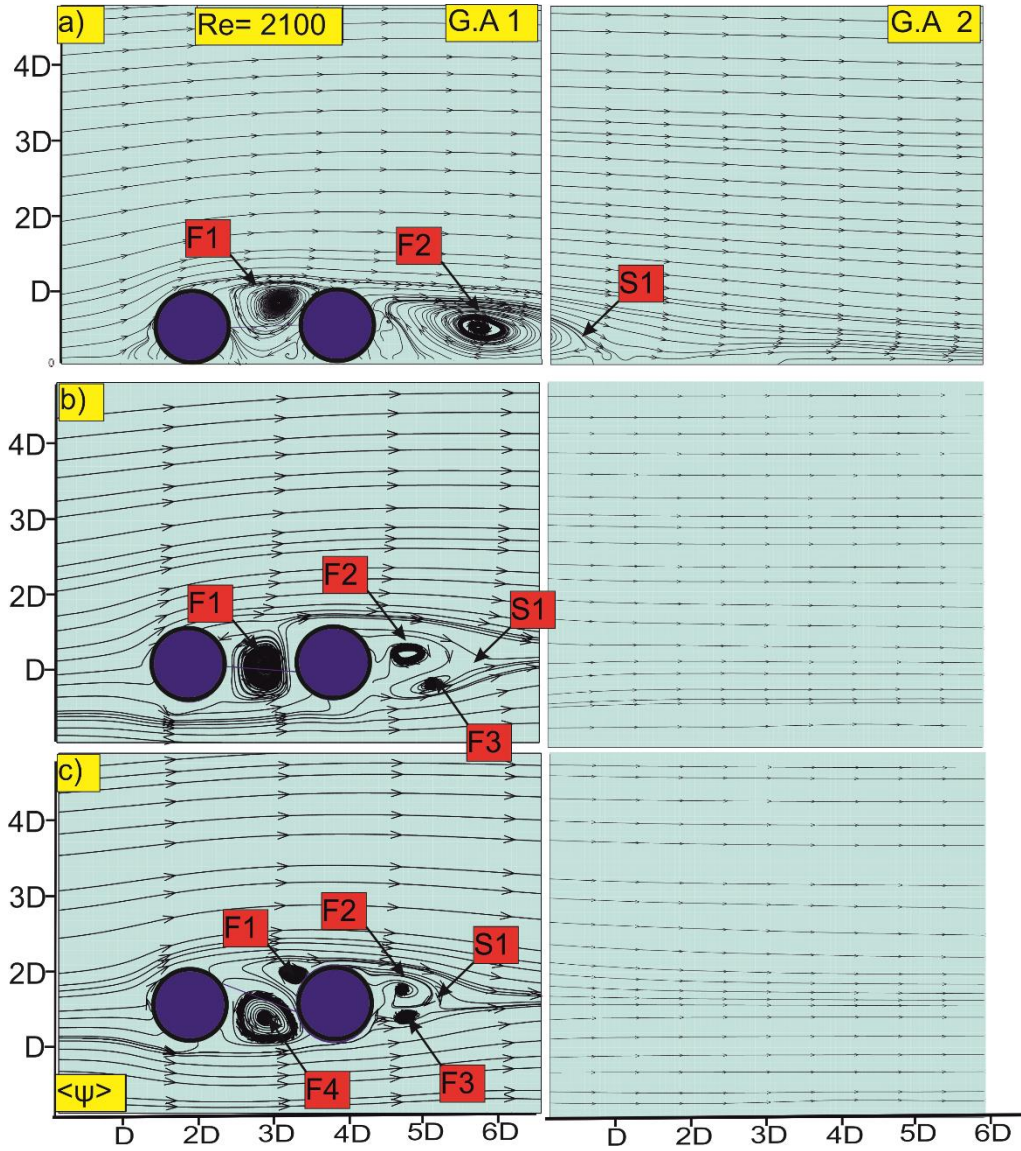
3. Bulgular

Küt cisimlerin iyi bir örneği olan dairesel silindirin aerodinamik performansının iyileştirilmesi amacıyla yatay konumda yerleştirilen tek silindirin akış yapısı ve oluşan akış yapısının kontrolü için tek akış literatürde önemli miktarda araştırma yapılmıştır (Tantekin ve ark., 2021; Ozgoren ve ark., 2013). Bu çalışmada kullanılan yatay olarak ard arda yerleştirilen dairesel silindirin etrafındaki akış yapısı ve silindirlerin tabandan olan mesafeleri olan $h/D = 0, 0.5$ ve 1 konumları için tek silindirle karşılaştırılması amacıyla Caliskan ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışma referans alınmıştır. Caliskan ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada sıg suda yatay olarak konumlandırılmış çıplak ve üçgen yivli silindirleri çevreleyen akış özelliklerini araştırmak ve karşılaştırmak için Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü kullanmışlardır. Bu bölümde PIV tekniğinden elde edilen sonuçlara ilişkin kapsamlı detaylara yer verilmektedir.

Şekil 2, tüm yükseklikler için yalın silindire ait zaman ortalamalı akım çizgileri, $\langle \psi \rangle$, görülmektedir. Zaman ortalamalı akım çizgileri, $\langle \psi \rangle$, ard izi bölgesinin boyutu hakkında da bilgi vermektedir. Ayrıca, silindirlerin ard izindeki ve akışta oluşan serbest durma noktası ve girdap odak noktalarının yerlerini de göstermektedir. Akım çizgisi resimlerinde silindirin çevresinden ayrılan akım çizgilerinin birleştiği yer S simgesi ile gösterilmiştir. Bu düğüm noktası olarak adlandırılan serbest durma noktası (saddle point) "S" akışta durma noktasının oluştuğunu da göstermektedir. Alam & Zhou (2007a), Reynolds sayısı 3000 için yalın silindirin girdap odak ve durma noktası oluşumunun $1.07D$ ve $1.95D$ 'de meydana geldiğini göstermektedir." Reynolds sayısı 2500 değerinde yalın bir silindir için

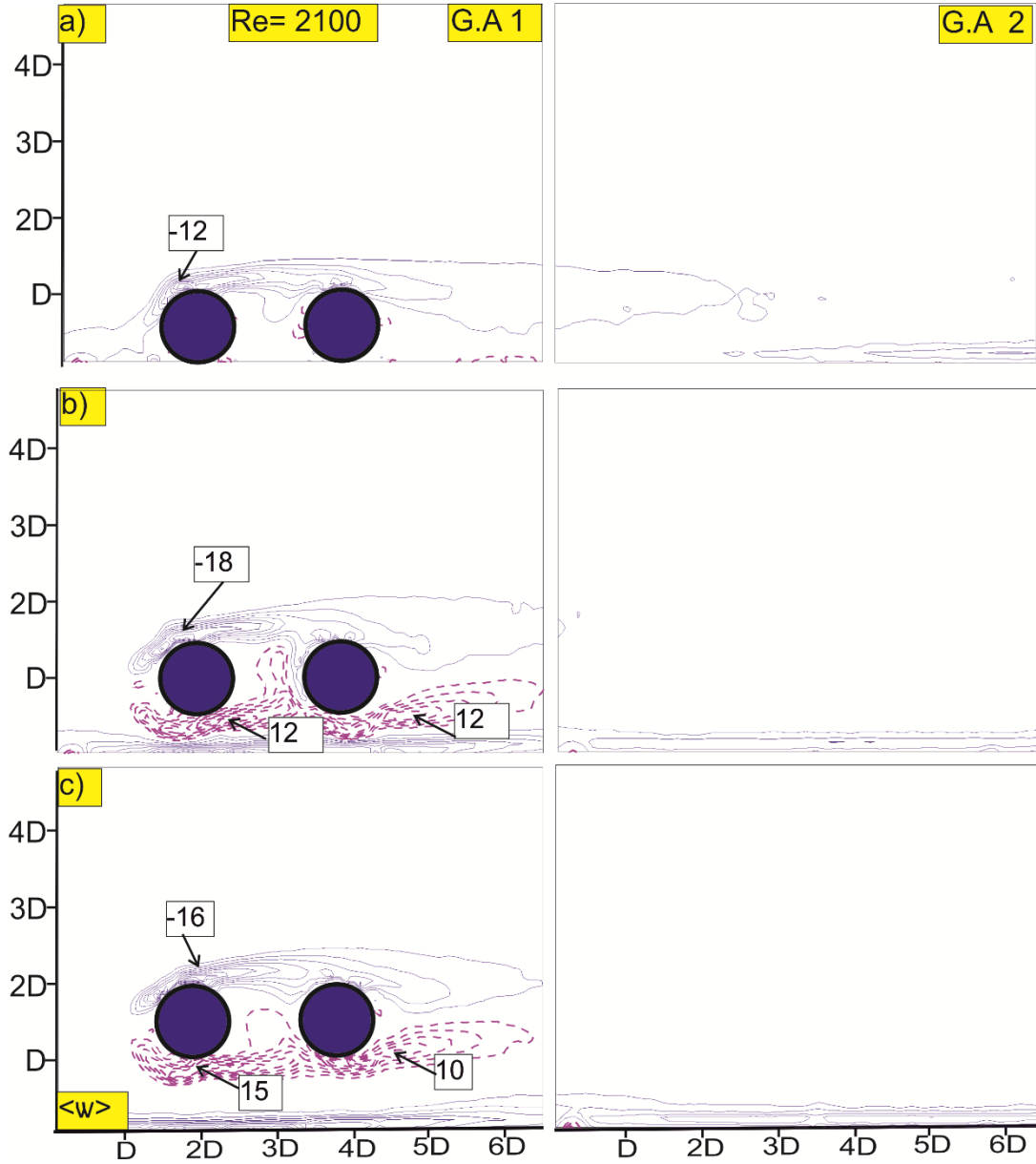
Alam & Zhou (2007b), girdap oluşum uzunluğu olarak da adlandırılan durma noktasının konumunun silindirin tabanından $1.4 D$ uzakta olduğunu belirledi. Şekil 2a $h/D = 0$ durumu için her iki silindirin ard izinde tabanın etkisinden dolayı sadece bir adet girdap odak noktası oluşmaktadır. F ile gösterilen akım çizgilerinin sirkülasyonu silindirin üst tarafından merkeze doğru saat yönünde bir noktada toplanmaktadır. Bu durum Tantekin ve ark. (2021)'in yaptıkları çalışmadan elde ettikleri sonuçlar ile uyumludur.

Şekil 2b ve 2c'de $h/D = 0.5$ ve 1 yükseklik oranları için ise silindirlerin alt kısımlarından gelen serbest akım merkeze doğru saatin tersi yönde dönerek bir noktada toplanacak şekilde girdap odak noktalarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu odak noktalarının oluşmasına silindirin çevresinden ayrılan akışın, ard izi ile serbest akım bölgesi arasındaki hızlarının farklı olmasıdır. Bu sebepten dolayı hem silindirlerin arasında hem de 2 numaralı silindirin ard izinde odak noktaları olmuştur. Şekil 2a'da F1 ve F3 ile gösterilen, Şekil 2b'de F1, F2 ve F3 ile gösterilen, Şekil 2c'de ise akış yönündeki silindir için F1 ve F2, aşağı akım yönünde ki silindir için ise F3 ve F4 ile gösterilen girdap odak noktaları oluşmaktadır. Şekil 2a'da tabanın etkisi ile aşağı akım yönündeki silindire ait ard izi bölgesi daha büyüktür. Yükseklik oranı artıktıkça S ile gösterilen durma noktası aşağı akım yönündeki silindire yaklaşmaktadır. Tüm yükseklik oranları için silindir çiftinin ara bölgesinde bir durma noktasının oluşmadığı belirlenmiştir.



Şekil 2. Yükseklik oranının $h/D = 0, 0.5$ ve 1 değeri için zaman ortalamalı akım çizgileri, $\langle \psi \rangle$.

Şekil 3a, 3b ve 3c'de zaman ortalama girdap eş düzey eğrileri $\langle \omega \rangle$ görülmektedir. Girdap eş düzey eğrilerinde, $\langle \omega \rangle$ mavi düz çizgi, saat yönünde dönen negatif girdapları gösterirken, pembe kesikli çizgi, saatin tersi yönünde dönen pozitif girdapları göstermektedir. Şekil 3a'da gösterilen silindir çiftinin tabana temas etmesi durumunda pozitif yönde dönen girdapların oluşmadığı görülmektedir. Bu duruma ait maksimum girdap şiddeti ise akış yönündeki silindirin hemen üzerinde -13 1/s değerinde oluşmaktadır. Aynı durumda tek silindirin bulunması durumunda ise bu değer -16 1/s olarak belirlenmiştir. Yükseklik oranının $h/D = 0.5$ değeri için hem negatif hem de pozitif girdaplar oluşmaktadır. Negatif girdapların değeri akış alanında aynı yükseklikte tek silindir bulunması durumunda elde edilen değerlerle hemen hemen aynıdır ve sırası ile -18 1/s ve -19 1/s olarak belirlenmiştir. Taban etkisinin en belirgin etkileri bu yükseklik oranında görülmektedir. Tabanın silindir çiftinden elde edilen akış yapısına etki etmekte, saatin tersi yönde dönen pozitif girdapların sönümlenmesine neden olmaktadır. Girdap eş düzey eğrilerinden de açıkça görüldüğü üzere pozitif girdapların değeri negatif girdapların değerine göre daha küçük olmakta ve $+12 \text{ 1/s}$ değerine azalmaktadır. Yükseklik oranının $h/D=1$ değeri taban etkisi azalmakta yukarı akım yönündeki silindire ait girdap çifti hemen hemen simetrik bir yapı oluşturmaktadır. Pozitif ve negatif girdap çiftinin değeri sırası ile -16 1/s ve 15 1/s değerlerini almaktadır.



Şekil 3. Yükseklik oranının $h/D = 0, 0.5$ ve 1 değeri için zaman ortalama girdap eş düzey eğrileri $\langle \omega \rangle$.

Şekil 4’de yükseklik oranının $h/D = 0, 0.5$ ve 1 değerleri için zaman ortalamalı Reynolds gerilme konturları $u'v'/U_\infty^2 >$ görülmektedir. Şekil 4a’da girdap eş düzey eğrilerinde olduğu gibi silindir çiftinin tabana temas etmesi durumunda pozitif Reynolds gerilme konturları oluşmamaktadır. Reynolds gerilme konturlarının maksimum değeri ise tek silindir bulunması durumunda yaklaşık -0.21 değeri ile birinci görüntü alanında (G.A.1) oluşurken silindir çifti için bu değer sabit kalmakta ancak maksimum noktanın olduğu yer ikinci görüntü alanına (G.A.2) kaymaktadır. Yükseklik oranının $h/D = 0.5$ değeri için akış alanında tek silindir bulunması durumunda Reynolds gerilme konturlarının maksimum değeri tabanın etkisi ile birlikte -0.072 ve $+0.078$ değerlerine ulaşmaktadır. Aynı yükseklik oranında iki silindirin $G/D = 1$ açıklık oranı ile ard arda yerleştirilmesi durumunda Reynolds gerilme konturlarının maksimum değeri -0.032 ile $+0.041$ değerlerine kadar düşmektedir. Bu durumun aşağı akış yönünde yerleştirilen silindirden kaynaklandığı söylenebilir. Reynolds gerilme konturlarından $u'v'/U_\infty^2 >$ görüldüğü gibi tek silindire göre tam simetrik bir akış yapısının oluşmadığı bunun nedeni olarak iz bölgesindeki çalkantının fazla olması olarak söylenebilir. Reynolds gerilmelerinin eş düzey eğrilerindeki değişimler silindirlerin ard arda dizilmesiyle artmakta ve simetrisi de bozulmaktadır. $h/D = 0.5$ durumunda negatif gerilmelerin değeri pozitif gerilmelere göre daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Diğer yükseklik oranlarında ise negatif ve pozitif gerilmelerin değeri hemen hemen aynıdır. Yükseklik oranının $h/D = 1$ değerine çıkması ile birlikte tabanın etkisi azalmakta, Reynolds gerilme konturlarının maksimum değeri yukarı akım yönündeki silindir için -0.031 ve 0.020 , aşağı akım yönünde ki silindir için ise -0.040 ve 0.038 değerlerini almaktadır. Ek olarak $h/D = 0$ durumundan farklı olarak $h/D = 0.5$ durumunda olduğu gibi maksimum Reynolds gerilme konturları birinci görüntü (G.A.1) alanında oluşmaktadır.

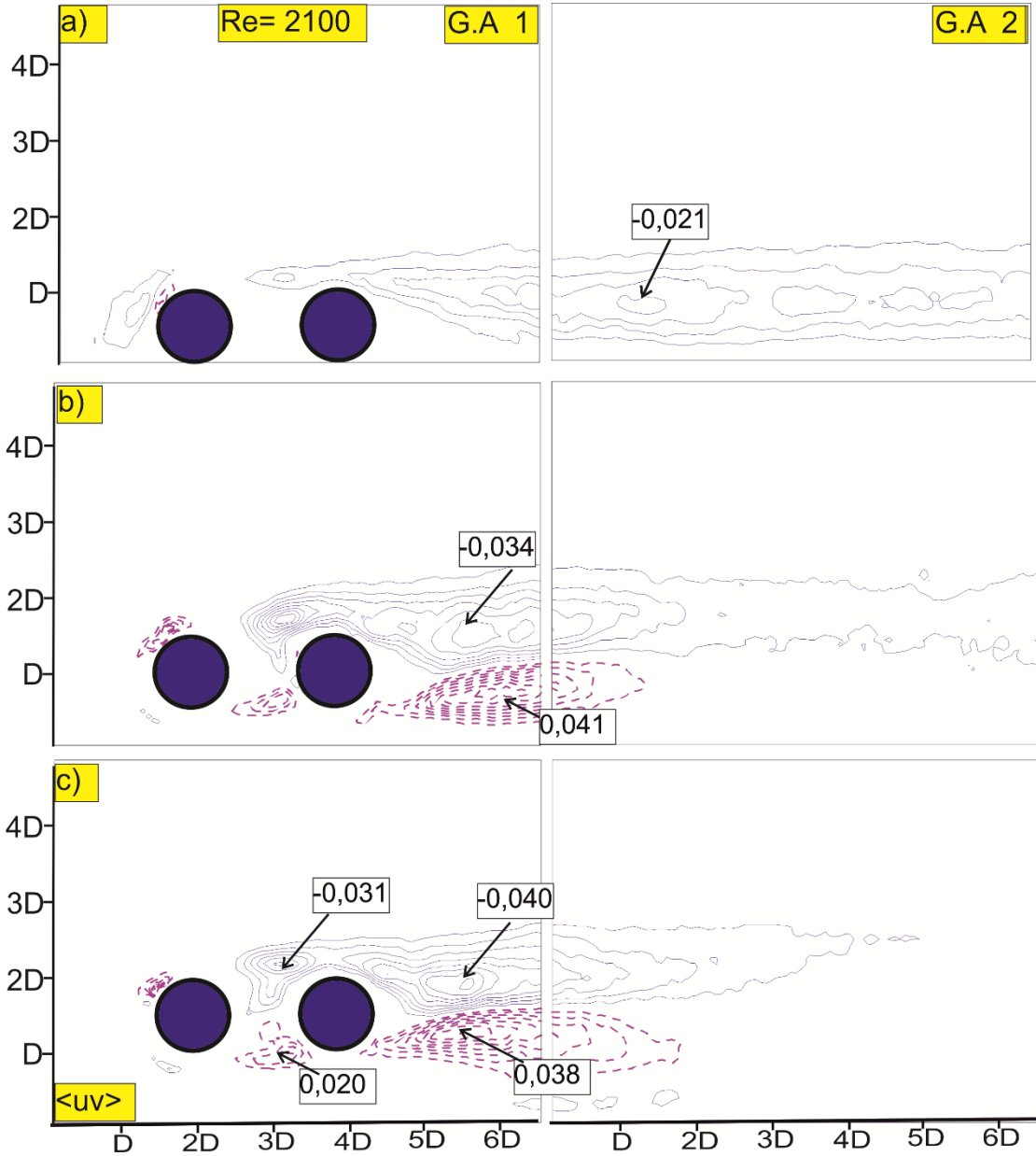
Şekil 5’de ki grafikte yükseklik oranının $h/D = 0, 0.5$ ve 1 kadar değişimi için ard arda yerleştirilen silindirlerden oluşan maksimum Türbülans Kinetik Enerji değeri görülmektedir. Yükseklik oranının $h/D = 0$ değeri için elde edilen Türbülans Kinetik Enerji, TKE, değeri, akış alanı içerisinde aynı yükseklik oranında tek silindir durumunda elde edilen maksimum TKE değerinden yaklaşık %18 daha düşüktür. Ek olarak elde edilen bu değer ikinci görüntü alanında oluşmaktadır. Akış alanı içerisinde tek silindir bulunması durumuna benzer olarak tek odak oluşmaktadır. Yükseklik oranının, h/D artması ile birlikte maksimum TKE değeri artmakta ve $h/D = 0.5$ için 0.101 , $h/D = 1$ için ise 0.111 olarak belirlenmiştir. Taban etkisinin artan h/D oranı ile azaldığı belirlenmiştir. Bu değerler tek silindir durumu ile karşılaştırıldığı zaman sırası ile % 38 ve % 65 daha düşük olarak belirlenmiştir. Bu durumda türbülans çalkantı değerlerini sönmülemeye yükseklik oranının, h/D etkisi olduğu kadar boşluk oranı, G/D ’nin de etkili olduğu sonucuna varılabilir. Türbülans Kinetik Enerji konturları incelendiği zaman tek silindir ile benzer şekilde $h/D = 0$ için tek odak noktası, $h/D = 0.5$ ve 1 değerleri için ise iki adet odak noktası oluşmaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

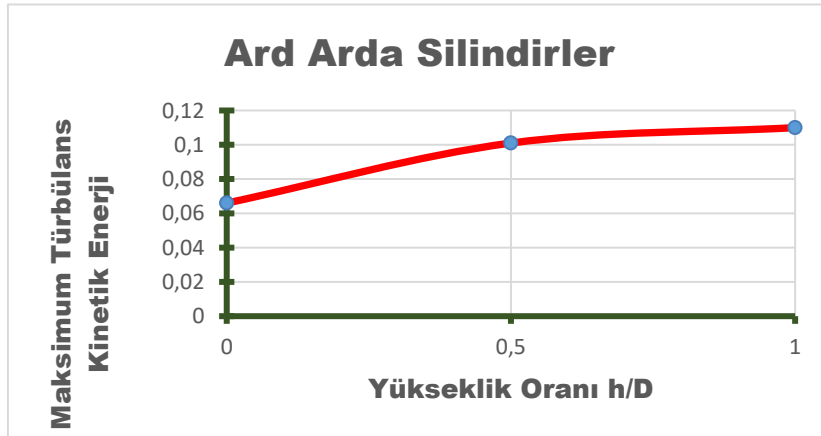
Bu araştırmanın amacı doğrultusunda, suya yatay olarak yerleştirilen silindirlerin etrafındaki kararsız akışın yapısı, silindirlerin tabandan uzaklıkları (yüksekliğe oran) değiştirilerek deneysel olarak araştırıldı. Anlık akış karakteristikleri ard izi bölgesinde kararsız ve dalgalı bir akış formu oluşturmaktadır. Zaman ortalamalı akış yapılarının karşılaştırılması sonunda akış yapısının oldukça simetrik olduğu gözlenmiştir. Kayma tabakası içindeki çalkantılardan dolayı Reynolds gerilme yapıları silindir arkasına çok yakın bölgede daha zayıf gerilme değeri oluşturduğu bulunmuştur. Bunun nedeni kayma tabakasında meydana gelen türbülanstır. Bu çalışma sayesinde, düz bir silindirin ve arka arkaya tabana göre farklı yüksekliklerde yerleştirilmiş silindir çiftinin çevresindeki akış yapısının yüksekliğe bağlı değişimi ve silindirlerin arasındaki boşluğun etkileri ortaya çıkarılmıştır.

Bunun yanı sıra, silindirin taban yüzeyine yakın olduğu yüksekliklerde yüzey etkisi oldukça fazla hissedilmiştir.

Sayısal çalışmaların doğrulanması amacıyla, bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar, nispeten güvenilir deneysel verilerin elde edilmesini sağlamıştır. Bu sonuçlara dayanarak üretilen hesaplamalı üç boyutlu akışkanlar dinamiği modellerinin doğrulanmasının, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) programlarının karşılaştırılabilir çeşitli endüstriyel uygulamalarda güvenli kullanımına katkıda bulunması beklenmektedir.



Şekil 4. Yükseklik oranının $h/D = 0, 0,5$ ve 1 değeri için zaman ortalamalı Reynolds gerilme konturları $u' v' / U_\infty^2 >$.



Şekil 5. Maksimum Türbülans Kinetik Enerji değerinin yükseklik oranı ile değişimi.

Kaynakça

- Akilli, H., Akar, A., & Karakus, C. (2004). Flow characteristics of circular cylinders arranged side-by-side in shallow water. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(4), 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2004.04.003>
- Alam, M. M., Elhimer, M., Wang, L., Jacono, D. L., & Wong, C. W. (2018). Vortex shedding from tandem cylinders. *Experiments in Fluids*, 59(3), 60. <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2501-8>
- Alam, M. M., Meyer, J. P., & Thompson, M. C. (2013). Global aerodynamic instability of twin cylinders in cross-flow. *Journal of Fluids and Structures*, 41, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.03.007>
- Alam, M. M., Moriya, M., & Sakamoto, H. (2003). Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon. *Journal of Fluids and Structures*, 18(3-4), 325-346. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2003.07.005>
- Alam, M. M., & Zhou, Y. (2007a). Flow around two side-by-side closely spaced circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 23(5), 799-805. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2006.12.002>
- Alam, M. M., & Zhou, Y. (2007b). Phase lag between vortex shedding from two tandem bluffbodies. *Journal of Fluids and Structures*, 23(2), 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2006.11.003>
- Balachandar, S., Mittal, R., & Najjar, F. M. (1997). Properties of the mean recirculation region in the wakes of two-dimensional bluff bodies. *Journal of Fluid Mechanics*, 351, 167-199. <https://doi.org/10.1017/S0022112097007179>
- Bloor, M. S., & Gerrard, J. H. (1966). Measurements on turbulent vortices in a cylinder wake. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 294, 319-342. <https://doi.org/10.1098/rspa.1966.0210>
- Borazjani, I., & Sotiropoulos, F. (2009). Vortex-induced vibrations of two cylinders in tandem arrangement in the proximity - wake interference region. *Journal of Fluid Mechanics*, 621, 321-364. <https://doi.org/10.1017/S0022112008004850>
- Caliskan, M., Tantekin, A., Tumen Ozdil, N. F., & Akilli, H. (2021). Investigation of flow characteristics for triangular grooved shape cylinder at different heights in shallow water. *Ocean Engineering*, 225, 108788. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108788>
- Huera-Huarte, F. J., & Jiménez-González, J. I. (2019). Effect of diameter ratio on the flow-induced vibrations of two rigidly coupled circular cylinders in tandem. *Journal of Fluids and Structures*, 89, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2019.04.006>
- Kim, S., Alam, M. M., Sakamoto, H., & Zhou, Y. (2009). Flow-induced vibrations of two circular cylinders in tandem arrangement. Part 1: Characteristics of vibration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(5-6), 304-311. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.07.004>
- Lin, J. -C., Towfighi, J., & Rockwell, D. (1995). Instantaneous structure of near-wake of a cylinder: on the effect of Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 9(4), 409-418. <https://doi.org/10.1006/jfls.1995.1023>
- Ozgoren, M. (2006). Flow structure in the downstream of square and circular cylinders. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(4), 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.11.005>
- Ozgoren, M., Okbaz, A., Dogan, S., Sahin, B., & Akilli, H. (2013). Investigation of flow characteristics around a sphere placed in a boundary layer over a flat plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.05.014>
- Papaioannou, G. V., Yue, D. K. P., Triantafyllou, M. S., & Karniadakis, G. E. (2008). On the effect of spacing on the vortex-induced vibrations of two tandem cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 24(6), 833-854. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.11.006>
- Qin, B., Alam, M. M., & Zhou, Y. (2017). Two tandem cylinders of different diameters in cross-flow: flow-induced vibration. *Journal of Fluid Mechanics*, 829, 621-658. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.510>

- Qin, B., Alam, M. M., & Zhou, Y. (2019). Free vibrations of two tandem elastically mounted cylinders in crossflow. *Journal of Fluid Mechanics*, 861, 349-381. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.913>
- Sahin, B., & Ozturk, N. A. (2009). *Behaviour of flow at the junction of cylinder and base plate in deep water*. *Measurement*, 42(2), 225-240. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2008.06.003>
- Sarpkaya, T. (2004). A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 19(4), 389-447. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2004.02.005>
- Tantekin, A., Tumen Ozdil, N. F., Akilli, H., & Caliskan, M. (2021). Flow investigation of circular cylinder having different cavities in shallow water. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 92, 108832. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108832>
- Wang, L., Alam, M. M., & Zhou, Y. (2018). Two tandem cylinders of different diameters in cross-flow: effect of an upstream cylinder on wake dynamics. *Journal of Fluid Mechanics*, 836, 5-42. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.735>
- Williamson, C. H. K., & Govardhan, R. (2004). Vortex-induced vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, 413-455. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122128>
- Williamson, C. H. K., & Roshko, A. (1988). Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 2(4), 355-381. [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(88\)90058-8](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(88)90058-8)
- Zdravkovich, M. M. (1988). Review of interference-induced oscillations in flow past two parallel circular cylinders in various arrangements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 28(1-3), 183-199. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(88\)90115-8](https://doi.org/10.1016/0167-6105(88)90115-8)
- Zhou, Y., & Alam, M. M. (2016). Wake of two interacting circular cylinders: a review. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 62, 510-537. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.08.008>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Shannon Entropi (SE) ve AHP Metoduyla Artvin (Arhavi) Kapisre Taşkınının İncelenmesi

Ufuk YÜKSELER*, Ömerul Faruk DURSUN

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44000, Malatya, Türkiye

Ufuk YÜKSELER, [ORCID No: 0000-0002-7233-0821](https://orcid.org/0000-0002-7233-0821),

Ömerul Faruk DURSUN, [ORCID No: 000-0003-3923-5205](https://orcid.org/000-0003-3923-5205)

* Sorumlu yazar e-posta: ufukyukseler12@gmail.com

Makale Bilgileri

Geliş: 23.11.2023

Kabul: 13.06.2024

Online Ağustos 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1395065](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1395065)

Anahtar Kelimeler

AHP,
Artvin ili,
Coğrafi bilgi sistemleri,
Shannon entropi metodu,
Taşkın

Öz: Küresel iklim değişikliği etkilerinin olduğu düşünülen taşkın kuraklık gibi afetlerin giderek daha fazla meydana gelmesi ile beraber, taşkın alanlarının belirlenmesi ve zararlarının azaltılmasına yönelik yapılan çalışmaların önemi de artmaktadır. Bu çalışmada, Artvin ili Arhavi ilçesinin sınırları içerisinde 2021 yılında yaşanan, can ve mal kaybına neden olan taşkın incelenmiş ve nedenleri ortaya konulmuştur. Taşkın çalışmalarında kullanılan pek çok parametreden en yoğun kullanılan 9 adet taşkın etki eden parametrelerin yanı sıra Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden AHP ve Shannon Entropi (SE) metoduyla çalışma sahasının duyarlılık haritası çıkarılmıştır. Çalışma sonucunda, her iki metoda göre taşkın oluşumunda en etkili parametreler yükselti ve yağış olarak belirlenmiştir. Taşkın yaşandığı lokasyonların düşük yükselti değerleri, yoğun yağış ve alüvyal toprak tipi özelliği gösterdiği çalışmaların bulguları arasındadır. Ayrıca SE, AHP metodlarıyla havzanın duyarlılık haritası çıkarılmış ve 4 adet doğrulama metoduyla bu iki metodun doğruluk analizleri hesaplanmıştır. Shannon Entropi metodu AHP metoduna göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Investigation of Artvin (Arhavi) Kapisre Flood using Shannon Entropy (SE) and AHP Method

Article Info

Received: 23.11.2023

Accepted: 13.06.2024

Online August 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1395065](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1395065)

Keywords

AHP,
Artvin province,
Flood,
Geographic identity systems,
Shannon entropy method

Abstract: As the effects of global climate change are increasingly felt, the importance of studies aimed at identifying flood areas and reducing their damage is increasing. In this study, the flood that occurred in 2021 within the borders of Arhavi district of Artvin province and caused loss of life and property was examined and its causes were tried to be revealed. A risk map of the study area was prepared using 9 parameters affecting floods, which are frequently used in flood studies, and the AHP and Shannon Entropy (SE) methods, which are among the Multi-Criteria Decision Making methods. As a result of the study, the most effective parameters for floods according to both methods were determined as elevation and precipitation. Among the findings of the studies, the locations where the flood occurred have low altitude values, heavy rainfall and alluvial soil type. In addition, the risk map of the basin was prepared using SE and AHP methods, and the accuracy values of these two methods were calculated with 4 verification methods. It has been determined that the Shannon Entropy method gives better results than the AHP method.

1. Giriş

Taşkın, bir akarsu havzasına beklenenden daha fazla su gelmesi sonucunda suyun akarsu yatağının dışına taşmasıyla oluşan, can ve mal kayıplarına neden olan meteorolojik bir afettir. Taşkınlar dünyada en fazla yaşanan meteorolojik afetler içerisinde yer almaktadır. Bu nedenle, taşkınların öngörülebilirliği her ne kadar zor olsa da taşkın yayılımları hakkında bazı çalışmalar yapmak önem arz etmektedir. Taşkın olaylarına etki eden en temel neden genelde yağış olarak bilinse de bazı havzalarda bu durum farklılık göstermektedir. Özellikle akarsu yataklarında oluşacak doğal yapıyı bozan her türlü yapılar veya taşkına havza bazlı başka faktörlerin daha çok etki etmesi normal yağışlarda bile taşkın yaşandığını örneklendirmektedir. Havzalarının kullanımı veya taşkın koruma yapılarının projelendirilmesi aşamasında taşkın risk ve duyarlılık çalışmaları ciddi önem arz etmektedir (Özdemir, 2007). Risk yönetimi çalışmalarında tehlike ve riskli bölgeler belirlenmekte ve afetten korunmak için seçenek ve öncelikler belirlenip kararlar arasında en uygununun hayata geçirilmesine karar verilmektedir (Özcan, 2008). Utlu (2023) yaptığı çalışmada, Frekans Oran Metodu ve Shannon Entropi yöntemini kullanarak Kastamonu İlinin Bozkurt ilçesinde bulunan Ezine Çayı havzasının taşkın duyarlılık haritasını çıkarmıştır. Çalışmada taşkına etki eden 12 parametre kullanılmış olup Frekans Oranı yönteminin doğruluk değerini daha yüksek bulmuştur. Yükseler ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada, Trabzon ilinin Of İlçesinde bulunan Solaklı havzasında geçmişte yaşanan taşkınlar ile ağaç tabanlı modeller olan M5PRT, M5PRGT ve Lojistik Regresyon modellerinin taşkın duyarlılık haritalarının mukayesesini yapmıştır. 10 adet taşkına etki eden parametre ile çalışılmış ve çalışmada ağaç tabanlı modellerin taşkını tahmin etmede çok daha başarılı olduğunu sonucunu ortaya koymuşlardır. Wang ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada, Çin'in Dongjiang Nehri Havzasında Rastgele Ormana Dayalı metoduyla duyarlılık haritası oluşturmuştur. Çalışmasında taşkına en etkili parametreleri sırasıyla yağış, akış derinliği, taşkın frekansı, yükseklik ve TWI bulunmuştur. En etkisiz parametreler ise SPI, Eğim ve Toprak dokusu olarak bulunmuştur. Senan ve ark. (2023) yılında yaptıkları çalışmada AHP metoduyla Umman denizi sınırlarındaki Güney Hindistan'ın sel duyarlılık haritası çıkartılıp değerlendirilmiştir. 20 taşkın tetikleyici parametre ile yapılan çalışmada çalışma alanının %24.10'luk kısmı yüksek ve çok yüksek duyarlılıklı alanlar olarak tespit edilmiştir. Shaikh ve ark. (2024), yaptıkları çalışmada Hindistan'ın Gujarat eyaletindeki taşkın risk alanlarının belirlenebilmesi için Bulanık Mantık, Bileşik Faktör ve AHP metotları kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda AHP yönteminin çok iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Vestby ve ark. (2024), yaptıkları çalışmada doğal afetlerden olan taşkın afetinin meydana getirdiği sonuçları toplumsal açıdan incelemiş ve meydana gelen afetlerin yarattıkları bilanço bir yayında toplanmıştır. Debnath ve ark. (2024), çalışmalarında makine öğrenmesi yöntemleri ile Hindistan'ın Tripura kentinde yaşanan sel afetleri incelenmiştir. Çalışmada K-En Yakın Komşu, Karar Ağacı, Naive Bayes ve Rastgele Orman olmak üzere dört farklı makine öğrenimi yöntemleri kullanılmıştır. Uygulanan yöntemlerin tamamında %70'in üzerinde doğrulama değerlerine rastlanmıştır.

Doğu Karadeniz Bölümü Türkiye'de en fazla taşkına maruz kalan illeri içinde barındırmaktadır. Bu illerin içerisinde sayılan Artvin ili de pek çok kez taşkın gerçeğiyle yüzleşmektedir (DSİ, 1996; DSİ, 2006a). Bu çalışmada, Artvin İlinin Arhavi ilçesinde 2021 yılında Kapisre deresinin taşması sonucu oluşan taşkın afeti incelenmiştir. Bu afette 3 kişi hayatını kaybetmiş ve ciddi mal kayıpları ile karşılaşmıştır (AFAD, 2021). Bu amaçla, 9 adet taşkın üzerinde etkili parametrenin haritası çıkarılmıştır. Taşkın yaşanan 280 noktasal verinin bu 9 parametre içerisindeki ve taşkın yaşanmayan noktalardaki durumları incelenmiş ve bu parametrelerin taşkına nasıl etki ettiği yorumlanmıştır. Ayrıca havzada taşkın duyarlılık haritasının çıkarılması amacıyla Shannon Entropi (SE) ve Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemleri uygulanmıştır. Taşkın yaşanan noktalar ile bu iki metot mukayese edilmiş ve doğrulama yöntemlerinden ACC (Accuracy), R (Recall), P (Precision) ve F (F-Score) ile bu yöntemlerin doğrulukları belirlenmiştir. Taşkın konusunda yapılan pek çok çalışmada sadece afet risk veya duyarlılık haritaları çıkarılarak çalışma tamamlanmıştır. Bu çalışmayı mevcut çalışmalardan ayıran en önemli özellik yaşanmış bir afette yöntemlerin doğrulukları incelenmiş, yöntemlerin doğruluk değerlerinden yola çıkarak mevcut afette etkilenmeye de gelecekteki afetlerde riskli olabilecek yerler de belirlenmiştir. Ayrıca taşkında etkili olan parametrelerin mevcutta olan 2021 afetine nasıl bir etki ettiği alt parametreler incelenerek ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

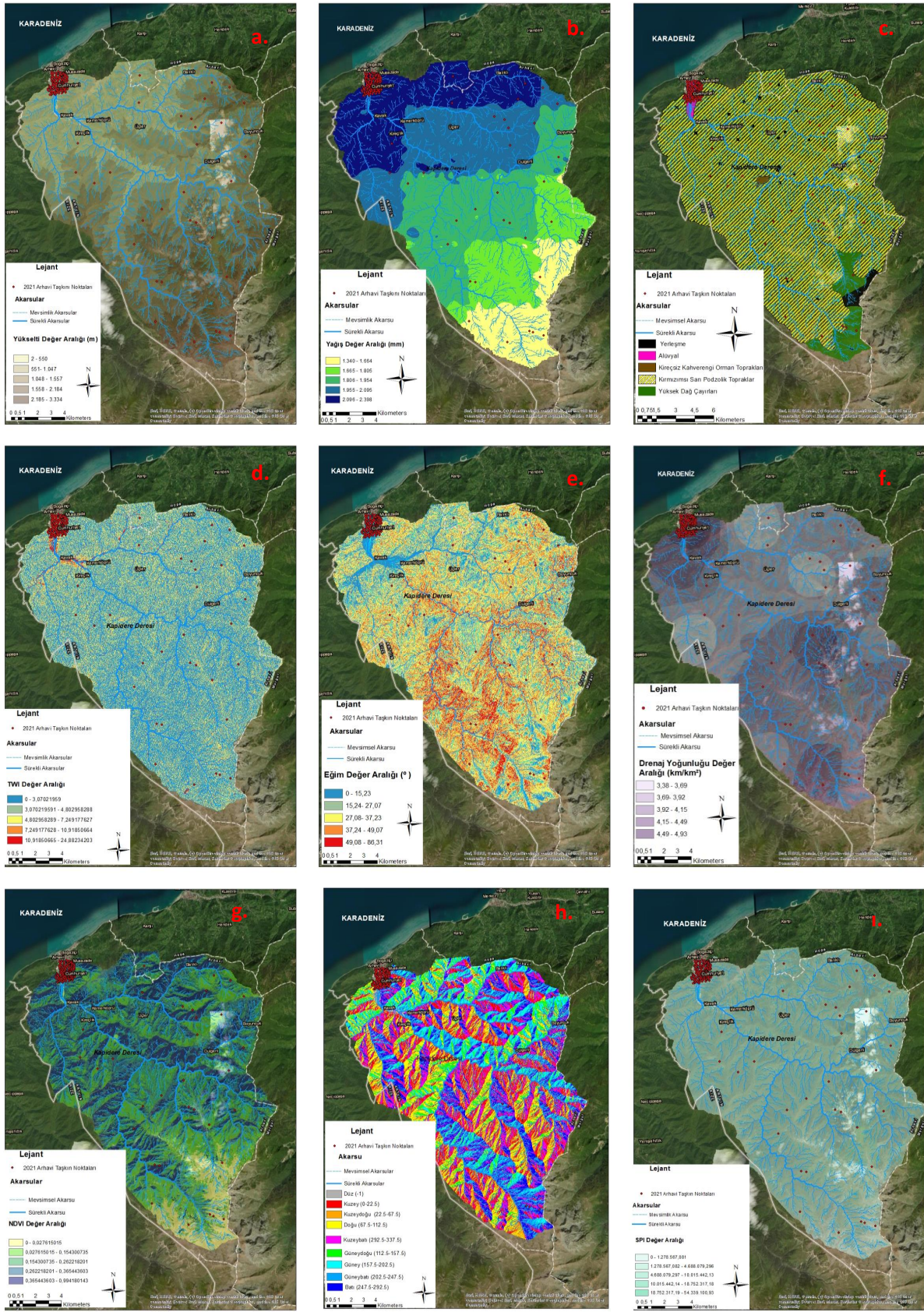
Artvin ilinin sınırları içerisinde bulunan Kapisre deresinin 25.07.2021 tarihinde taşması nedeniyle Arhavi ve Murgul ilçesinde taşkın afeti meydana gelmiştir. Yaşanan bu afet sonucunda 430 ev ve iş yerinin zemin ve bodrum katları suyla dolmuş, araçlar sürüklenmiştir. İlçede alt ve üst yapıda ağır hasarlar oluşmuş, tarım arazileri ve karayolları çökmüş, su, elektrik ve telefon hatları zarar görmüştür. 10 bina, 9 konut, 18 bağımsız bölüm ile 2 ahır yıkılmış, 6 bina, 3 ev ve 9 bağımsız bölüm ağır hasar görmüştür. 253 bina, 1144 bağımsız bölüm ile 44 konut ise sel ve heyelanlardan etkilenerek hasar almıştır. Yaşanan bu afette 3 kişi hayatını kaybetmiştir (AFAD, 2021).



Şekil 1. Taşkın afetinin durumunu belirten görseller (Anonim, 2021).

Çalışma kapsamında, 9 adet taşkın üzerinde etkili parametre kullanılmıştır. Seçilen bu parametreler literatür okumaları sonucunda belirlenmiştir (Stefanidis & Stathis, 2013; Ouma & Tateishi, 2014; Gigović ve ark., 2017; Ghosh & Kar, 2018; Hammami ve ark., 2019; Swain ve ark., 2020). Taşkını etki eden parametrelerin 2021 Artvin (Arhavi) taşkınının olduğu havza için haritalanmış, bu haritalar sonucunda bu parametrelerin kendi alt parametresi ve diğer parametreler arasındaki ilişki yorumlanmıştır (Şekil 2).

Çalışmada yükselti verileri Hava Kuvvetleri Komutanlığına bağlı Harita Genel Müdürlüğü'nden 2021 yılında alınan sayısal modellerden üretilmiştir (Şekil 2.a). Yağış verileri ise Wordclim sitesinden alınan yağış değerleri ile havza bazlı uyarlaması yapılarak kullanılmıştır (Şekil 2.b). Toprak verileri Köy İşleri Bakanlığı'na bağlı Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Etüt ve Proje Dairesi Başkanlığı ve MTA Müdürlüğüne ait 1/100.000 ölçekli toprak paftaları çalışma alanı düzeyinde kırılarak oluşturulmuştur (Şekil 2.c). Alınan bu veriler elektronik yazışmalar doğrultusunda mail yoluyla alınmıştır. Topoğrafik Nemlilik indeksi (TWI) verileri Beven & Kirkby (1979) tarafından ortaya konulan ve Denklem 2'de gösterilen teori sonucunda üretilmiştir (Şekil 2.d). Eğim haritası sayısal yükselti modelinden yararlanılarak Arcmap 10.2 programının yüzey analizleri (Raster Surface) sekmesi ile oluşturulmuştur (Şekil 2.e). Drenaj Yoğunluğu bir hücre içindeki toplam akarsu uzunluğunun hücre alanına (boyutuna) oranını göstermektedir (Sahana & Patel, 2019). Bu nedenle bu harita sayısal yükseklik modelleri haritalarından yola çıkarak raster calculator sekmesi ile oluşturulmuştur (Şekil 2.f). İnceleme alanında 3 Mayıs 2013 tarihli OLI Landsat görüntülerinden yola çıkarak Denklem 3 uygulanmasıyla NDVI haritası üretilmiştir (Şekil 2.g). Çalışma alanında bakı haritası yine sayısal yükselti modelinden yararlanılarak yüzey analizleri (Raster Surface) ile oluşturulmuştur (Şekil 2.h). Akarsu Güç İndeksi verileri (SPI) aşağıdaki Denklem 1 doğrultusunda oluşturulmuştur (Werner ve ark., 2005).



Şekil 2. 2021 Arhavi taşkınına etki eden parametreler (a; Yükselti, b; Yağış, c; Toprak; d; TWI, e; Eğim, f; Drenaj yoğunluğu, g; NDVI, h; Bakı, i; SPI).

SPI İndeksin Formülü;

$$SPI = Accumulation * Cell Size * Tan (Slope * 0.017453) \quad (1)$$

$$TWI = \ln \frac{(Accumulation + 1) * Cell Size}{Tan \left(Slope * \frac{\pi}{180} \right) + 0.001} \quad (2)$$

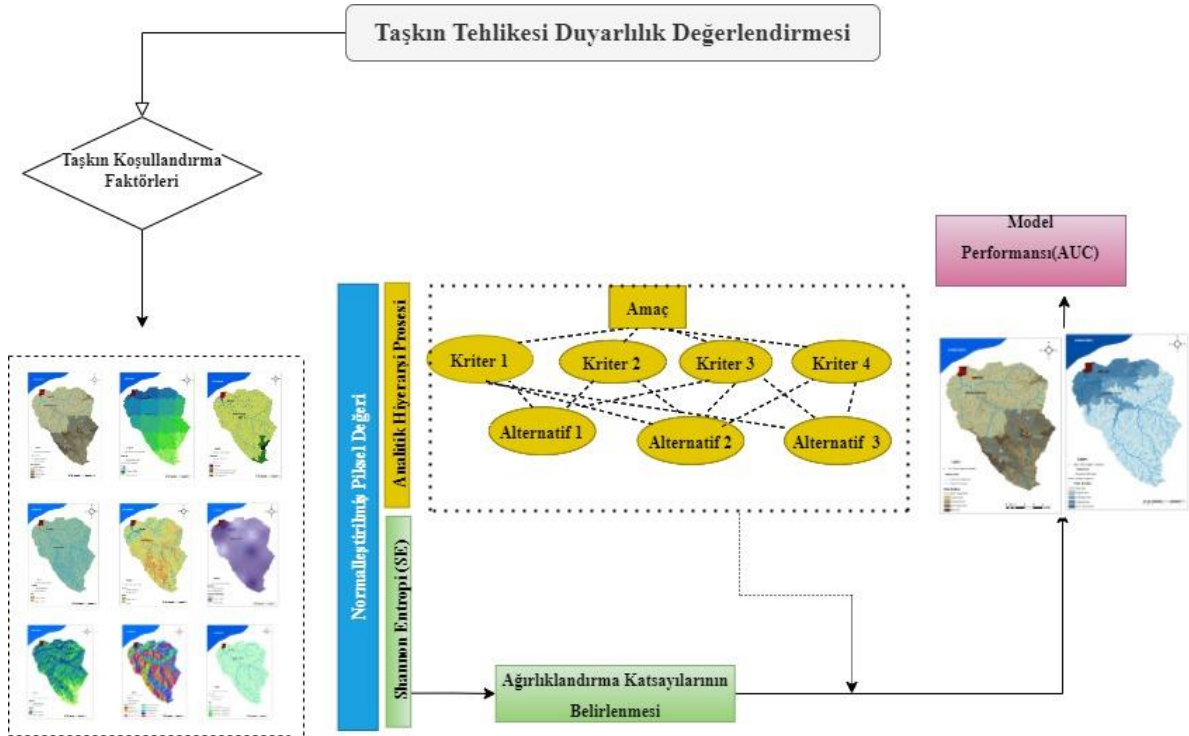
$$NDVI = \frac{Band\ 5 - Band\ 4}{Band\ 5 + Band\ 4} \quad (3)$$

Taşkına etki eden parametreler için farklı kurumlardan veri alınıp verilerin işleme süreci ArcGIS 10.2 yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Arcmap 10.2 yazılımıyla edit pixel size arayüzü ile tüm parametreler 5*5 olacak şekilde yeniden boyutlandırılmıştır. (Çizelge 1).

Çizelge 1. Kullanılan verilerin özellikleri (AFAD, 2019; DSİ, 2006a; DSİ, 2006b)

Parametrenin Elde Edildiği Yer/Kurum	Taşkın Tetikleme Faktörü	Veri Tipi	Piksel Boyutu
Hasar Belirleme Tutanakları	Taşkın Lokasyonları	Nokta-Poligon	-
	Eğim	Raster	5*5
	Bakı	Raster	5*5
Harita Genel Müdürlüğünden alınan Sayısal Yükselti Modeli (SYM)	Topografik Nemlilik İndeksi	Raster	5*5
	Akarsu Güç İndeksi	Raster	5*5
	Drenaj Yoğunluk	Raster	5*5
https://www.worldclim.org Yağış haritası	Yağış	Raster	5*5
https://earthexplorer.usgs.gov/ Landsat 8 OLI	NDVI	Raster	30*30
Köy İşleri Bakanlığı'na bağlı Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Etüt ve Proje Dairesi Başkanlığı ve MTA Müdürlüğüne ait 1/100.000 ölçekli jeoloji paftaları	Litoloji	Raster	100*100
	Toprak Tipi haritası	Vektör	100*100

Taşkın koşullandırma faktörleri ve model sonuç haritaları çıkarılmış ve 2021 yılında yaşanan Arhavi taşkınlından etkilenen 280 adet noktasal veri ile mukayese yapılarak modellerin doğrulukları yorumlanmıştır. Çalışmada 280 noktasal verinin kullanılmasının sebebi havzanın drenaj alanının yaklaşık 280 m³ değerinde olmasıdır (Şekil 3).



Şekil 3. Çalışmanın genel iş akış şeması.

AHP ve Shannon Entropi (SE) metodunun çalışma prensibi doğrultusunda taşkına etki eden 9 adet parametre kendi alt parametreleri ve diğer parametreler arasında bir ağırlıklandırma yöntemi yapılmaktadır. Bu amaçla bu çalışmada her iki yöntem içinde ağırlıklandırma ve AHP metodu için tutarlılık değerleri belirlenip haritalandırma işlemi yapılmıştır (Çizelge 2).

2.2. Yöntem

Çok kriterli karar verme yöntemleri birden fazla bağımlı değişkenlerden etkilenen örneklerde sonucun belirlenmesi için sıklıkla kullanılan yöntemlerdir. Taşkın olaylarının belirlenmesinde ya da yorumlanmasında etkili parametreler arasında ciddi ilişkiler bulunmaktadır. Çalışma sahasının meteorolojik ve fiziki özellikleri taşkın olayının meydana gelmesinde ve bu olayın yaşanma sebeplerinin ortaya koyulmasında temel rol oynar (Pham ve ark., 2021). Bu belirlenen veriler arasındaki etkileşim ise parametrelerin seçimi kadar önemlidir. Taşkın olayı birden fazla parametrelerden etkileştiği ve her havzada bu etkileşim değeri farklılık arz ettiği için Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri taşkın çalışmaları açısından çok uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada çok kriterli karar verme yöntemlerinden en sık kullanılan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve entropi yöntemlerinin modifiye edilmiş şekli olan Shannon Entropi (SE) yöntemi kullanılmıştır. Her iki yöntemin farklı çalışma algoritmaları sayesinde yöntemlerin eksiklikleri ve üstünlükleri havzaya uyumları beraberliğinde incelenmiş, taşkın olaylarındaki parametreler ve alt parametrelerin etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

2.2.1. Shannon entropi metodu (SE)

Shannon Entropi (SE) yöntemi taşkın tehlike ve duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanılan bir yöntemdir (Sarkar ve ark., 2022). Shannon Entropi (SE) metodu pek çok parametreden etkilenen sonuçların arasındaki etkileşimi ölçen entropi yöntemlerine dayanmaktadır (Lin, 1991). Shannon Entropi (SE) metodunda bulunan yüksek değerler taşkın açısından riskli bölgeleri ifade ederken düşük değerler düşük riskli bölgeleri ifade eder. Bu çalışmada, Shannon Entropi metodu hesaplanırken başta Frekans Oran Metodu uygulanmış, bu uygulamadaki bulgular bu yöntemin altlığını oluşturmuştur. Shannon Entropi metodu hesaplanması için 4-8 arasındaki denklemler uygulanır.

$$Pd_{ij} = \frac{FR_{ij}}{\sum_{i=1}^{mj} FR_{ij}} \quad (4)$$

Pd_{ij} ; olasılık yoğunluğunu, FR_{ij} ; verilen gridlerde altlık olarak yapılan Frekans Oran metodu sonuçlarını ifade eder. Olasılık yoğunluğu belirlendikten sonra, bulunan değerler entropinin hesaplanması için kullanılır (4-5).

$$Ev_j = \sum_{i=1}^{mj} Pd_{ij} \log_2 Pd_{ij} \quad j = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$Ev_{jmax} = \log_2 mj \quad (6)$$

Ev_j ve Ev_{jmax} entropi değerleri, m_j sınıf sayısıdır. Taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulması için kullanılan parametrelere ait ağırlıklandırma değerlerinin belirlenmesinde formül 6 kullanılır.

$$Ic_j = \left(Ev_{jmax} - \frac{Ev_j}{Ev_{jmax}} \right) \quad j = 1, \dots, n \quad (7)$$

Ic_j ilgili katman sayısını ifade eder. I sıfır (0) ile bir (1) arasında değerler alır.

$$C_{Wj} = I_{Wj} * FR \quad (8)$$

7 numaralı denklemde belirlenen C_{Wj} değeri herbir parametrenin diğer parametreler arasındaki ağırlıklandırma değerini ifade eder.

2.2.2. Analitik hiyerarşi metodu (AHP)

Analitik Hiyerarşi metodu birden çok karar verme olasılıklarının olduğu problemlerde karar verme metodu olarak geliştirilmiştir (Rashidpour, 2013). Analitik hiyerarşi süreci birden çok değişken arasından karşılaştırma yöntemi olarak bilinmektedir (Saaty, 2008). Parametreler arasındaki üstünlük katsayıları Saaty'nin hiyerarşi tablosuna göre belirlenir (Saaty, 1980). AHP metotunda problemin ne olduğu belirlendikten sonra, veriler normalize edilir. Ardından Denklem 9 de belirtilen karşılaştırma matrisi oluşturulur.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Karşılaştırma matrisi oluşturulduktan sonra normalizasyon aşamasına geçilir. Denklem 10 uygulanır.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (10)$$

Denklem 6'daki her bir veri 0 ila 1 arasında normalize edilir ve Denklem 11'deki matris elde edilir.

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Normalize edilmiş matris oluşturulduktan sonra Denklem 12 uygulanarak öndelik vektörü elde edilir.

$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^n c_{ij}}{n} \quad (12)$$

Denklemler uygulandıktan sonra tutarlılık testi uygulanır. Sırasıyla uyum indeksi (CI) Denklem 13'de belirlenir ardından Denklem 14'de gösterildiği üzere uyum oranı (CR) belirlenir.

$$CI = \frac{(Y_{max} - n)}{(n - 1)} \quad (13)$$

$$CR = CI/RI \quad (14)$$

RI: Tesadüfîlik göstergesi

Bu metodun uygulanmasında istenen tutarlılık oranı %10 ve altında çıkması gerekmektedir. Bu çalışmada parametrelerin birbirine ağırlık katsayıları literatür çalışmalarıyla belirlenmiş ve tutarlılık oranı istenen değerlerde çıkmıştır (Çizelge 2).

2.2.3. Kullanılan doğrulama indeksleri

Çalışmada 4 adet doğrulama indeksi kullanılmıştır. Bunlardan Doğruluk (ACC) hem yaşanan (1) hem yaşanmayan (0) noktalarından yola çıkarak doğrulama analizi yapmaktadır. Kalan 3 yöntemden olan kesinlik (P), geri çağırma (R) ve F-skor (F) yöntemleri ise sadece yaşanan (1) veri kümesiyle çalışmaktadır. Çalışmaların hesaplanma yöntemleri Denklem (15-18) aralığında verilmiştir. Verilen Formüllerde Gerçek Pozitif (TP) (Hem gerçek afette hem modellerde 1), Gerçek Negatif (TN) (Gerçek

afette 1 modellerde 0), Yanlış Pozitif (**FP**) (Hem Gerçek afetlerde Hem Modellerde 0) ve Yanlış Negatif (**FN**) (Gerçek afetlerde 1 Modellerde 0) olarak sınıflandırılmaktadır.

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (15)$$

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (16)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (17)$$

$$F = \frac{(2 * P * R)}{(P + R)} \quad (18)$$

3. Bulgular

Çalışma alanında yaşanan taşkın birden çok akarsuyun birleştiği ve denize döküldüğü mansap kısmında oluşmuştur. Taşkın sahasının, alınan 280 adet noktasal veri ile özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu 280 veri, 9 adet taşkına etki eden parametreyle incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak her bir parametre ve alt parametrelerin etki değerleri hesaplanmış ve ardından sayısallaştırma işlemine geçilmiştir. Verilen değerler AHP yöntemine göre parametrelerin diğer parametreler arasındaki veya alt parametrelerin birbirleri arasındaki taşkına etkili ağırlık değerlerdir. Örneğin yükselti taşkına %30.7 katsayısı ile etki ederken Yağış %21.8 katsayısıyla etki etmektedir. Ayrıca yükseltinin alt parametreleri arasında 0-500 m yükseklik değer aralığı taşkına %15.44 (0.307*0.503) ağırlık değerinde etki etmektedir. Shannon Entropi yöntemine bakıldığında ise, örnek olarak yükselti 3.301 katsayısıyla heyelan etki etmekte ve bu etkinin tamamı 0-500 metre aralığındaki yükselti değerlerinde çıkmaktadır. 501 metre ve üzeri değerlerin taşkına etkisi bulunmadığı görülmektedir (Çizelge 2).

Çizelge 2. AHP ve Shannon Entropi (SE) metoduna göre parametrelerin ağırlık katsayıları

		AHP			Shannon Entropi (SE) Metodu		
Yükselti Sınıfları		Ağırlıklandırma	Tutarlılık	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma	
Yükselti	1	0-50000	0.503		100		
	2	501-1000	0.260	4%	0	3.301	
	3	1001-1500	0.134		0.307		0
	4	1501-2000	0.068		0		
	5	2001-2001+	0.035		0		
Yağış Sınıfları		Ağırlıklandırma	Tutarlılık		Ağırlıklandırma		Ağırlıklandırma
Yağış	1	1300-1500	0.395	3%	0	3.339	
	2	1501-1700	0.239		0.218		0
	3	1701-1900	0.199		0		
	4	1901-2100	0.080		0		
	5	2101-2300	0.049		0		
	6	2300+	0.037		100		
Toprak Sınıfları		Ağırlıklandırma	Tutarlılık	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma	
Toprak	1	Yerleşme	0.167	5%	20.4	2.361	
	2	Alüvyal top.	0.399		0		
	3	Kireçsiz Kahverengi orman	0.095		0.154		79.6
	4	Kırmızımsı Sarı Podzolik	0.276		0		
	5	Yüksek Dağ Çayırları	0.062		0		

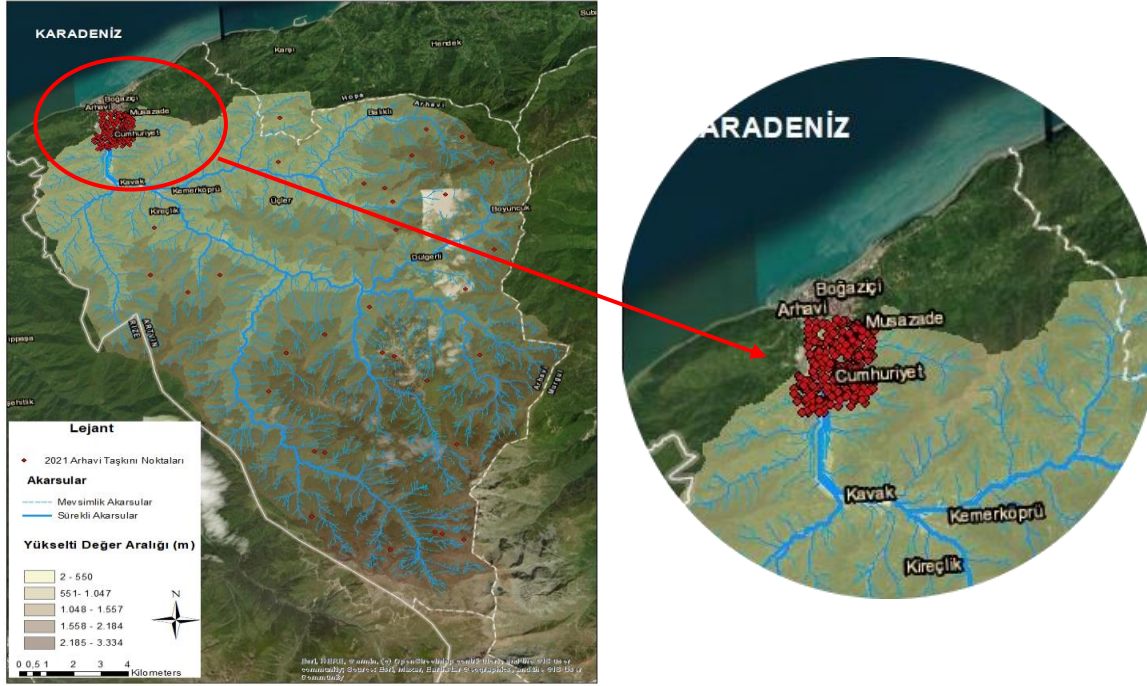
Çizelge 2. AHP ve Shannon Entropi (SE) metoduna göre parametrelerin ağırlık katsayıları (devam)

		AHP			Shannon Entropi (SE) Metodu	
	TWI Sınıfları	Ağırlıklandırma	Tutarlılık	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma
TWI	1	0-4	0.399		23	0.349
	2	4-8	0.273		23.6	
	3	8-12	0.184	2%	18.5	
	4	12-16	0.091		17.7	
	5	16+	0.053		17.2	
				0.109		
	Eğim Sınıfları	Ağırlıklandırma	Tutarlılık	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma
Eğim	1	0-5	0.514		93.51	3.001
	2	5.01-15	0.269		4.27	
	3	15.01-25	0.11	4%	1.97	
	4	25.01-245	0.066		0.23	
	5	45+	0.041		0.02	
				0.076		
	Dren. Yoğ. Sınıfları	Ağırlıklandırma	Tutarlılık	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma
Drenaj Yoğunluğu	1	3.3-3.6	0.399		32.18	1.054
	2	3.6-3.9	0.273		24.55	
	3	3.9-4.2	0.184		0	
	4	4.2-4.5	0.091	2%	43.27	
	5	4.5+	0.053		0	
				0.053		
	NDVI Sınıfları	Ağırlıklandırma	Tutarlılık	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma
NDVI	1	-0.2-0	0.510		20.48	0.732
	2	0.1-0.3	0.266		27.32	
	3	0.4-0.6	0.121	5%	52.19	
	4	0.6-0.8	0.062		0.1	
	5	0.8-1	0.041		0	
				0.037		
	Bakı Sınıfları	Ağırlıklandırma	Tutarlılık	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma
Bakı	1	Düz	0.307		57.88	1.494
	2	Kuzey	0.016		2.67	
	3	Kuzeydoğu	0.026		1.33	
	4	Doğu	0.035		3.16	
	5	Güneydoğu	0.113	4%	0.75	
	6	Güney	0.148		4.57	
	7	Güneybatı	0.207		7.81	
	8	Batı	0.088		12.58	
	9	Kuzeybatı	0.059		9.25	
				0.026		
	SPI Sınıfları	Ağırlıklandırma	Tutarlılık	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma	Ağırlıklandırma
SPI	1	0-100 ³	0.437		29	1.423
	2	100 ³ -2*100 ³	0.277		11	
	3	2*100 ³ -3*100 ³	0.150	5%	0	
	4	3*100 ³ -4*100 ³	0.087		55	
	5	4*100 ³ +	0.049		44	
				0.019		

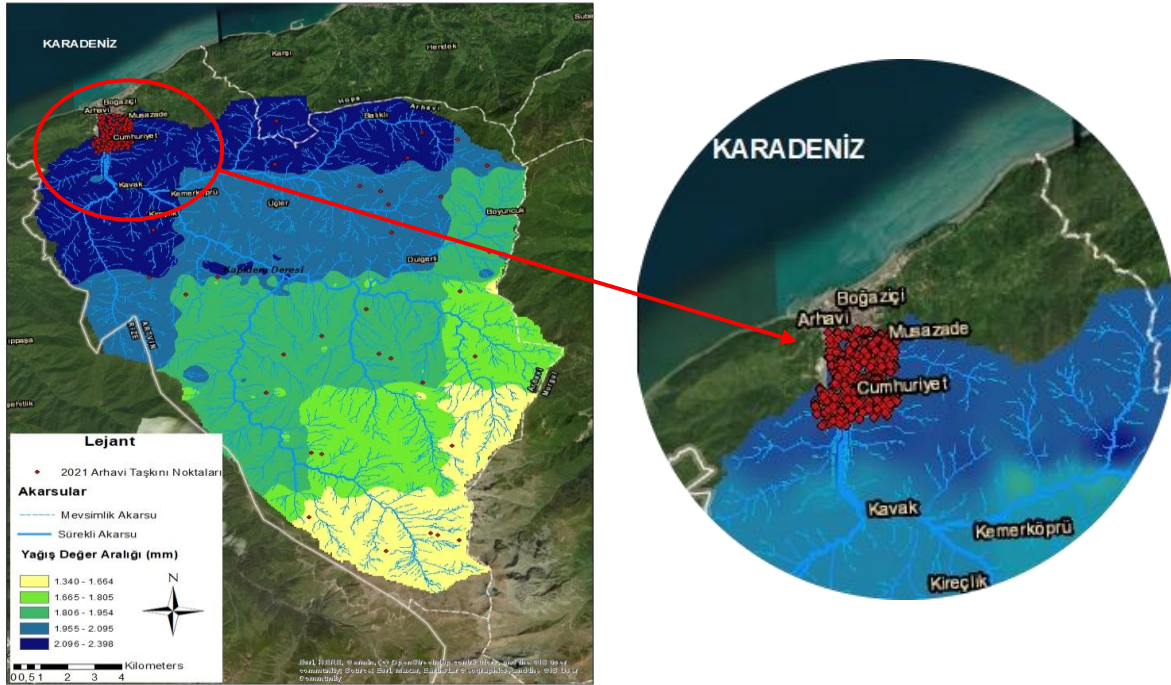
Çalışma sahasındaki yükselti değerlerine bakıldığında 2 ile 3334 metre yükseklik değerleri görülmektedir. Taşkınımın yaşandığı alanda ise en düşük 2 metre yükseklik görülürken en yüksek 168 metre yükseklik değeri görülmüştür. 280 noktasal veriden 240 veri değerinde 0-50 metre yükseklik aralığı, 25 adet veride 50-100 metre yükseklik aralığı ve 15 adet veride ise 100-168 metre aralığında tespit edilmiştir. Havzada taşkın akarsuların denize döküldükleri ve yükselti değerinin havza içerisindeki en düşük değerlerde meydana gelmesi, taşkına etki eden yükselti parametresinde düşük yükselti değerleri taşkınımın tetikleyen faktör olduğunu göstermektedir. En düşük yükselti değerlerinde taşkın yaşanması yükseklik değerinin taşkına çok önemli derecede etki ettiğini göstermektedir (Şekil 4). Yükseltinin taşkınları tetikleyen ana faktörlerden olduğu pek çok çalışmayla ortaya konulmuştur (Tehrany ve ark., 2014; Bui ve ark., 2016; Khosravi ve ark., 2016; Tehrany ve ark., 2019; Ahmad & Afzal, 2020; El-Magd ve ark., 2022).

Yağış parametresi topoğrafik özellikler kadar taşkına etki eden meteorolojik bir parametredir (Mileti, 1995; Çiçek ve Ataol, 2009; Dastorani ve ark., 2010; Lowe ve ark., 2013). Çalışma alanı olarak belirlenen havzada yağış değerleri 1340.76 mm ile 2398.85 mm arasında değişmektedir. Taşkın yaşanan noktalarda yağış değeri en düşük 2223 mm, en yüksek değer 2235.54 mm olarak belirlenmiştir. 280 verinin tamamında çok yakın değerler belirlenmiştir. Taşkın yaşanan noktalar havzadaki yüksek yağış

alan yerlerdir ve yüksek yağış değerlerinin taşkın oluşumunda önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Ancak taşkın yaşanan noktalardan daha yüksek yağış değerine sahip noktalarda taşkın yaşanmaması yağış yüksekliğinin taşkına etki eden en önemli kriter olmadığını göstermektedir (Şekil 5).



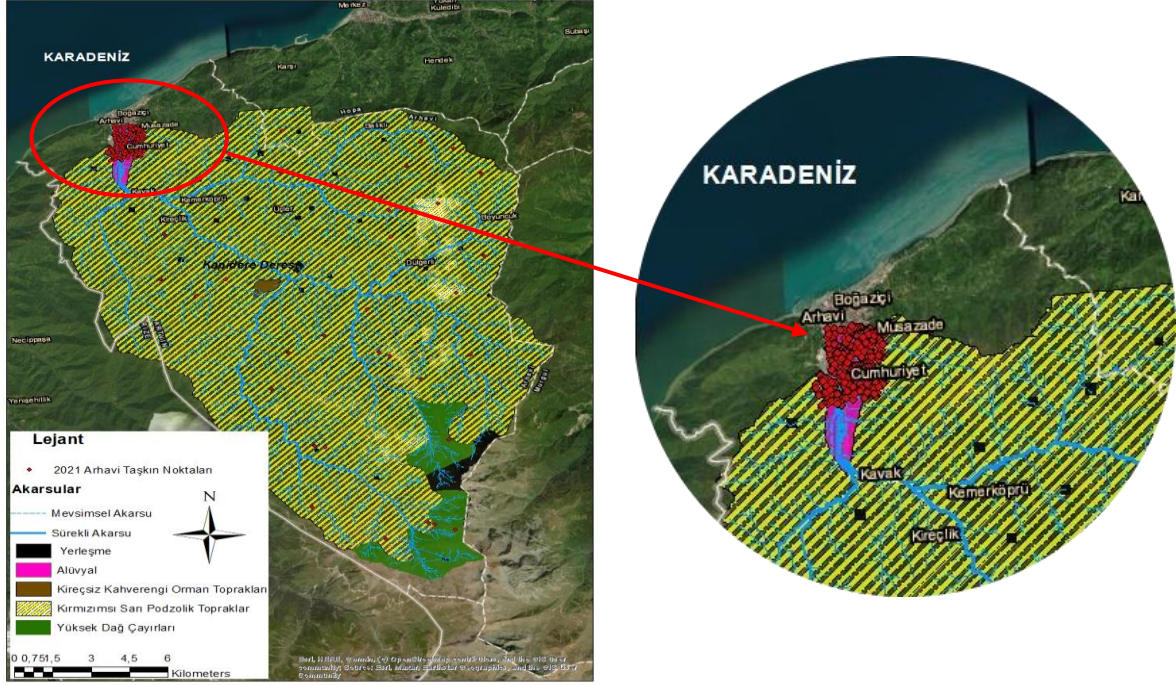
Şekil 4. Kapisre Deresi Havzasının sayısal yükselti modeli.



Şekil 5. Kapisre Deresi Havzasının yağış haritası.

Toprak sınıfı suya doygunluğu, suyu tutma ve şişme kapasitesi nedeniyle taşkına etki eden önemli bir başka parametredir. Çalışma sahasında yerleşme yerleri haricinde 4 ayrı toprak tipi görülmektedir. Alüvyal, kireçsiz kahverengi orman toprakları, kırmızımsı sarı podzolik topraklar ve

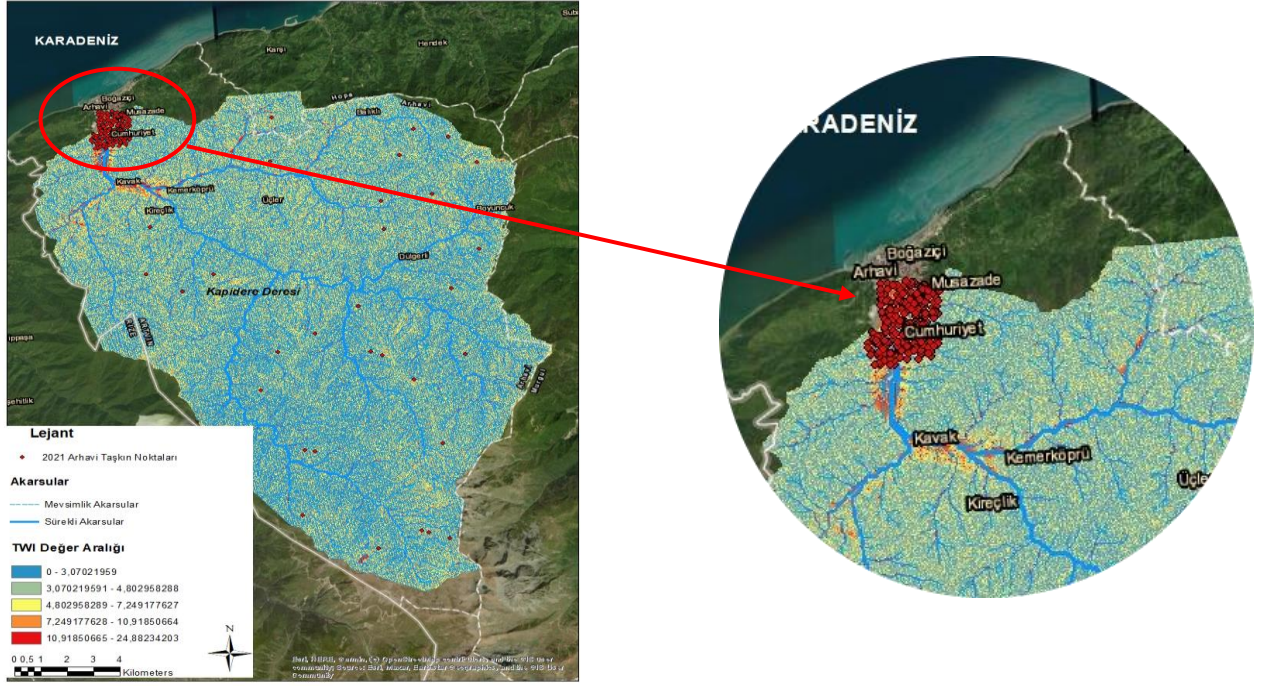
yüksek dağ çayırları bulunan toprak tipleri arasındadır (Çınaklı, 2008). Taşkın yaşanan yerlerin toprak özelliklerine bakıldığında alüvyal ve kırmızımsı sarı podzolik topraklarda yaşandığı görülmektedir. Taşkın yaşanan yerleri incelendiğinde, 280 veriden 162 veri alüvyal toprak, 118 veri kırmızımsı sarı podzolik topraklarda olduğu belirlenmiştir (Şekil 6).



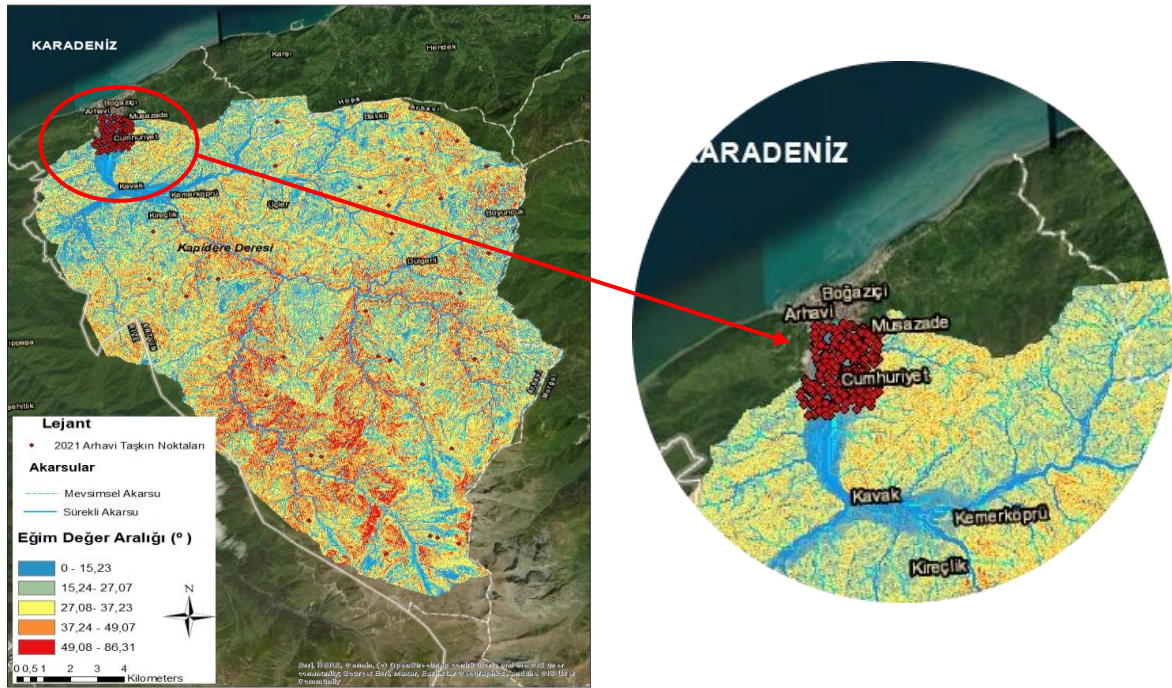
Şekil 6. Kapisre Deresi Havzasının toprak haritası.

Çalışma sahasındaki Topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) 0 ile 24.082 arasında değişmektedir. Taşkın yaşanan noktalarda TWI değeri 2.16 ile 24.87 arasında değişmektedir. TWI değerleri 280 adet taşkın yaşanan noktada 182 noktada 0-10 değerleri, 44 noktada 10-20 değerleri arasında ve 4 adet noktada 20 üstü değerleri görülmüştür. Havzadaki ve taşkın yaşanan noktadaki TWI değerleri incelendiğinde taşkın yaşanan noktalarda belirli değer aralığı görülmemektedir. Topoğrafik ıslaklık indeksi değerleri taşkın yaşanan noktada tekerrürlü değerlerden oluşmaması doğrudan taşkına etki eden önemli bir parametre olmadığını göstermektedir (Şekil 7).

Çalışma sahasında eğim değerleri 0° ile 86.31° arasında değişmektedir. Taşkın yaşanan noktalarda en düşük eğim değeri 0° ile 33.06° arasında belirlenmiştir. 280 adet taşkın belirleme noktalarından 130 adet veride 0°, 81 adet veride 0.1° ile 10° arasında, 46 adet veride 10.1° ile 20°, 19 adet veride 20.1° ile 30° arasında ve 4 adet veride 30° ile 33.06° değerleri arasında belirlenmiştir. Taşkın yaşanan noktada eğim değerinin 0° olduğu yerler çoğunlukla akarsuyun denize deşarj yerlerine yakın yerler olduğu görülmekte olup düşük eğim değerleri taşkına etkisi ortaya konulmuştur (Şekil 8).



Şekil 7. Kapisre Deresi Havzasının Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI) haritası.

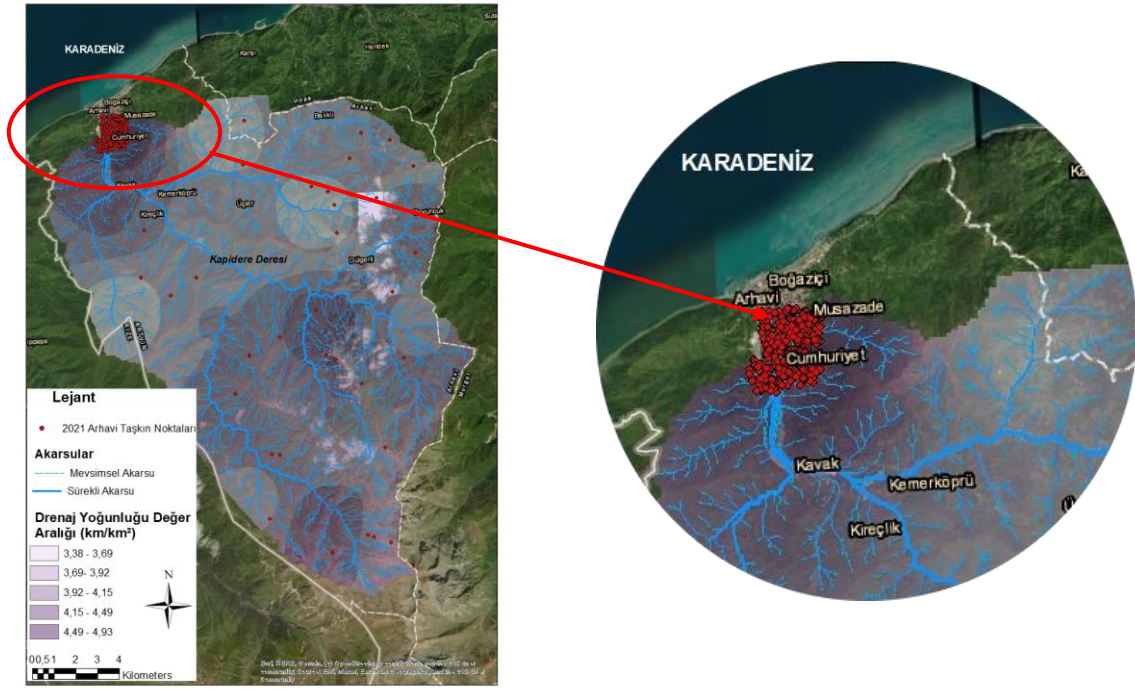


Şekil 8. Kapisre Deresi Havzasının eğim haritası.

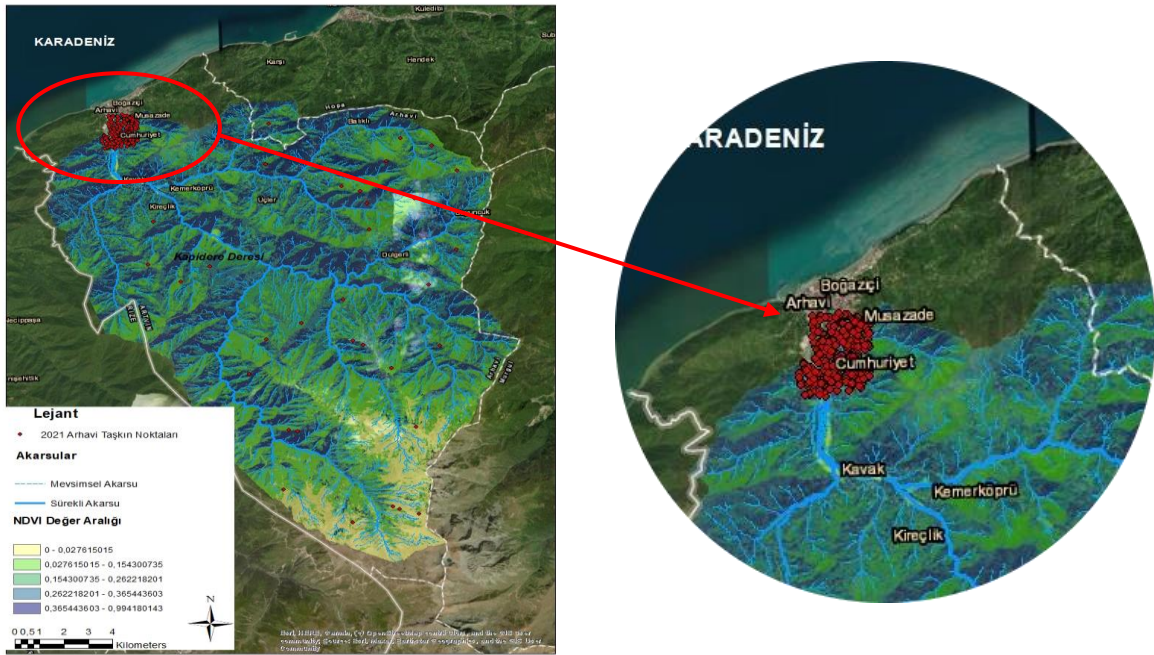
Çalışma sahasında drenaj yoğunluğu değerleri 3.36 ve 4.93 değerleri arasında değişmektedir. Taşkın yaşanan noktada bu değerler 4.64 ve 4.93 arasında olmuştur. Taşkın yaşanan noktalar akarsuların birleşim ve denize deşarj yerinde olduğundan akarsu boyunca en yüksek drenaj yoğunluk değerlerinde yaşanmıştır. Drenaj yoğunluğu değerlerinin yüksek olması havza içerisinde taşkına etki eden etmenlerden olduğunu göstermektedir (Şekil 9).

Normalize edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), bitki örtüsünün durumunu rakamsallaştıran ve çalışmalarda kullanımını sağlayan bir indekstir. Bu indeks ile taşkın arasında doğrudan bir bağıntı vardır

(Pourghasemi ve ark., 2020). Bitki örtüsünün yoğun olduğu alanlarda taşkın afetinin oluşum hızı düşmekte ve bitkilerin su emilimi ile akış yavaşlamaktadır (Koç & Küçükönder, 2021). Bu nedenden dolayı bu çalışmaya arazi örtüsünün tamamlayıcısı olarak NDVI eklenmiştir. Bitki örtüsünün yoğun olduğu yerlerde indeks değerleri +1'e yakınken, zayıf olduğu alanlarda yerlerde -1'e doğru yaklaşmaktadır. 0.7 değerinin üzerinin yoğun bitki örtüsü, 0.0-0.4 aralığı ortalama yoğunluk ve <0 değeri olan yerlerde bitki örtüsü bulunmayan yerleri temsil etmektedir (Akkartal ve ark., 2005; Tunay & Ateşoğlu, 2008). Havzadaki bitki örtüsü değerleri ve taşkın yaşanan alandaki bitki örtüsü (NDVI) değerleri değerlendirildiğinde kendi içerisinde havza ve taşkın sahası arasında belirgin bir farklılık göstermediği görülmektedir (Şekil 10).

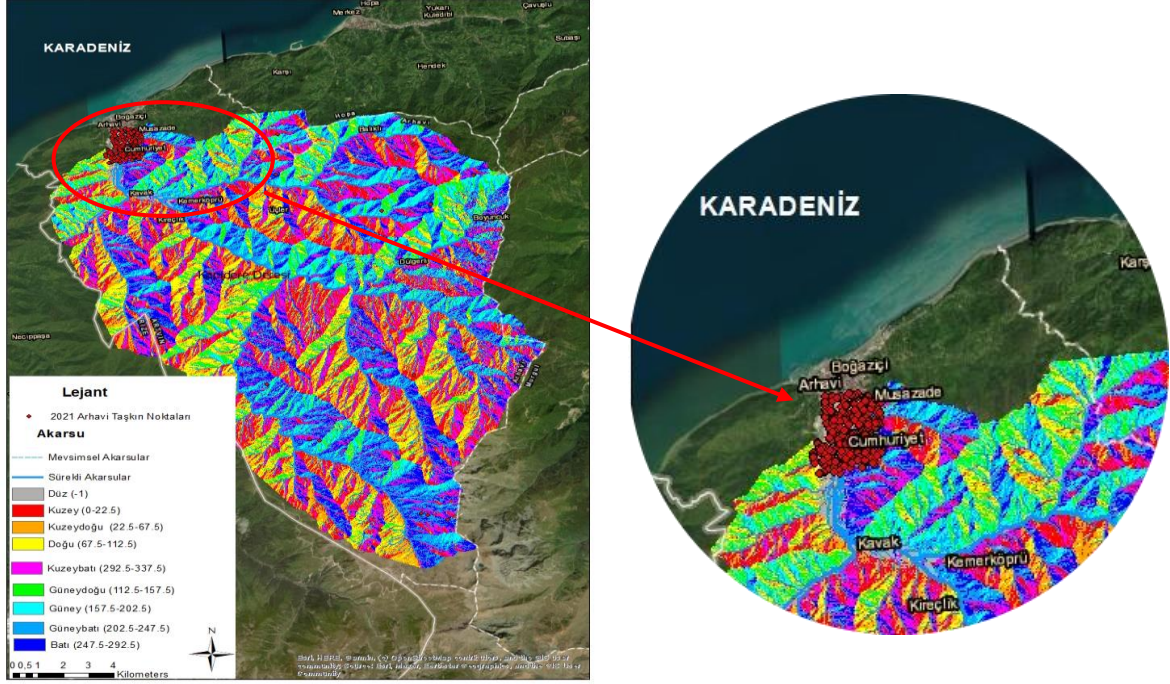


Şekil 9. Kapsire Deresi Havzasının Drenaj yoğunluğu haritası.



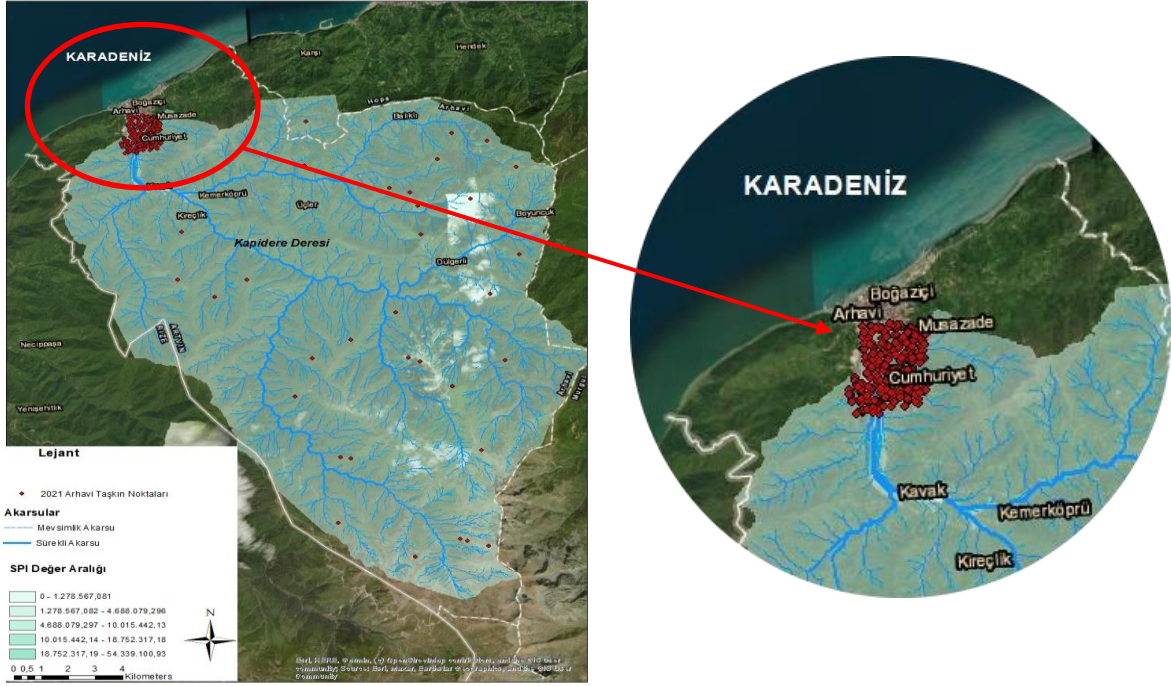
Şekil 10. Kapsire Deresi Havzasının Normalleştirilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) haritası.

Bakı özellikle yoğun karla kaplı alanlarda karın erken akışa geçmesi le taşkına doğrudan etki edebilecek bir başka parametredir (Hanson ve ark., 2006; Regmi ve ark., 2014; Minglei ve ark., 2021). Çalışma kapsamında sahanın bakı haritası oluşturulmuş ve 2021 yılında taşkın yaşanan yerlerin bakı değerleri belirlenmiştir. 280 adet çalışma verisinin bakı değerleri: 139 adedi düz, 14 kuzey, 6 kuzeydoğu, 7 doğu, 3 güneydoğu, 8 güney, 23 güneybatı, 43 batı ve 37 adet kuzey batı bakı değerlerinden oluşmaktadır. Genel anlamda taşkın yaşanan noktalarının yaklaşık yarısı düz noktalarda oluşurken, batı ve batısı olan ara yönler biraz daha yüksek çıkmasına rağmen her yönde taşkın yaşanan nokta mevcuttur. Bu da bakının 2021 taşkınının oluşmasında çok önemli bir etmen olmadığını göstermektedir (Şekil 11).



Şekil 11. Kapisre Deresi Havzasının bakı haritası.

Çalışma alanında akarsu güç indeksi (SPI) değerleri 0 ila 54.339.100,93 arasındadır. Taşkın yaşanan noktalarda akarsu güç indeksi değerleri 0 ila 6.671.783,5 olarak değişmektedir. 280 adet veriden 159 adet veride akarsu güç indeksi değeri 0 olarak belirlenmiş ve taşkın yaşanan noktalar akarsu güç indeksi (SPI) açısından daha düşük değerlerde olduğu belirlenmiştir (Şekil 12).

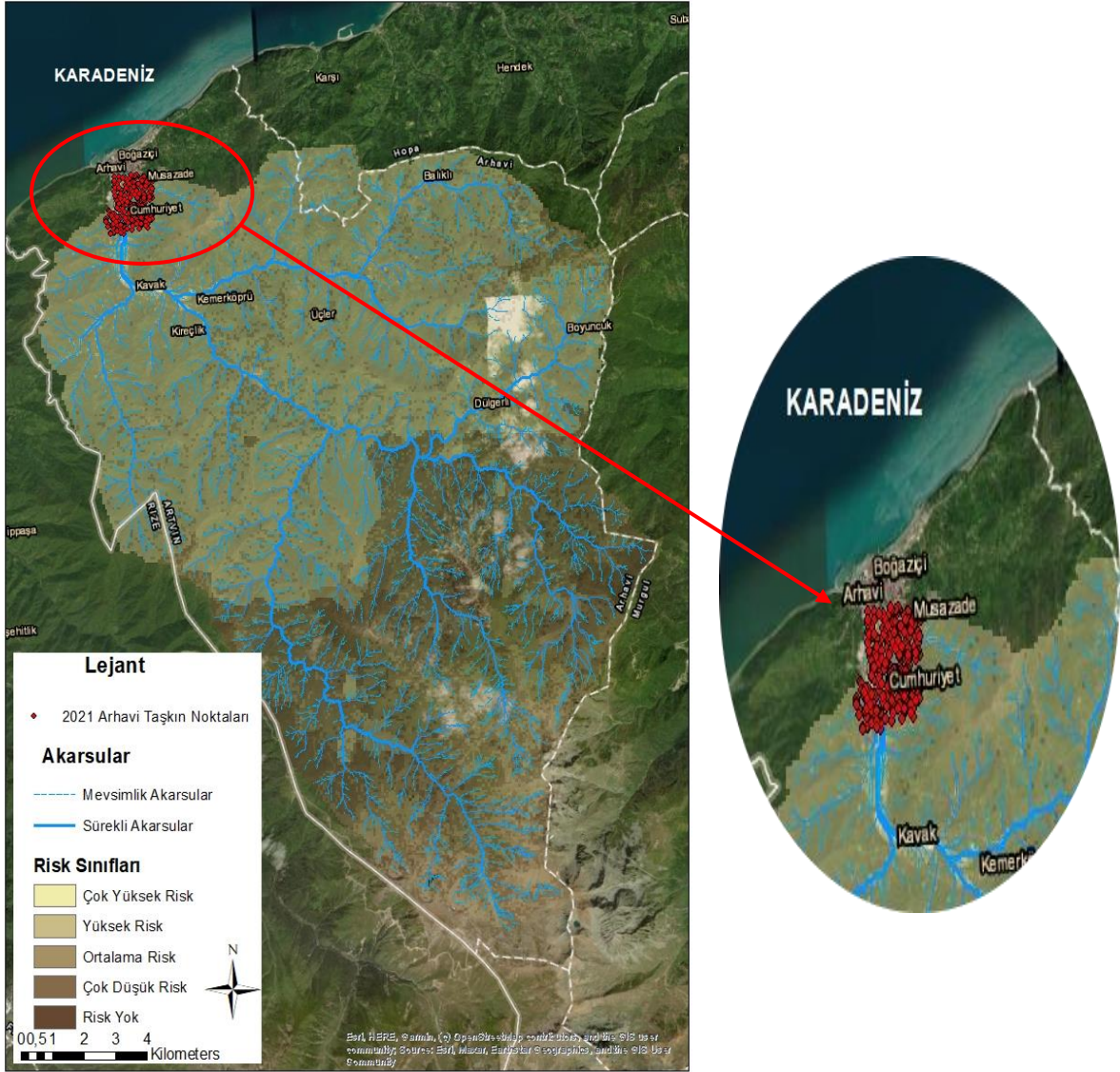


Şekil 12. Kapisre Deresi Havzasının Akarsu Güç İndeksi (SPI).

Çalışmada kullanılan her iki yöntemle taşkına etki eden parametrelerin birbirine üstünlük katsayıları ile hücresel risk sınıfları bulunmuş ve havzada taşkın konusunda her bir bölge risk sınıflarına ayrılmıştır. AHP metodu duyarlılık haritası incelendiğinde, çok geniş bir alanın riskli bölge olarak belirlendiği, havzanın memba kısımlarında risk durumunun azaldığı görülmektedir. 280 adet taşkın yaşanan noktasal verilerden AHP metodu 84 adet çok yüksek ve 196 adet yüksek riskli noktalar olarak tespit etmiştir. AHP yöntemine göre Arhavi ilçe merkezinin yanı sıra Boğaziçi, Cumhuriyet, Musazade, Kavak, Kemerköprü, Kireçlik, Üçler ve Balıklı mahalle ve köyleri çok yüksek riskli alanların içerisinde yer almaktadır (Şekil 13). Shannon Entropi (SE) yöntemi haritası incelendiğinde AHP metoduna göre riskli bölgeler daha dar ve havzanın mansap kısmına yakın noktalarda kümelenildiği görülmektedir. Yöntem bulgularına göre Boğaziçi, Cumhuriyet, Musazade, Kavak, Kemerköprü, Kireçlik mahalleleri çok yüksek riskli olarak tespit edilen alanda kalırken Üçler ve Balıklı ise yüksek riskli kısımlarda kalmıştır. Shannon Entropi yönteminde taşkın yaşanan 280 noktasal veriyle mukayesesi yapıldığında 240 adet çok yüksek ve 40 adet yüksek olarak belirlenen sınıf aralığına denk geldiği görülmektedir (Şekil 14). Çalışmada kullanılan yöntemler; sadece doğru değerleri tahmin başarısını ortaya koyan R, P ve F-Score yöntemlerinin yanısıra hem doğru hem yanlış değerleri tahmin etmeye yarayan ACC ile mukayese edilmiştir. ACC yönteminde her iki metotta başarılı sonuçlar bulmuş, AHP metodu tüm veri setinin %88'ini, SE yöntemi ise %90'unu doğru tahmin etmiştir. Sadece yaşanan değerleri tahmin etme başarısında SE yöntemi 3 farklı doğrulama testinde daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur (Çizelge 3). 280 noktasal verilerin taşkın risk haritası oluşturan metodlarla mukayesesi ve doğrulama metodlarının değerleri göz önüne alındığında her iki durumda da Shannon Entropi (SE) metodu daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. SE yönteminde taşkına en etkili üç parametre sırasıyla yağış, yükselti ve eğim ve etkisi düşük parametreler sırasıyla drenaj yoğunluğu, NDVI ve TWI olarak belirlenmiştir. AHP metodunda ise sırasıyla yükselti, yağış ve toprak en etkili 3 parametreyken NDVI, bakı ve eğim sırasıyla en etkisiz parametreler olarak bulunmuştur. Parametrelerin birbirine ağırlık değerleri ve yöntemlerin algoritmasındaki farklılıklar yöntemlerin farklı sonuç vermesinde etkili olmuştur.

Çizelge 3. Yöntemlerin doğrulama değerleri

Doğrulama Yöntemler	Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)	Shannon Entrop (SE)
ACC	0.88	0.90
R	0.74	0.75
P	0.83	0.88
F	0.78	0.81



Şekil 13. AHP metodu taşkın duyarlılık haritası.

edilmemiştir. Çalışmamızdaki her iki yöntemde de ağırlıklandırma değerleri gerçek duruma yakın sonuçlar vermiştir. Bu amaçla 280 noktasal veri ile parametre ve alt parametrelerin bu noktadaki değerleri karşılaştırılmıştır. Parametrelerin haritaları incelendiğinde havzanın en düşük yükselti aralıklarında taşkın olduğu, yağışın yüksek olduğu tüm noktalarda taşkın yaşanmamasına rağmen, taşkına yüksek yağışın etkisinin olduğu görülmektedir. Taşkın yaşanan noktaların çoğunlukla alüvyal topraklardan meydana gelmesine rağmen bazı yerlerde kırmızımsı sarı podzolik topraklara rastlanmaktadır. Diğer parametrelerin bazı alt parametreleri taşkın yaşanan noktalarda tekrür etmesine rağmen özellikle bir alt parametrenin taşkına doğrudan etki ettiği düzeyde değerlere rastlanılmamıştır.

Ayrıca çalışmada literatürde sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinden Shannon Entropi (SE) ve Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile havzanın duyarlılık haritaları oluşturulmuştur. AHP metoduyla oluşturulan taşkın duyarlılık haritasında riskli alanlar daha geniş bir alanı kapsarken SE metodunda daha dar ve havzanın mansap bölgesinde riskli alanlar belirlenmiştir. SE metodu hem kullanılan 4 adet doğrulama metodunda hem de 280 adet taşkın yaşanan noktasal veri ile mukayesesinde daha iyi sonuçlar vermektedir.

2021 yılında can ve mal kaybına neden olan bu taşkınının en temel nedeni, akarsuyun denize döküldüğü noktaya yakın yerlerdeki yükselti düşüklüğü ve yoğun yağıştır. Bu noktaların yerleşim alanı olarak seçilmesi ise taşkınının bilançosunu arttırmaktadır. Taşkın risk ve duyarlılık haritaları gerek akarsu düzenleyici yapıların yapılmasında gerekse şehirleşme konularında altlık olarak kullanılması ciddi fayda sağlamaktadır. 2021 yılında yaşanan bu afetin lokasyonu her iki yöntemde de riskli sınırlar içinde kalmaktadır. Ayrıca her iki yöntemde göre de Arhavi merkezinin yanı sıra Boğaziçi, Cumhuriyet, Musazade, Kavak, Kemerköprü, Kireçlik mahalleleri çok yüksek riskli bölgelerde kalan yerleşim alanlarıdır. Bu alanlardaki yerleşim yerlerinde akarsuyun taşkın oluşturulabileceği ihtimaline karşı akarsu düzenleyici yapıların yapılması, akarsu yataklarında kalan yerleşimlerin tahliye edilmesi gerekmektedir. Ayrıca olası taşkın anında korunmak amacıyla erken uyarı sistemleri oluşturulmalı ve güvenli olarak inşa edilen bölgelere tahliyeler yapılmalıdır. Literatürdeki pek çok çalışmada yöntemlerin çoğu ampirik doğruluk testleri ile test edilmesidir. Bu çalışmada görüldüğü üzere yöntemlerin en iyi doğrulama mukayesesini geçmişte yaşanan bir durumla karşılaştırılmasıdır. Geçmişte yaşanan bir afetle anlamlı sonuçlar vermek gelecekte riskli olan alanları tespit etmek için oldukça önemlidir. Bu tür çalışmaların artırılması, geliştirilmesi ve yapılan çalışmaların teoride kalmayıp ilgili kurumlarca dikkate alınması taşkınlardaki can ve mal kaybını ciddi oranda azaltacaktır.

Teşekkür

Bu araştırma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Araştırma Fonu (proje no: FDK-2022-2796) tarafından desteklenmiştir.

Kaynakça

- AFAD. (2019). *Afet yönetimi kapsamında 2019 yılına bakış ve doğa kaynaklı olay istatistikleri*. Erişim tarihi: 25.07.2022. https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/35429/xfiles/turkiye_de_afetler.pdf
- AFAD. (2021). *Artvin il risk azaltma planı*. Erişim tarihi: 08.05.2022. https://artvin.afad.gov.tr/kurumlar/artvin.afad/ARTVIN-IRAP/ARTVIN-IRAP-SON_22102021.pdf
- Ahmad, D., & Afzal, M. (2020). Flood hazards and factors influencing household flood perception and mitigation strategies in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(13), 15375-15387. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08057-z>
- Akkartal, A., Türüdü, O., & Erbek, S. F. (2005). *Çok zamanlı uydu görüntüleri ile bitki örtüsü değişim analizi*. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Türkiye.
- Anonim. (2021). *Arhavi'de yaşanan selde taşan Kabisre Deresi'nde taşkın önlemleri alınıyor*. Sabah Gazetesi. Erişim tarihi: 25.10.2023. <https://www.sabah.com.tr/artvin/2021/08/11/arhavide-yasanan-selde-tasan-kabisre-deresinde-tasakin-onlemleri-aliniyor>
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin

- versant. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43-69.
<https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bui, D. T., Pradhan, B., Nampak, H., Bui, Q. T., Tran, Q. A., & Nguyen, Q. P. (2016). Hybrid artificial intelligence approach based on neural fuzzy inference model and metaheuristic optimization for flood susceptibility modeling in a high-frequency tropical cyclone area using GIS. *Journal of Hydrology*, 540, 317-330. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.027>
- Çiçek, İ., & Ataol, M. (2009). Türkiye'nin su potansiyelinin belirlenmesinde yeni bir yaklaşım. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 7(1), 51-65. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000094
- Çınaklı, M. (2008). *Doğu Karadeniz bölümünde meydana gelen taşkınlar*. (Yüksek Lisans Tezi), Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Dastorani, M. T., Moghadamnia, A., Piri, J., & Rico-Ramirez, M. (2010). Application of ANN and ANFIS models for reconstructing missing flow data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166, 421-434. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1012-8>
- Debnath, J., Debbarma, J., Debnath, A., Meraj, G., Chand, K., Singh, S. K., ... & Saikia, A. (2024). Flood susceptibility assessment of the Agartala Urban Watershed, India, using machine learning algorithm. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(2), 110. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12240-3>
- DSİ. (1996). Doğu Karadeniz taşkınları raporu (1970-1995). DSİ Yayınları, Trabzon, Türkiye.
- DSİ. (2006a). *Su dünyası dergisi*, Sayı: 34. DSİ Vakfı Yayınları, Ankara.
- DSİ. (2006b). *Trabzon taşkınları raporu (2004, 2005, 2006)*. DSİ Yayınları, Trabzon.
- El-Magd, S. A. A., Ahmed, H., Pham, Q. B., Linh, N. T. T., Anh, D. T., Elkhrachy, I., & Masoud, A. M. (2022). Possible factors driving groundwater quality and its vulnerability to land use, floods, and droughts using hydrochemical analysis and GIS approaches. *Water*, 14(24), 4073. <https://doi.org/10.3390/w14244073>
- Ghosh, A., & Kar, S. K. (2018). Application of analytical hierarchy process (AHP) for flood risk assessment: a case study in Malda district of West Bengal, India. *Natural Hazards*, 94, 349-368. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3392-y>
- Gigović, L., Pamučar, D., Bajić, Z., & Drobnjak, S. (2017). Application of GIS-interval rough AHP methodology for flood hazard mapping in urban areas. *Water*, 9(6), 360. <https://doi.org/10.3390/w9060360>
- Hammami, S., Zouhri, L., Souissi, D., Souei, A., Zghibi, A., Marzougui, A., & Dlala, M. (2019). Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4754-9>
- Hanson, P. R., Mason, J. A., & Goble, R. J. (2006). Fluvial terrace formation along Wyoming's Laramie Range as a response to increased late Pleistocene flood magnitudes. *Geomorphology*, 76(1-2), 12-25.
- Hava Kuvvetleri Komutanlığı. (2021). *Sayısal yükselti modeli (SYM)*. Harita Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Khosravi, K., Nohani, E., Maroufinia, E., & Pourghasemi, H. R. (2016). A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. *Natural Hazards*, 83(2), 947-987. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2357-2>
- Koç, E., & Küçükönder, M. (2021). Erkenez havzası CBS matris yöntemi ile heyelan duyarlılık değerlendirmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(1), 141-154. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.933874>
- Lin, J. (1991). Divergence measures based on the Shannon entropy. *IEEE Transactions on Information Theory*, 37(1), 145-151. <https://doi.org/10.1109/18.61115>
- Lowe, D., Ebi, K. L., & Forsberg, B. (2013). Factors increasing vulnerability to health effects before, during and after floods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(12), 7015-7067. <https://doi.org/10.3390/ijerph10127015>
- Mileti, D. S. (1995, November). *Factors related to flood warning response*. US-Italy Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods, Perugia, Italy.

- Minglei, R., Liuqian, D., Gang, W., Guangyuan, K., Xiaodi, F., YaFeng, Z., & Liping, Z. (2021). Identification of the inter-basin water diversion project-effected local flood risk factor by using the fishbone-diagram method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 826(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/826/1/012011>
- Ouma, Y. O., & Tateishi, R. (2014). Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water*, 6(6), 1515-1545. <https://doi.org/10.3390/w6061515>
- Özcan, O. (2008). *Sakarya nehri alt havzası'nın taşkın riski analizinin uzaktan algılama ve CBS ile belirlenmesi*. (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Özdemir, H. (2007). *Farklı senaryolara göre taşkın risk analizi: Havran Çayı örneği (Balıkesir)*. TMMOB Afet Sempozyumu, Ankara, Türkiye.
- Pham, B. T., Luu, C., Van Phong, T., Nguyen, H. D., Van Le, H., Tran, T. Q., ... & Prakash, I. (2021). Flood risk assessment using hybrid artificial intelligence models integrated with multi-criteria decision analysis in Quang Nam Province, Vietnam. *Journal of Hydrology*, 592, 125815. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125815>
- Pourghasemi, H. R., Kornejady, A., Kerle, N., & Shabani, F. (2020). Investigating the effects of different landslide positioning techniques, landslide partitioning approaches, and presence-absence balances on landslide susceptibility mapping. *Catena*, 187, 104364. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104364>
- Rashidpour, K. (2013). *Using improved AHP method in maintenance approach selection*. (PhD), Mälardalen University, School of Innovation, Design and Engineering, Sweden.
- Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T., & Akgun, A. (2014). Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 725-742. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0807-z>
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process (AHP). *The Journal of the Operational Research Society*, 41(11), 1073-1076.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Sahana, M., & Patel, P. P. (2019). A comparison of frequency ratio and fuzzy logic models for flood susceptibility assessment of the lower Kosi River Basin in India. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-27. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8285-1>
- Sarkar, D., Saha, S., & Mondal, P. (2022). GIS-based frequency ratio and Shannon's entropy techniques for flood vulnerability assessment in Patna district, Central Bihar, India. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(9), 8911-8932. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03627-1>
- Senan, C. P., Ajin, R. S., Danumah, J. H., Costache, R., Arabameri, A., Rajaneesh, A., ... & Kuriakose, S. L. (2023). Flood vulnerability of a few areas in the foothills of the Western Ghats: a comparison of AHP and F-AHP models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(2), 527-556. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02267-2>
- Shaikh, M. P., Yadav, S. M., & Manekar, V. L. (2024). Flood hazards mapping by linking CF, AHP, and fuzzy logic techniques in urban areas. *Natural Hazards Review*, 25(1), 04023048. <https://doi.org/10.1061/NHREFO.NHENG-1716>
- Stefanidis, S., & Stathis, D. (2013). Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Natural Hazards*, 68, 569-585. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0639-5>
- Swain, K. C., Singha, C., & Nayak, L. (2020). Flood susceptibility mapping through the GIS-AHP technique using the cloud. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 720. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120720>
- Tehrany, M. S., Jones, S., & Shabani, F. (2019). Identifying the essential flood conditioning factors for flood prone area mapping using machine learning techniques. *Catena*, 175, 174-192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.011>
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512, 332-343. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008>

- Tunay, M., & Ateşeoğlu, A. (2008). Çok zamanlı uydu görüntüleri ile amasra ve yakın çevresine ait bitki örtüsü değişim analizi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 10(13), 71-80.
- Utlu, M. (2023). Frekans oranı ve Shannon entropisi yöntemi kullanarak Ezine Çayı havzası taşkın duyarlılık analizi (Kastamonu-Bozkurt). *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, (11), 160-178. <https://doi.org/10.46453/jader.1358845>
- Vestby, J., Schutte, S., Tollefsen, A. F., & Buhaug, H. (2024). Societal determinants of flood-induced displacement. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(3), e2206188120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2206188120>
- Wang, Z., Lai, C., Chen, X., Yang, B., Zhao, S., & Bai, X. (2015). Flood hazard risk assessment model based on random forest. *Journal of Hydrology*, 527, 1130-1141. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.008>
- Werner, M. G. F., Hunter, N. M., & Bates, P. D. (2005). Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation. *Journal of Hydrology*, 314(1-4), 139-157. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.012>
- Yükseler, U., Toprak, A., Gul, E., & Dursun, O. F. (2023). Flood hazard mapping using M5 tree algorithms and logistic regression: a case study in East Black Sea Region. *Earth Science Informatics*, 16(3), 2033-2047. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01013-8>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Yarı Kurak-Kurak İklim Koşullarında Bazı Ampirik Modeller Kullanılarak A Sınıfı Buharlaşma Kabından Gerçekleşen Günlük Buharlaşmanın Tahmin Edilmesi

Selçuk USTA*

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 65080, Van, Türkiye
Selçuk USTA, ORCID No: 0000-0001-8970-7333

*Sorumlu yazar e-posta : susta@yyu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 01.03.2024
Kabul: 20.05.2024
Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1445512

Anahtar Kelimeler

A sınıfı buharlaşma kabı,
Buharlaşma,
Kalibrasyon,
Tahmin modeli

Öz: A sınıfı buharlaşma kabından ölçülen buharlaşma (E_{pan}), hidroloji bilimi kapsamındaki birçok çalışmada temel veri olarak kullanılmaktadır. Bu kaptaki suyun aşırı yağışlarda taşması ve soğuk havalarda donması gibi nedenlerden dolayı ölçülemeyen E_{pan} verilerinin ampirik modellerle tahmin edilmesine ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu çalışmada Linacre, Priestley & Taylor ve Kohler & Nordensen modellerinin Van ili koşullarındaki kullanılabilirlik düzeylerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle 2012 ve 2020 yılları arasında ölçülen günlük iklim verileri ile E_{pan} değerlerinin dokuz yıllık ortalamaları kullanılarak, Microsoft Excel programı çözücü eklentisi aracılığıyla modellerin yöre koşulları ile uyumlu modifiye eşitlikleri oluşturulmuştur. Daha sonra aynı veriler kullanılarak modellerin orijinal ve modifiye eşitlikleriyle yapılan tahminlerde en iyi performans gösteren modelin Linacre olduğu belirlenmiştir. Bu modelin orijinal eşitliği ile %87.24 doğruluk oranına sahip E_{pan} değerleri elde edilirken, modifiye eşitliği ile yapılan tahminlerde bu oran %90.40 düzeyine yükselmiştir. Linacre modeli ile tahmin edilen E_{pan} değerlerinin A sınıfı buharlaşma kabından ölçülen E_{pan} değerleri yerine kullanılabilmesi sonucuna ulaşılmıştır ($P > 0.05$).

Estimating Daily Evaporation from Class-A Pan Evaporimeter Using Some Empirical Models in Semi-Arid-Arid Climatic Conditions

Article Info

Received: 01.03.2024
Accepted: 20.05.2024
Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1445512

Keywords

Calibration,
Class-A pan evaporimeter,
Estimation model,
Evaporation

Abstract: Evaporation (E_{pan}) measured from a class-A pan evaporimeter is used as the primary data in many studies within the scope of hydrology science. Due to various reasons such as the water in this evaporimeter overflowing during heavy rains and freezing in cold weather, it may be necessary to estimate the unmeasured E_{pan} data with empirical models. This study aims to determine the usability levels of Linacre, Priestley & Taylor and Kohler & Nordensen models in Van conditions. Firstly, using the nine-year averages of the climate data and E_{pan} values measured between 2012 and 2020, modified equations of the models compatible with the local conditions were created via the Microsoft Excel program solver add-on. Then, using the same data, Linacre was the model with the best performance in the estimations made with the original and modified equations of the models. While the original equation of this model estimated E_{pan} values with an accuracy of 87.24%, the accuracy rate increased to 90.40% with the modified equation. It was concluded that the E_{pan} values estimated by the Linacre model can be used instead of the actual E_{pan} values measured from the class-A pan evaporimeter ($P > 0.05$).

1. Giriş

Toprak – su yüzeylerinden buharlaşma (E) ve bitkilerden terleme (T) yolu ile gerçekleşen kayıpların toplamı olarak ifade edilen evapotranspirasyon (ET); bitkilerin sulama suyu ihtiyaçlarının belirlenerek sulama programlarının hazırlanması, sulama – drenaj sistemleri ile gölet – barajların projelendirilmesi, yapımı ve işletilmesi, yağışın yüzey akışa geçen ve yer altı suyuna sızan miktarlarının belirlenmesi, havza yönetimi ve kuraklığın izlenmesi gibi birçok çalışmanın en önemli verisini oluşturmaktadır (Abudu ve ark., 2011; Jing ve ark., 2019).

ET, lizimetre sistemleri ile doğrudan ve en güvenilir şekilde ölçülebilmektedir. Ancak bu sistemlerin kurulum ve işletme maliyetlerinin yüksek, ölçme süreçlerinin ise zor ve zaman alıcı olması kullanımlarını kısıtlamaktadır (Abdulkareem ve ark., 2015). Bununla birlikte referans evapotranspirasyona (ET_0) dayalı olarak geliştirilen çok sayıda ampirik tahmin modeli kullanılarak, ET yüksek doğrulukla tahmin edilebilmektedir. Ancak bu modellerde giriş değişkenleri olarak ihtiyaç duyulan hava sıcaklığı, oransal nem, rüzgâr hızı ve solar radyasyon gibi bazı iklim parametrelerinin ölçüldüğü meteoroloji yer gözlem istasyonları tüm dünya üzerinde yeterince yaygın olmamakla birlikte daha çok şehir merkezlerinde bulunmaktadır. Bu nedenle, tarımsal üretim faaliyetlerinin ağırlıklı olarak yürütüldüğü kırsal bölgelerde bu parametreler devamlı ve düzenli olarak ölçülememekte ve dolayısıyla veri temininde sorunlar yaşanabilmektedir. Ölçme işlemlerinde kullanılan cihazların yüksek maliyeti de bir diğer sorunu oluşturmaktadır (Şarlak & Bağçacı, 2020). Bu yöntemlerden farklı olarak A sınıfı buharlaşma kabı (Class-A pan) yöntemi kullanılarak, bu kap içerisindeki su yüzeyinden belirli bir dönem boyunca gerçekleşen buharlaşmanın (E_{pan}) kap çevresindeki üniform yüzey uzunluğu ile oransal nem ve rüzgâr hızının bir fonksiyonu olan kap katsayısı (k_{pan}) ile düzeltilmesi sonucunda hem ET_0 ve hem de ET sadece bir parametreye (E_{pan}) bağlı olarak tahmin edilebilmektedir (Allen ve ark., 1998). Bu yöntem, kullanılan tekniğin basitliği, düşük masraf ve uygulama kolaylığından dolayı dünya genelindeki ET_0 ve dolayısıyla ET tahminlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca bu yöntemin göl, gölet ve baraj gibi su kütlelerinden gerçekleşen buharlaşma miktarlarının tahmin edilmesinde de başarılı bir şekilde kullanılabildiği yapılan çalışmalar ile ortaya koyulmuştur (Terzi, 2011; Benzaghta ve ark., 2012; Kaya ve ark., 2016).

A sınıfı buharlaşma kabı içerisindeki suyun aşırı ve şiddetli yağışlarda taşması, soğuk havalarda donması ve otomatik ölçüm cihazlarının bozulması gibi nedenlerden dolayı bazen E_{pan} ölçümleri yapılamamaktadır. Bununla birlikte E_{pan} miktarları hatalı ölçülebilmekte ve çok çeşitli nedenlerden dolayı ölçülen veriler kaybolabilmektedir. Veri setinin bütünlüğünü sağlamak amacıyla ölçülemeyen, hatalı ölçülen veya kaybolan E_{pan} verilerinin tamamlanmasına ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu doğrultuda E_{pan} miktarının tahmin edilebilmesi amacıyla; Penman, Kohler & Nordensen, Christiansen, Priestley & Taylor ve Linacre gibi çok sayıda ampirik model geliştirilmiştir (Penman, 1948; Kohler ve ark., 1955; Christiansen, 1968; Priestley & Taylor, 1972; Linacre, 1977). Ancak, bu modeller geliştirilmiş oldukları bölgenin koşulları ile uyumlu olduklarından dolayı, farklı iklim ve çevre koşullarına sahip bölgelerde kullanılmaları durumunda güvenilirliklerinin test edilmesi ve gerekiyorsa yöre koşulları ile uyumlu olacak şekilde kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir. Bu doğrultuda farklı iklim ve çevre özelliklerine sahip birçok bölgede çok sayıda çalışma yapılmıştır.

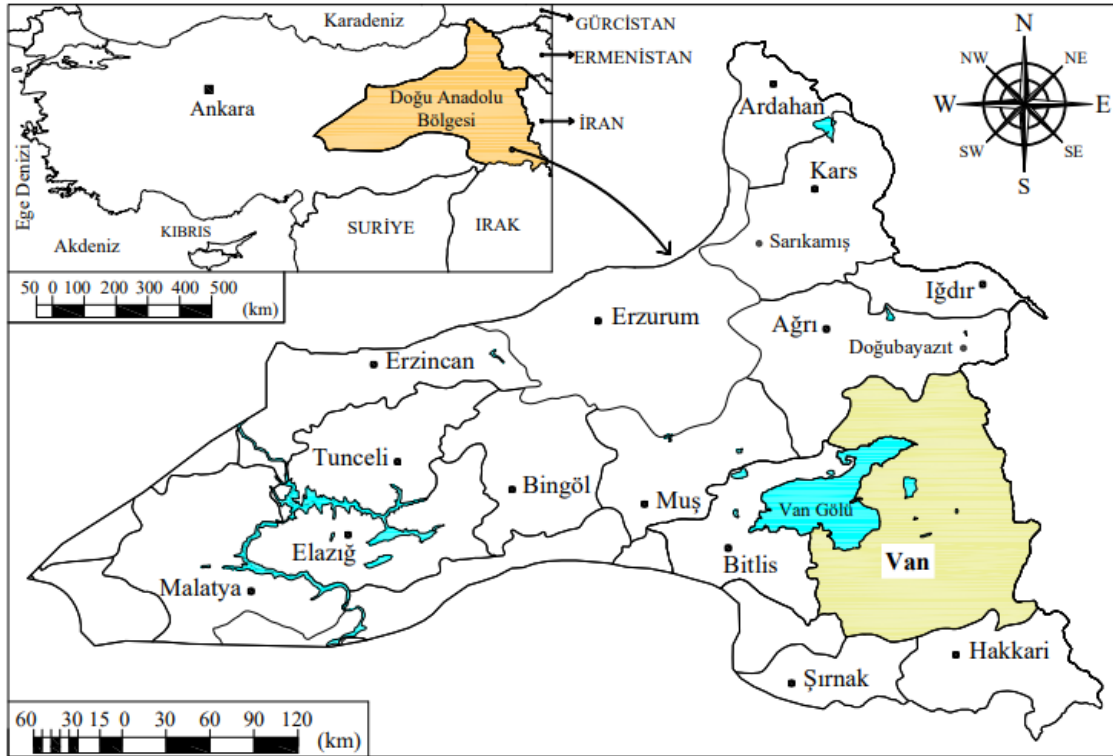
Cabrera ve ark. (2016), tropikal iklimin egemen olduğu Brezilya São Paulo koşullarında Linacre modelinin Priestley & Taylor ve Kohler & Nordenson modellerinden daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde Brezilya koşullarında gerçekleştirilen bir diğer çalışmada Althoff ve ark. (2019), tropik yağmur ormanları ile kuru çöller arasındaki savan bölgesi koşullarında karşılaştırdıkları on dört tahmin modeli arasında en iyi performans gösteren modellerin Linacre ve Kohler & Nordenson olduğunu bildirmişlerdir. Nemli iklim özelliklerinin etkili olduğu Samsun ilinde gerçekleştirilen çalışmalarda Sezer & Öztekin (2016) Penman ve Linacre, Sezer ve ark. (2018) ise Penman ve Priestley & Taylor modellerinin günlük E_{pan} tahminlerindeki performanslarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışmaların her ikisinde de en iyi tahmin performansına sahip model Penman olmuştur. Bu modele en yakın performansı ise Priestley & Taylor göstermiştir. Bu çalışmalardan farklı olarak yarı kurak – kurak iklimin egemen olduğu Iğdır Ovası koşullarında gerçekleştirilen bir çalışmada Kaya ve ark. (2016), 2003 – 2008 yılları arasında ölçülen altı yıllık veri setini kullanarak Penman, Kohler & Nordensen, Christiansen ve Linacre modelleri ile tahmin edilen E_{pan} değerlerini buharlaşma kabından ölçülen E_{pan} değerleri ile karşılaştırmışlardır. Modellerin performanslarına göre iyiden kötüye doğru Kohler & Nordensen, Christiansen, Linacre ve Penman şeklinde sıralandığını ve

en yüksek doğruluk oranına sahip E_{pan} değerlerinin Kohler & Nordensen ile tahmin edildiğini bildirmişlerdir. Benzer iklim özelliklerinin etkili olduğu Siirt ili koşullarında yürütülen bir diğer çalışmada ise Aydın (2019), günlük E_{pan} tahminlerinde Penman modelinin Kohler & Nordenson modelinden çok daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmalardan farklı olarak, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon yöntemleri ile yapay sinir ağları (ANN) ve bulanık mantık (ANFIS) yöntemleri kullanılarak, farklı iklim ve çevre özelliklerine sahip birçok bölge için çok sayıda ampirik E_{pan} tahmin modeli geliştirilmiştir (Al-Mukhtar, 2021; Üçler & Kutlu, 2021; Kumar ve ark., 2022; Adnan ve ark., 2023). Hava sıcaklığı, oransal nem, rüzgâr hızı ve solar radyasyon ile doygun ve gerçek buhar basıncı parametrelerinin bağımsız değişkenler olarak kullanıldığı bu modellerde, bağımsız değişken sayısı arttıkça E_{pan} değerlerinin doğruluğunun arttığı görülmüştür.

Doğu Anadolu Bölgesi kırsalında nüfusun çoğunluğunun geçim kaynağını tarım ve hayvancılık oluşturmaktadır. Bölgede son yıllarda yaşanan kuraklıktan dolayı, tarımsal üretimde verim ve kalite kaybının yaşanmaması için sulamaya her zamankinden daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Çağın en büyük sorunlarından biri olarak görülen kuraklık problemi nedeniyle tarımsal üretimde verim ve kalitenin azalacağı ve buna bağlı olarak gıda temininde ve ekonomide sorunlar yaşanacağı öngörülmektedir (Arslan & Ergül, 2014; Uzunlar & Diş, 2022). Uluslararası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporlarına göre; Akdeniz, Ege, Doğu ve İç Anadolu Bölgelerinde ciddi anlamda iklim değişikliği etkilerinin görüldüğü ifade edilmiştir (IPCC, 2013). Bu nedenle, çalışma alanı olarak IPCC raporlarına göre kuraklık riski altında olan Doğu Anadolu bölgesi sınırları içerisindeki Van ili seçilmiştir. Van ili koşullarında gerçekleştirilen bu çalışmada Kohler & Nordensen (KN), Priestley & Taylor (PT) ve Linacre (LN) modellerinin günlük E_{pan} tahminlerindeki kullanılabilirlik düzeylerinin belirlenmesi ve yöre iklim – çevre koşulları ile uyumlu kalibrasyonlarının yapılması amaçlanmıştır.

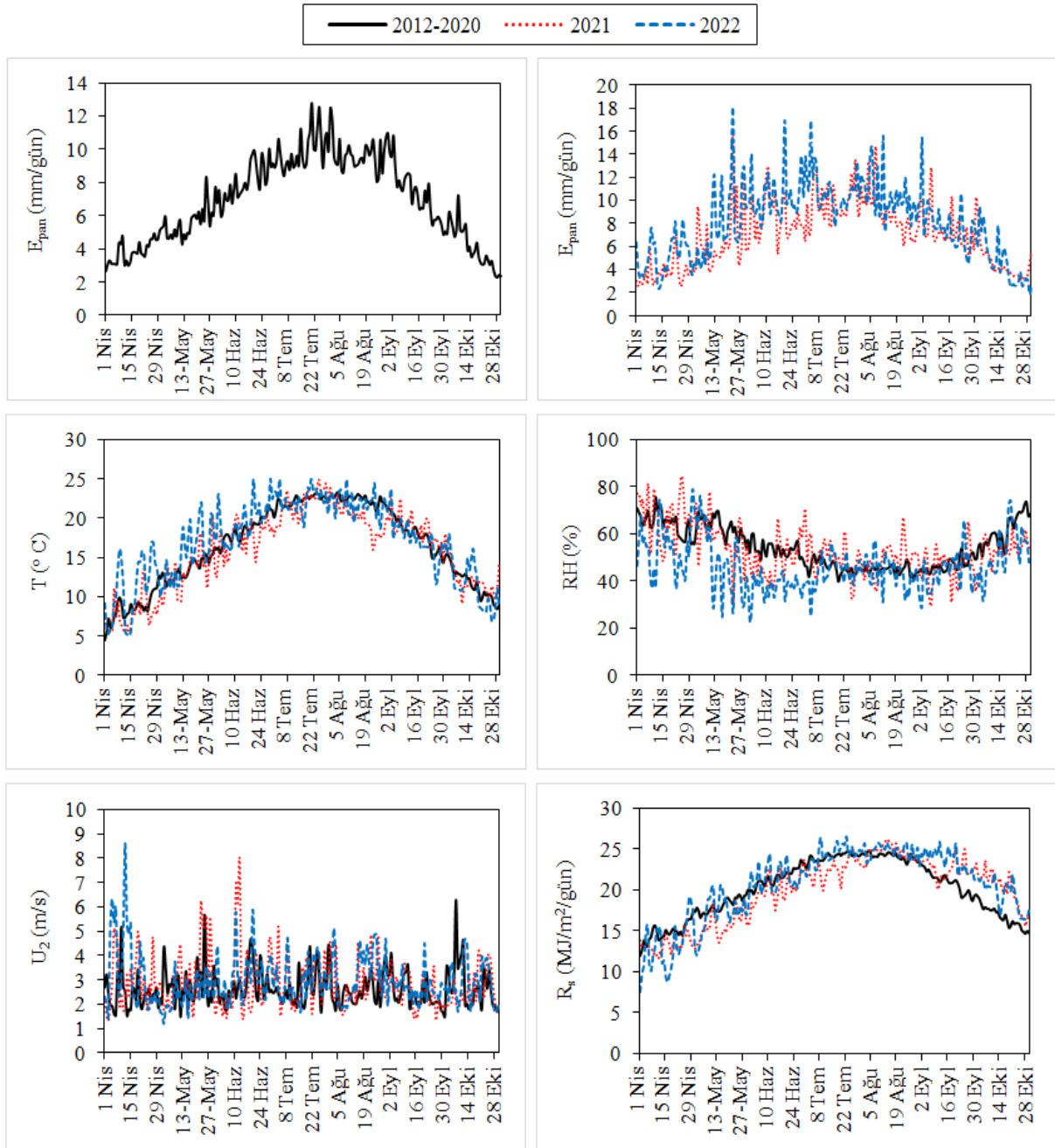
2. Materyal ve Yöntem

Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Murat – Van Bölümü'ndeki Van Gölü kapalı havzası içerisinde bulunan Van ili, $37^{\circ} 43' - 39^{\circ} 26'$ kuzey enlemleri ile $42^{\circ} 40' - 44^{\circ} 30'$ doğu boylamları arasında yer almaktadır (Şekil 1). İlin rakımı 1726 m olup, yıllık ortalama hava sıcaklığı $9.50^{\circ}C$ ve nem oranı %58.67 düzeyindedir. Yıllık ortalama 7.90 saat/gün güneşlenme süresi ve $15.32 MJ/m^2/gün$ solar radyasyon yoğunluğu ile Türkiye'nin en fazla güneş alan şehirleri arasındadır (DMİ, 2023).



Şekil 1. Van ilinin Türkiye haritası üzerindeki coğrafi konumu.

Van ili, karasal iklimin egemen olduğu Doğu Anadolu Bölgesi sınırları içerisinde yer almasına karşın, Van Gölü'nden kaynaklı bir mikroklima iklim yapısına sahip olması nedeniyle, il genelinde daha ılıman bir iklim özelliği hissedilmektedir. KN, PT ve LN modellerinin Van ili mikroklima alanı koşulları ile uyumlu olacak şekilde kalibrasyonlarını yapmak amacıyla, 2012 – 2020 yılları arasında ölçülen hava sıcaklığı (T), oransal nem (RH), rüzgâr hızı (U_2), solar radyasyon (R_s) ve E_{pan} verilerinin dokuz yıllık ortalama değerleri kullanılmıştır. Bu modellerin orijinal eşitlikleri ve kalibrasyon işlemleri sonucunda oluşturulan modifiye eşitlikleri hem uzun yıllar ortalama günlük iklim verileri (2012 – 2020) ve hem de 2021 ve 2022 yılı güncel günlük iklim verileri ile test edilmiştir. Bu doğrultuda Van 14. Meteoroloji Bölge Müdürlüğü 17172 numaralı Edremit yer gözlem istasyonundan temin edilen günlük E_{pan} , T, RH, U_2 ve R_s verileri Şekil 2'de verilmiştir (DMİ, 2023). Edremit yer gözlem istasyonunun rakımı 1669 m olup, $38^\circ 28'$ kuzey enlemi ile $43^\circ 20'$ doğu boylamında yer almaktadır. Çalışma, il genelinde ağırlıklı olarak yetiştiriciliği yapılan tarımsal ürünlerin ekim – dikim dönemleri ve gelişim dönemi uzunlukları dikkate alınarak Nisan – Ekim dönemi için yürütülmüştür.



Şekil 2. Günlük buharlaşma, hava sıcaklığı, oransal nem, rüzgâr hızı ve solar radyasyon değerleri.

KN, PT ve LN tahmin modellerinin orijinal eşitlikleri sırasıyla Eşitlik (1 – 3)'de verilmiştir (Kohler ve ark., 1955; Priestley & Taylor, 1972; Linacre, 1977). Bu modellerin bileşenlerinden çiğlenme noktası sıcaklığı (T_{dew}), aerodinamik fonksiyon (E_a) ve buharlaşma kabı üst yüzeyinden 15.20 cm yukarıda ölçülen rüzgâr hızı (U_p) sırasıyla Eşitlik (4 – 6) ile hesaplanmıştır. Modellerin diğer alt bileşenlerinin belirlenmesinde ise Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından hazırlanan 56 sayılı Sulama – Drenaj yayınından faydalanılmıştır (Allen ve ark., 1998).

$$E_{pan} = \frac{\Delta R_n + \gamma_p E_a}{\Delta + \gamma_p} \quad (1)$$

$$E_{pan} = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma_p} \right) (R_n - G) \quad (2)$$

$$E_{pan} = \frac{\frac{700(T + 0.006Z)}{100-L} + 15(T - T_{dew})}{80 - T} \quad (3)$$

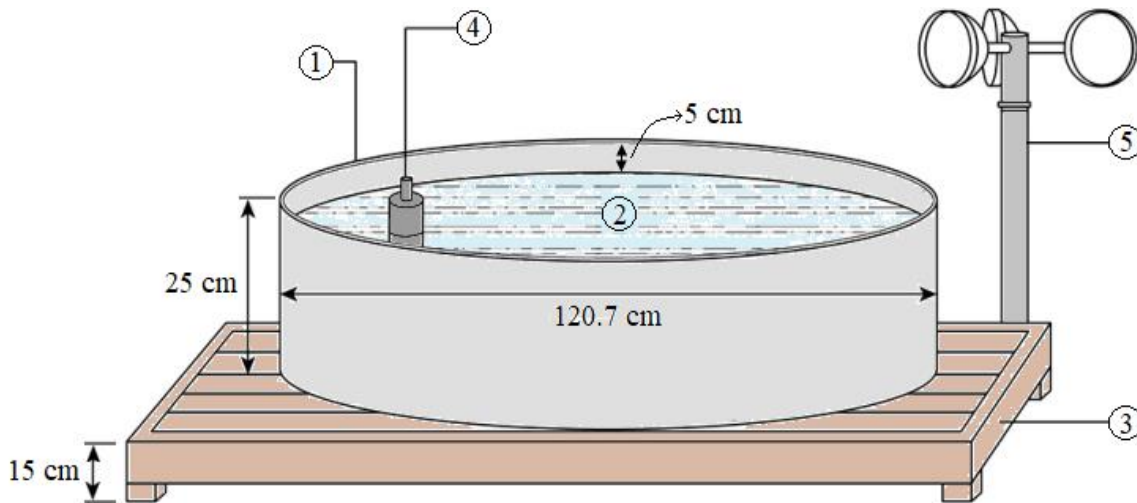
$$T_{dew} = \frac{116.91 + 237.3 \ln(e_a)}{16.78 - \ln(e_a)} \quad (4)$$

$$E_a = 25.4[0.296(e_s - e_a)^{0.88}(0.37 + 0.00255 U_p)] \quad (5)$$

$$U_2 = U_p \left(\frac{4.87}{\ln(67.8 h - 5.42)} \right) \quad (6)$$

Bu eşitliklerde; E_{pan} , buharlaşma kabından gerçekleşen buharlaşma miktarı (mm/gün); α , Priestley & Taylor katsayısı (1.26 alınmıştır); Δ , doymuş buhar basıncı eğrisinin eğimi (kPa/°C); γ_p , psikometrik sabite (kPa/°C); R_n , net radyasyon (MJ/m²/gün); G , topraktaki ısı akısı (MJ/m²/gün); Z , rakım (m); T , hava sıcaklığı (°C); RH , oransal nem (%); E_a , aerodinamik fonksiyon (mm/gün); L , enlem (°); T_{dew} , ortalama çiğlenme noktası sıcaklığı (°C); e_s , doymuş buhar basıncı (kPa); e_a , gerçek buhar basıncı (kPa); U_2 , zemin yüzeyinden 2 m yükseklikte ölçülen rüzgâr hızı (m/s); U_p , buharlaşma kabı üst yüzeyinden 15.20 cm yukarıda ölçülen rüzgâr hızı (m/s) ve h , buharlaşma kabında dikkate alınan rüzgâr hızının ölçüldüğü yüksekliği (m) ifade etmektedir.

Açık su yüzeylerinden belirli dönemler (gün, hafta, ay) boyunca gerçekleşen toplam buharlaşma miktarlarının ölçülmesinde kullanılan A sınıfı buharlaşma kabının (Class – A Pan) genel görünümü ve boyutsal özellikleri Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. A sınıfı buharlaşma kabı (Class – A Pan).

Galvanizli çelik saç kullanılarak 120.70 cm çapında ve 25.00 cm yüksekliğinde imal edilen buharlaşma kabının (1) içerisine doldurulan suyun (2) seviyesi kap üst yüzeyinden 5 cm daha aşağıdadır. Buharlaşma kabı zemin yüzeyinden ortalama 10 cm yükseklikte olacak şekilde bir ahşap platform üzerine yerleştirilmektedir (3). Buharlaşmanın ölçülmesinde çoğunlukla mikrometreli derinlikölçer (4) kullanılmaktadır. Buharlaşma kabı üzerindeki rüzgâr hızını (U_p) ölçmek amacıyla ahşap platforma bir anemometre (5) monte edilmektedir (Şekil 3). KN modelinin giriş değişkenlerinden biri olan U_p , kap üst yüzeyinden 15.20 cm yukarıda ölçülen rüzgâr hızını ifade etmektedir. U_p 'nin ölçüldüğü düzlemin zemin yüzeyinden uzaklığı (h); sırasıyla ahşap platformun yüksekliği (15 cm), buharlaşma kabının yüksekliği (25 cm) ve rüzgâr ölçüldüğü yükseklik (15.20 cm) toplanıp 55.20 cm olarak belirlenmiştir (Allen ve ark., 1998; Alsumaiei, 2020).

KN, PT ve LN modellerinin Van ili mikroklima alanı iklim ve çevre koşulları ile uyumlu kalibrasyonlarının yapılabilmesi amacıyla, bu modellerin orijinal eşitliklerine (Eşitlik 1 – 3) kalibrasyon katsayıları (a , b) atanarak modifiye eşitlikler (Eşitlik 7 – 9) oluşturulmuştur. Microsoft Excel programı çözücü eklentisi kullanılarak, bu katsayılarının optimum değerleri elde edilmiştir. Microsoft Excel programı benzetim çözümlene araçları komut takımının bir parçası olan Excel çözücü hedef hücredeki formülle ilişkili diğer hücreleri kullanarak en uygun “a” ve “b” kalibrasyon katsayılarını belirlemektedir. Excel çözücünün model içinde kullanılabileceği değerler için kısıtlamalar getirilebilmekte ve bu kısıtlamalar, hedef hücre formülünü etkileyen başka hücrelere de uygulanabilmektedir (Cobaner ve ark., 2015).

$$E_{pan} = a \left[\frac{\Delta R_n + \gamma_p E_a}{\Delta + \gamma_p} \right] + b \quad (7)$$

$$E_{pan} = a \left[\alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma_p} \right) (R_n - G) \right] + b \quad (8)$$

$$E_{pan} = a \left[\frac{\frac{700(T + 0.006Z)}{100 - L} + 15(T - T_{dew})}{80 - T} \right] + b \quad (9)$$

T, RH, U_2 ve R_s verileri ile E_{pan} değerlerinin uzun yıllar ortalama (2012 – 2020) günlük değerleri kullanılarak yapılan kalibrasyon işlemleri kapsamında, modifiye eşitliklerdeki “a” ve “b” katsayılarına başlangıçta “1” değeri girilmiş ve günlük E_{pan} değerleri tahmin edilmiştir. Günlük ölçülen ve tahmin edilen E_{pan} değerleri arasındaki farkların kareleri toplamı hesaplanarak, Excel çözücünün hedef hücresine atanmıştır. Çözücü aktif edilerek hedef hücredeki bu toplam değeri minimum yapan “a” ve “b” katsayıları belirlenmiş ve modifiye eşitlikler elde edilmiştir.

KN, PT ve LN modellerinin orijinal ve modifiye eşitlikleri kullanılarak tahmin edilen E_{pan} değerleri Meteoroloji Bölge Müdürlüğü tarafından ölçülen gerçek E_{pan} değerleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma kriterleri olarak; ortalama mutlak hata (Eşitlik 10), ortalama mutlak göreceli hata oranı (Eşitlik 11) ve karekök ortalama karesel hata (Eşitlik 12) değerleri kullanılmıştır. Modellerle tahmin edilen E_{pan} değerlerinin doğruluk düzeyleri; $MAPE < \%10$ ise “çok iyi”, $\%10 \leq MAPE < \%20$ ise “iyi”, $\%20 \leq MAPE < \%50$ ise “kabul edilebilir”, $MAPE \geq \%50$ ise “uyumsuz” olarak değerlendirilmiştir (De Myttenaere ve ark., 2016; Maiseli, 2019). A sınıfı buharlaşma kabından ölçülen ve modeller kullanılarak tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri arasındaki ilişki düzeyini ortaya koymak amacıyla Microsoft Excel programı kullanılarak bağımsız örneklem T testi ve regresyon analizleri yapılmış (Eşitlik 13) ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır (Nakagawa ve ark., 2017).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i:1}^n (|X_i - Y_i|) \quad (10)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i:1}^n \left(\frac{|X_i - Y_i|}{X_i} 100 \right) \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X})(Y_i - \hat{Y})]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2} \quad (13)$$

Bu eşitliklerde; *MAE*, ortalama mutlak hata (mm/gün); *MAPE*, ortalama mutlak göreceli hata oranı (%); *RMSE*, karekök ortalama karesel hata (mm/gün); X_i , A sınıfı buharlaşma kabından ölçülen gerçek E_{pan} değerleri (mm/gün); Y_i , modeller kullanılarak tahmin edilen E_{pan} değerleri (mm/gün); \hat{X} , A sınıfı buharlaşma kabından ölçülen E_{pan} değerlerinin ortalaması (mm/gün); \hat{Y} , modeller kullanılarak tahmin edilen E_{pan} değerlerinin ortalaması (mm/gün); R^2 , regresyon katsayısı ve n , gözlem sayısını (214 gün) ifade etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Öncelikle meteoroloji yer gözlem istasyonu tarafından 2012 – 2020 yılları arasında ölçülen günlük T, RH, U_2 ve R_s verilerinin dokuz yıllık ortalamaları kullanılarak PT, LN ve KN modellerinin girdi değişkenleri (e_s , e_a , Δ , γ_p , R_n , G , E_a , U_p , T_{dew}) belirlenmiştir. Bu değişkenlerle birlikte 2012 – 2020 yılları arasında ölçülen günlük gerçek E_{pan} verilerinin dokuz yıllık ortalama değerleri ile Z ve L parametreleri Microsoft Excel programına girilerek PT, LN ve KN modellerinin formül tanımlamaları yapılmıştır. Bu modellerin modifiye eşitliklerindeki a ve b kalibrasyon katsayıları Excel çözücünün “değişen hücreler” bölümüne atanarak, bu katsayıları başlangıçta “1” değeri girilmiştir. Kalibrasyon katsayılarına “1” değeri girilerek tahmin edilen E_{pan} değerleri ile 2012 – 2020 yılları arasında ölçülen gerçek E_{pan} değerleri arasındaki farkların kareleri toplamı hesaplanarak, çözücüdeki hedef hücreye atanmıştır. Çözücü çalıştırılarak hedef hücredeki toplamı en küçük yapan a ve b katsayıları belirlenmiş ve PT, LN, KN modellerinin Van ili iklim – çevre koşulları ile uyumlu modifiye eşitlikleri oluşturulmuştur. Her bir model için ayrı ayrı yapılan bu işlemleri temsilen, KN modeli modifiye eşitliğini oluşturmak amacıyla Microsoft Excel programı çözücü eklentisi ile yapılan kalibrasyon işlemleri Şekil 4’de gösterilmiştir. Kalibrasyon işlemleri sonucunda belirlenen a ve b katsayıları sırasıyla PT için 0.82 ve -0.87, LN için 1.18 ve -1.54, KN için 0.98 ve -1.20 olarak elde edilmiştir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Tarih	U_2	$e_s - e_a$	Δ	γ	R_n	U_p	E_a	E_{pan} (ölçülen)	E_{pan} (tahmin)	Fark	(Fark) ²			
2	1.Nis	2,69	0,25	0,06	0,06	7,22	1,78	0,82	2,68	=a*((D2*F2)+(E2*H2))/(D2+E2)+b	Katsayı	Katsayı değeri			
3	2.Nis	3,22	0,29	0,07	0,06	7,56	2,13	0,93	3,13	5,6428	2,5128	6,31416	a		1
4	3.Nis	2,42	0,34	0,07	0,06	8,04	1,6	1,08	3,33	5,9776	2,6476	7,00979	b		1
5	4.Nis	1,97	0,35	0,07	0,06	7,71	1,31	1,1	3,13	5,8016					
6	5.Nis	1,93	0,34	0,07	0,06	7,86	1,28	1,08	3,12	5,8768					
7	6.Nis	1,61	0,34	0,08	0,06	8,21	1,07	1,08	3,11	6,305185185					
8	7.Nis	1,52	0,33	0,08	0,06	8,41	1,01	1,04	3,09	6,407407407					
9	8.Nis	3,36	0,44	0,08	0,06	8,83	2,22	1,35	4,42	6,782592593					
10	9.Nis	2,64	0,46	0,09	0,06	9	1,75	1,42	4,31	7,124827586					
11	10.Nis	5,19	0,4	0,08	0,06	8,83	3,44	1,25	4,79	6,741851852					
208															
209															
210															
211	27.Eki	2,46	0,35	0,08	0,06	5,52	1,63	1,12	2,74	4,727407407	1,98741	3,94979			
212	28.Eki	1,93	0,31	0,08	0,06	5,45	1,28	1	2,38	4,637037037	2,25704	5,09422			
213	29.Eki	1,97	0,3	0,08	0,06	5,34	1,31	0,96	2,3	4,555555556	2,25556	5,08753	Katsayı	Katsayı değeri	
214	30.Eki	1,7	0,38	0,08	0,06	5,18	1,13	1,18	2,45	4,55037037	2,10037	4,41156	a		0,98
215										TOPLAM		1470	b		-1,2

Çözücü Parametreleri

Hedef Hücre: \$L\$215

Epittir: En Büyük En Küçük Değer: 0

Değişen Hücreler: \$N\$3:\$N\$4

Kısıtlamalar:

Çöz

Kapat

Tahmin

Seçenekler

Ekle

Değiştir

Tümünü Sifir

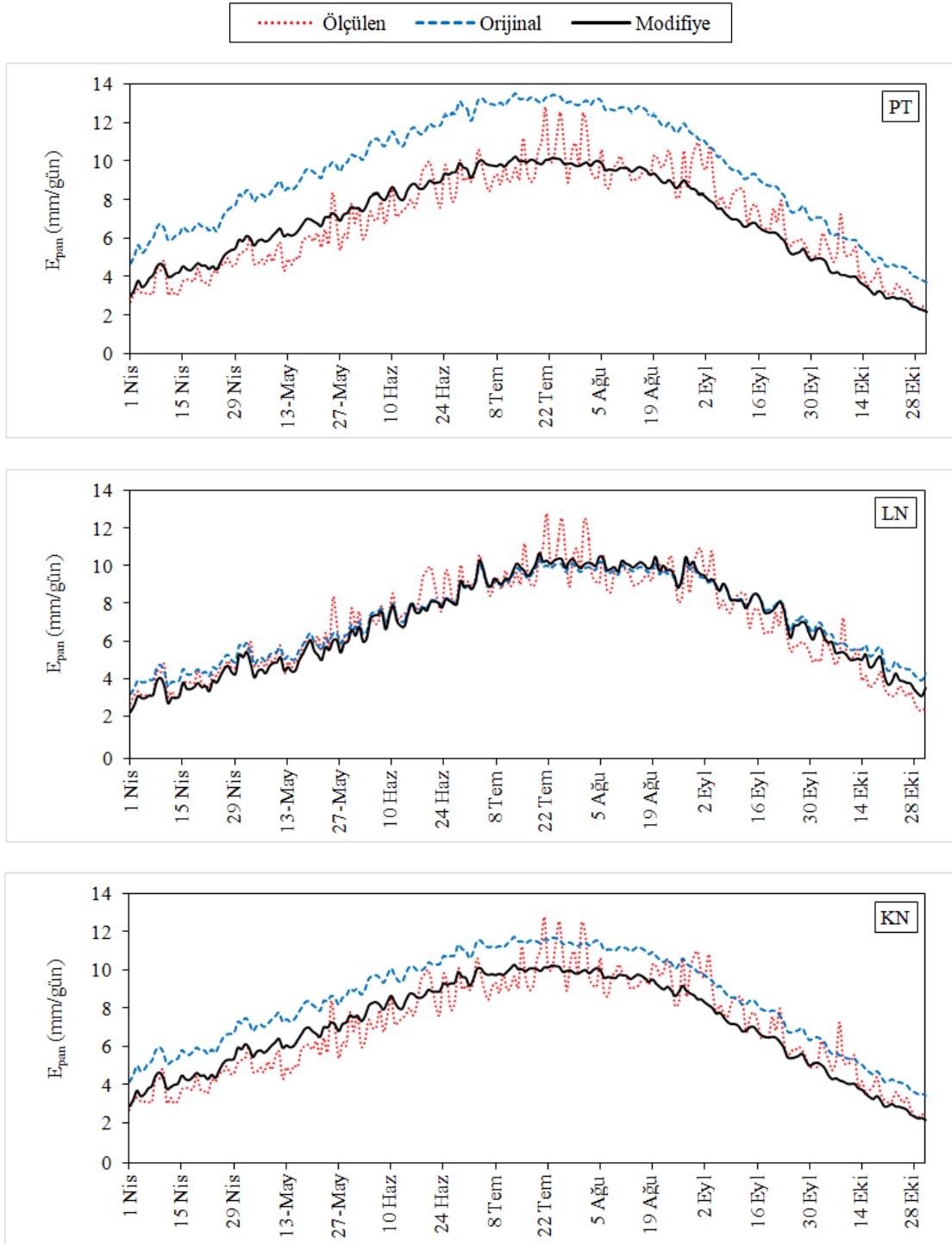
Sil

Yardım

$$E_{pan} = a \left[\frac{\Delta R_n + \gamma_p E_a}{\Delta + \gamma_p} \right] + b$$

Şekil 4. Kohler & Nordensen (KN) modeli modifiye eşitliğinin oluşturulması.

Uzun yıllar ortalama günlük iklim verileri kullanılarak PT, LN ve KN modellerinin orijinal ve modifiye eşitlikleri ile tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri Şekil 5’de verilmiştir. Genel olarak hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve solar radyasyonun yüksek, oransal nemin ise düşük olduğu günlerde gerçekleşen E_{pan} değerlerinin diğer günlere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Ölçülen ve tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri (2012 – 2020).

Meteoroloji yer gözlem istasyonu tarafından ölçülen gerçek günlük E_{pan} değerleri 2.29 – 12.77 mm/gün arasında değerler almıştır. Nisan – Ekim dönemi ortalama değer ise 6.98 mm/gün olarak gerçekleşmiştir. Orijinal eşitlikler ile elde edilen E_{pan} değerleri PT için 3.69 – 13.54 mm/gün, LN için 3.19 – 10.32 mm/gün ve KN için 3.40 – 11.74 mm/gün arasında değişmiştir. Dönemlik ortalama

değerler ise sırasıyla 9.58 mm/gün, 7.20 mm/gün ve 8.38 mm/gün olarak gerçekleşmiştir. Modifiye eşitlikler ile belirlenen E_{pan} değerleri PT için 2.15 – 10.22 mm/gün, LN için 2.23 – 10.67 mm/gün ve KN için 2.12 – 10.25 mm/gün arasında değerler almıştır. Nisan – Ekim dönemi ortalama değerler ise tüm modeller için 6.98 mm/gün olarak gerçekleşmiştir. Ölçülen E_{pan} değerleri ile en yüksek ve en düşük istatistikî ilişki düzeyine sahip tahmin değerleri sırasıyla LN ($R^2= 0.91$) ve PT ($R^2= 0.85$) modelleri ile elde edilmiştir. KN modeli için R^2 katsayısı 0.88 olarak belirlenmiştir (Şekil 5). PT, KN ve LN modellerinin orijinal ve modifiye eşitlikleri kullanılarak tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri ile ölçülen gerçek günlük E_{pan} değerlerin aylık ortalamaları Çizelge 1’de verilmiştir. A sınıfı buharlaşma kabından gerçekleşen buharlaşma miktarı hava sıcaklığı ve solar radyasyonun maksimum, oransal nemin ise minimum düzeylere gerilediği Temmuz ve Ağustos aylarında en yüksek seviyelere ulaşmıştır. Nisan ve Ekim aylarında ise en düşük seviyelere gerilemiştir. Orijinal eşitliklerle tahmin edilen aylık ortalama E_{pan} değerlerinin ölçülen gerçek değerlerden daha yüksek, modifiye eşitliklerle tahmin edilen değerlerin ise ölçülen değerlere çok yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 1. Ölçülen ve tahmin edilen aylık ortalama E_{pan} değerleri (2012 – 2020)

Aylar	Ölçülen (mm/gün)	PT (mm/gün)		KN (mm/gün)		LN (mm/gün)	
		Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye
Nisan	3.85	6.43	4.40	5.62	4.28	4.32	3.58
Mayıs	5.67	9.09	6.58	7.83	6.44	5.72	5.23
Haziran	8.11	11.60	8.64	10.03	8.58	7.74	7.61
Temmuz	10.02	13.13	9.89	11.40	9.92	9.58	9.80
Ağustos	9.67	12.41	9.30	10.85	9.38	9.71	9.94
Eylül	7.36	9.04	6.54	8.08	6.69	7.97	7.89
Ekim	4.12	5.28	3.46	4.81	3.49	5.29	4.72
Ortalama	6.98	9.58	6.98	8.38	6.98	7.20	6.98

PT, KN ve LN modellerinin orijinal ve modifiye eşitlikleri kullanılarak tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri ile ölçülen gerçek E_{pan} değerleri arasındaki sapmanın bir göstergesi olarak hesaplanan MAE, MAPE ve RMSE hatalarının aylık ortalamaları Çizelge 2’de verilmiştir. Orijinal eşitlikler kullanılarak yapılan tahminlerde en iyi ve en kötü tahmin performanslarına sahip modeller sırasıyla LN ve PT olmuştur. LN için MAE 0.37 – 1.26 mm/gün, MAPE %6.22 – 35.88 ve RMSE 0.52 – 1.36 mm/gün arasında değişmiş, dönemlik ortalamaları ise sırasıyla 0.70 mm/gün, %12.76 ve 0.90 mm/gün olarak belirlenmiştir. Aynı değerler PT modeli için sırasıyla 1.24 – 3.50 mm/gün, %24.58 – 69.40 ve 1.30 – 3.57 mm/gün arasında değerler almış, dönemlik ortalamaları ise sırasıyla 2.61 mm/gün, %42.48 ve 2.83 mm/gün olarak elde edilmiştir. LN orijinal eşitliği ile tahmin edilen E_{pan} değerlerinin “iyi” (MAPE= %10 – 20) düzeyde doğruluğa sahip olduğu görülmüştür. PT modeli orijinal eşitliği için ise doğruluk düzeyi “kabul edilebilir” (MAPE= %20 – 50) düzeyde kalmıştır. PT modeline göre daha iyi performans gösteren KN için MAE 0.82 – 2.16 mm/gün, MAPE %12.94 – 48.27 ve RMSE 0.92 – 2.23 mm/gün arasında değişmiştir. Dönemlik ortalamaları ise sırasıyla 1.49 mm/gün, %25.71 ve 1.67 mm/gün olarak belirlenmiştir. KN modeli orijinal eşitliği kullanılarak tahmin edilen günlük E_{pan} değerlerinin doğruluk düzeyi “kabul edilebilir” (MAPE= %20 – 50) olarak belirlenmiştir.

Orijinal eşitliklerde olduğu gibi modifiye eşitliklerde de en iyi ve en kötü tahmin performanslarına sahip modeller sırasıyla LN ve PT olmuştur. Doğruluk düzeyi en yüksek E_{pan} değerlerinin tahmin edildiği modifiye LN için MAE 0.28 – 0.80 mm/gün, MAPE %6.28 – 19.84 ve RMSE 0.36 – 0.95 mm/gün arasında değişmiş, dönemlik ortalamaları ise sırasıyla 0.60 mm/gün, %9.60 ve 0.79 mm/gün olarak belirlenmiştir. Aynı değerler doğruluk düzeyi en düşük E_{pan} değerlerinin tahmin edildiği modifiye PT modeli için sırasıyla 0.58 – 0.98 mm/gün, %7.78 – 18.43 ve 0.65 – 1.12 mm/gün arasında değerler almış, dönemlik ortalamaları ise sırasıyla 0.79 mm/gün, %12.23 ve 0.98 mm/gün olarak elde edilmiştir. PT modeline yakın performans gösteren KN modeli modifiye eşitliği için MAE 0.48 – 0.87 mm/gün, MAPE %7.56 – 13.82 ve RMSE 0.30 – 1.19 mm/gün arasında değişmiştir. Dönemlik ortalama değerler ise sırasıyla 0.72 mm/gün, %11.03 ve 0.82 mm/gün olarak elde edilmiştir. Modifiye eşitlikler ile tahmin edilen günlük E_{pan} değerlerinin doğruluk düzeyleri LN için “çok iyi” (MAPE < %10), PT ve KN için ise “iyi” (MAPE= %10 – 20) olarak belirlenmiştir. Hem

orijinal ve hem de modifiye eşitlikler tahmin performanslarına göre iyiden kötüye doğru LN, KN ve PT şeklinde sıralanmıştır. Bu modellerin orijinal eşitlikleri ile sırasıyla %87.24 (MAPE= %12.76) %74.29 (MAPE= %25.71) ve %57.52 (MAPE= %42.48) doğruluk oranlarına sahip günlük E_{pan} değerleri tahmin edilirken, modifiye eşitlikleri kullanılarak sırasıyla %90.40 (MAPE= %9.60), %88.97 (MAPE= %11.03) ve %87.77 (MAPE= %12.23) doğruluk oranlarına sahip günlük E_{pan} değerleri tahmin edilmiştir. PT, KN ve LN modellerinin modifiye eşitlikleri kullanılarak doğruluk oranları orijinal eşitliklere göre sırasıyla %52.59, %19.76 ve %3.59 daha fazla olan günlük E_{pan} değerleri elde edilmiştir. Van ili iklim ve çevre koşulları ile en uyumlu modelin LN olduğu tespit edilmiştir.

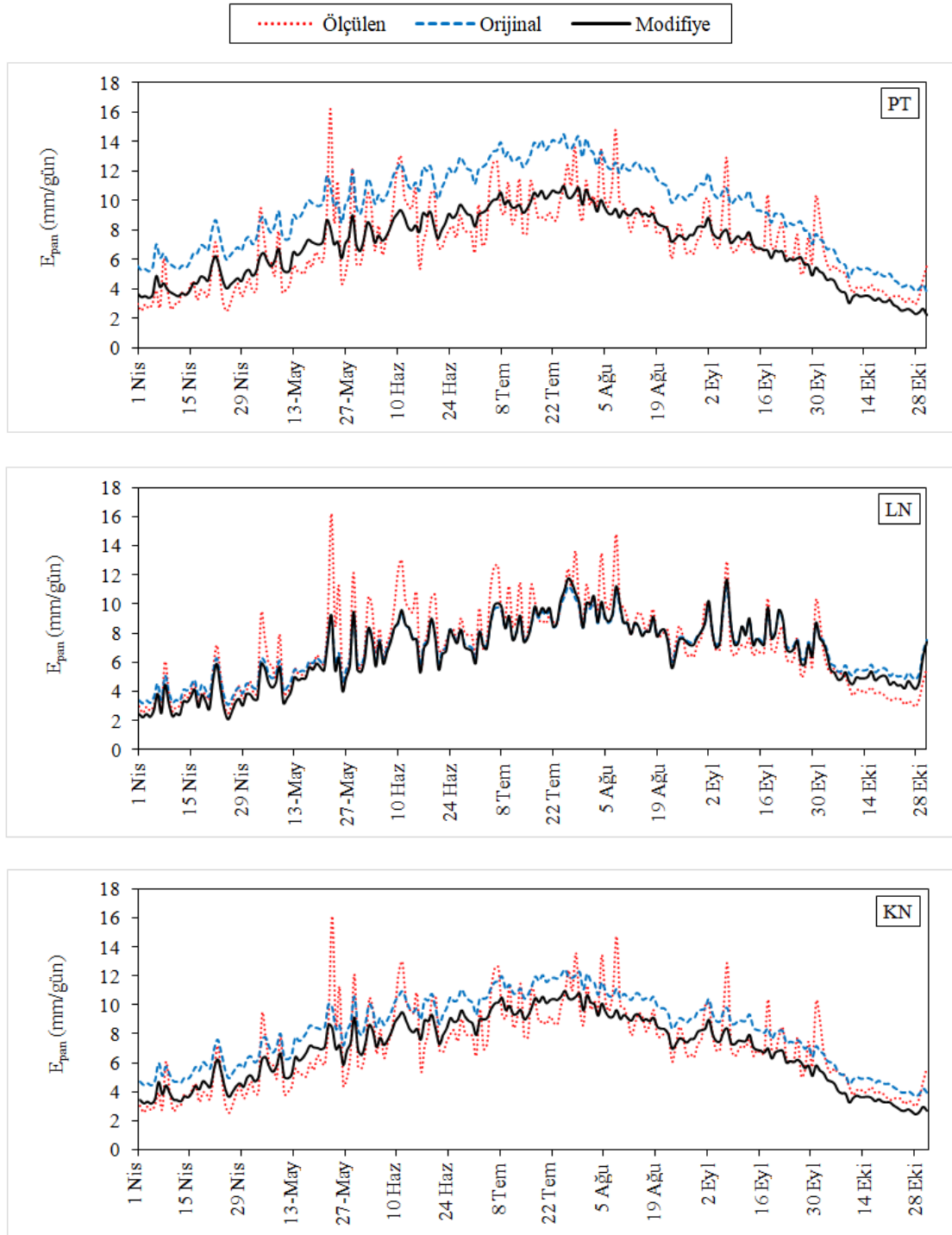
Çizelge 2. Modeller ile tahmin edilen E_{pan} değerlerinin hata miktarları (2012 – 2020)

PT	MAE (mm/gün)		MAPE (%)		RMSE (mm/gün)		Doğruluk düzeyi	
	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye
Nisan	2.59	0.58	69.70	16.06	2.62	0.65	Uyumsuz	İyi
Mayıs	3.42	0.98	62.61	18.43	3.46	1.07	Uyumsuz	İyi
Haziran	3.50	0.79	44.74	10.37	3.57	0.91	Kabul edilebilir	İyi
Temmuz	3.11	0.89	32.56	8.58	3.30	1.12	Kabul edilebilir	Çok iyi
Ağustos	2.74	0.78	29.19	7.78	2.91	1.01	Kabul edilebilir	Çok iyi
Eylül	1.69	0.82	24.58	10.23	1.79	1.07	Kabul edilebilir	İyi
Ekim	1.24	0.67	34.32	14.18	1.30	0.92	Kabul edilebilir	İyi
Ortalama	2.61	0.79	42.48	12.23	2.83	0.98	Kabul edilebilir	İyi
KN	MAE (mm/gün)		MAPE (%)		RMSE (mm/gün)		Doğruluk düzeyi	
	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye
Nisan	1.78	0.48	48.27	12.99	1.81	0.30	Kabul edilebilir	İyi
Mayıs	2.16	0.86	40.08	16.12	2.23	0.88	Kabul edilebilir	İyi
Haziran	1.92	0.76	25.08	9.83	2.05	0.75	Kabul edilebilir	Çok iyi
Temmuz	1.59	0.87	16.73	8.38	1.76	1.19	İyi	Çok iyi
Ağustos	1.31	0.75	14.12	7.56	1.49	0.92	İyi	Çok iyi
Eylül	0.87	0.69	12.94	8.47	0.98	0.91	İyi	Çok iyi
Ekim	0.82	0.64	23.07	13.82	0.92	0.77	Kabul edilebilir	İyi
Ortalama	1.49	0.72	25.71	11.03	1.67	0.82	Kabul edilebilir	İyi
LN	MAE (mm/gün)		MAPE (%)		RMSE (mm/gün)		Doğruluk düzeyi	
	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye
Nisan	0.52	0.28	14.44	7.18	0.55	0.36	İyi	Çok iyi
Mayıs	0.37	0.47	6.44	7.68	0.52	0.65	İyi	Çok iyi
Haziran	0.55	0.57	6.27	6.40	0.78	0.82	İyi	Çok iyi
Temmuz	0.72	0.68	6.64	6.28	1.04	0.95	İyi	Çok iyi
Ağustos	0.60	0.66	6.22	6.99	0.75	0.80	İyi	Çok iyi
Eylül	0.89	0.80	13.31	11.77	1.00	0.89	İyi	İyi
Ekim	1.26	0.76	35.88	19.84	1.36	0.89	Kabul edilebilir	İyi
Ortalama	0.70	0.60	12.76	9.60	0.90	0.79	İyi	Çok iyi

Modellerin orijinal ve modifiye eşitlikleri 2021 ve 2022 yılı iklim verileri ile test edilmiştir. Her iki yıl için ölçülen tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri Şekil 6 ve 7’de verilmiştir. Ölçülen E_{pan} değerleri birinci ve ikinci yıl sırasıyla 2.52 – 16.17 mm/gün ve 1.88 – 18.09 mm/gün arasında değişmiştir. Dönemlik ortalama değerler ise 7.08 mm/gün ve 8.28 mm/gün olarak gerçekleşmiştir.

Birinci yıl PT, KN ve LN modellerinin orijinal eşitlikleri ile tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri sırasıyla 3.74 – 14.46 mm/gün, 3.70 – 12.49 mm/gün ve 3.06 – 11.21 mm/gün arasında değerler almıştır. Dönemlik ortalama değerler 9.47 mm/gün, 8.31 mm/gün ve 6.91 mm/gün olarak belirlenmiştir. Modifiye eşitlikler ile tahmin edilen E_{pan} değerleri ise sırasıyla 2.19 – 10.98 mm/gün, 2.41 – 10.98 mm/gün ve 2.08 – 11.72 mm/gün arasında değişmiştir. Dönemlik ortalama değerler

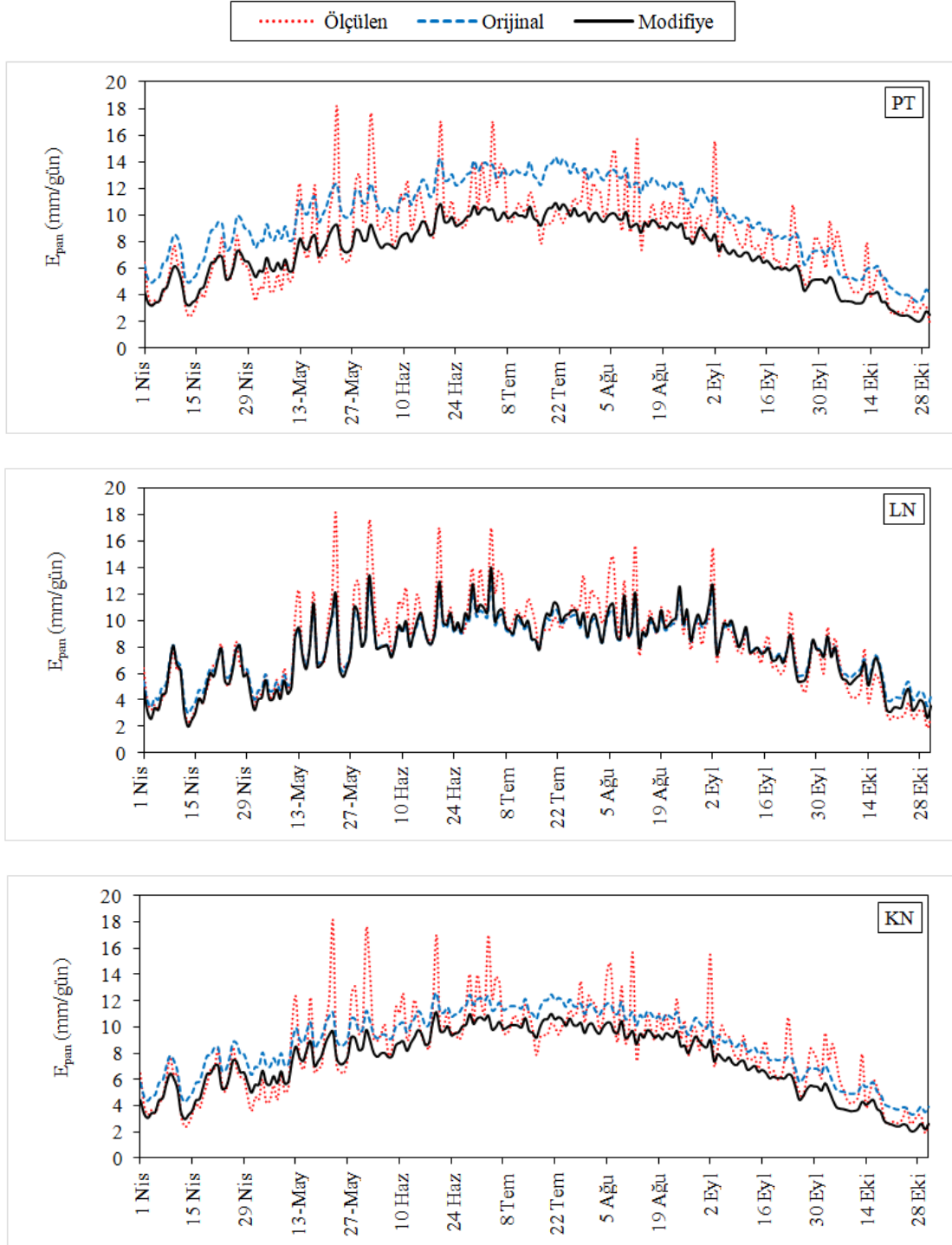
sırasıyla 6.89 mm/gün, 6.90 mm/gün ve 6.63 mm/gün olarak elde edilmiştir. Meteoroloji yer gözlem istasyonu tarafından ölçülen E_{pan} değerleri ile en yüksek ve en düşük istatistikî ilişki düzeyine sahip değerler sırasıyla LN ($R^2= 0.82$) ve PT ($R^2= 0.70$) modelleri ile tahmin edilmiştir. KN modeli için R^2 katsayısı 0.74 olarak belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Ölçülen ve tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri (2021).

İkinci yıl PT, KN ve LN modellerinin orijinal eşitlikleri ile sırasıyla 3.45 – 14.39 mm/gün, 3.32 – 12.58 mm/gün ve 2.99 – 13.16 mm/gün arasında değişen günlük E_{pan} değerleri tahmin edilmiştir. Dönemlik ortalama değerler 9.87 mm/gün, 8.74 mm/gün ve 7.97 mm/gün olarak gerçekleşmiştir. Modifiye eşitlikler ile tahmin edilen E_{pan} değerleri ise sırasıyla 1.96 – 10.92 mm/gün,

2.04 – 11.07 mm/gün ve 2.00 – 14.03 mm/gün arasında değerler almıştır. Dönemlik ortalama değerler 7.22 mm/gün, 7.32 mm/gün ve 7.89 mm/gün olarak belirlenmiştir. Ölçülen E_{pan} değerleri ile en yüksek ve en düşük istatistikî ilişki düzeyine sahip değerler sırasıyla LN ($R^2= 0.89$) ve PT ($R^2= 0.71$) modelleri ile tahmin edilmiştir. KN modeli için R^2 katsayısı 0.75 olarak belirlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Ölçülen ve tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri (2022).

Birinci ve ikinci yıl PT, KN ve LN modellerinin orijinal ve modifiye eşitlikleri kullanılarak tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri ile ölçülen gerçek E_{pan} değerleri arasındaki sapmanın bir göstergesi olarak hesaplanan MAE ve MAPE hatalarının Nisan – Ekim dönemi ortalamaları Çizelge 3’de verilmiştir. Hem orijinal ve hem de modifiye eşitlikler uzun yıllar ortalama iklim verileri ile yapılan

testlerde olduğu gibi tahmin performanslarına göre iyiden kötüye doğru LN, KN ve PT şeklinde sıralanmıştır. Her iki yılda da en iyi tahmin performansına sahip olan LN modelinin orijinal eşitliği ile tahmin edilen günlük E_{pan} değerlerinin Nisan – Ekim dönemi ortalama MAE hataları birinci yıl 0.93 mm/gün ve ikinci yıl 1.03 mm/gün olarak belirlenmiştir. Aynı modelin modifiye eşitliği için elde edilen hatalar ise birinci yıl 0.93 mm/gün ve ikinci yıl 0.89 mm/gün olarak gerçekleşmiştir. LN modeli orijinal eşitliği ile birinci yıl %86.05 (MAPE= %13.95) ve ikinci yıl %86.17 (MAPE= %13.83) doğruluk oranına sahip E_{pan} değerleri tahmin edilmiştir. Modifiye eşitliği ile yapılan tahminlerde ise doğruluk oranı birinci yıl %86.68 (MAPE= %13.32) ve ikinci yıl %89.26 (MAPE= %10.74) düzeyine yükselmiştir. Bu modelin orijinal ve modifiye eşitlikleri ile tahmin edilen günlük E_{pan} değerlerinin her iki yılda da “iyi” (MAPE= %10 – 20) düzeyde doğruluğa sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 3. Modeller ile tahmin edilen E_{pan} değerlerinin hata miktarları (2021 – 2022)

2021	MAE (mm/gün)		MAPE (%)		Doğruluk düzeyi	
	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye
PT	2.58	1.15	42.45	16.98	Kabul edilebilir	İyi
KN	1.62	1.05	27.10	15.02	Kabul edilebilir	İyi
LN	0.93	0.93	13.95	13.32	İyi	İyi
2022	MAE (mm/gün)		MAPE (%)		Doğruluk düzeyi	
	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye	Orijinal	Modifiye
PT	2.07	1.42	30.18	16.17	Kabul edilebilir	İyi
KN	1.38	1.30	19.57	14.55	İyi	İyi
LN	1.03	0.89	13.83	10.74	İyi	İyi

LN modeline en yakın performansı gösteren KN modelinin orijinal eşitliği ile 2021 ve 2022 yıllarının Nisan – Ekim dönemleri için tahmin edilen günlük E_{pan} değerlerinin doğruluk oranları sırasıyla %72.90 (MAPE= %27.10) ve %80.43 (MAPE= %19.57) olarak belirlenmiştir. Aynı modelin modifiye eşitliği ile doğruluk oranı birinci yıl %84.98 (MAPE= %15.02) ve ikinci yıl %85.45 (MAPE= %14.55) düzeyine ulaşan günlük E_{pan} değerleri tahmin edilmiştir. Bu modelin orijinal ve modifiye eşitlikleri ile tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri genel olarak “iyi” (MAPE= %10 – 20) düzeyde doğruluğa sahip olmuşlardır. Ele alınan üç model arasında en kötü performansla sahip olan PT modelinin orijinal ve modifiye eşitlikleri ile elde edilen günlük E_{pan} değerlerinin doğruluk oranları sırasıyla birinci yıl %57.55 (MAPE= %42.45) ve %83.02 (MAPE= %16.98), ikinci yıl ise %69.82 (MAPE= %30.18) ve %83.83 (MAPE= %16.17) olarak belirlenmiştir. Bu modelin orijinal eşitliği ile “kabul edilebilir” (MAPE= %20 – 50) düzeyde doğruluğa sahip günlük E_{pan} değerleri tahmin edilirken, modifiye eşitliği ile “iyi” (MAPE= %10 – 20) düzeyde doğruluğa sahip E_{pan} değerleri tahmin edilmiştir. Her ne kadar modifiye eşitlikler birbirlerine yakın performanslar göstermiş olsalar da LN modelinin sadece hava sıcaklığı verilerine ihtiyaç duyması kullanılabilirliğini ve tercih edilebilirliğini artırmaktadır. PT ve KN modellerinin ise hava sıcaklığı ile birlikte rüzgâr hızı, solar radyasyon ve oransal nem verilerine ihtiyaç duymaları kullanılabilirliklerini kısıtlamaktadır.

Genel olarak LN modeli orijinal ve modifiye eşitlikleri ile tahmin edilen E_{pan} değerlerinin A sınıfı buharlaşma kabından ölçülen gerçek E_{pan} değerlerinden daha düşük, PT ve KN modelleri ile tahmin edilen E_{pan} değerlerinin ise daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Anyadike (1987) yarı kurak – kurak Libya, Cabrera ve ark. (2016) ile Althoff ve ark. (2019) ise tropikal iklim özelliklerinin etkili olduğu Brezilya koşullarında doğruluk oranı en yüksek günlük E_{pan} değerlerinin LN modeli ile tahmin edildiğini ve bu modelin buharlaşmayı olması gerekenden daha düşük tahmin ettiğini ifade etmişlerdir. Irmak & Haman (2003), ampirik E_{pan} tahmin modelleri için kabul edilebilir RMSE hata sınırını 0.50 mm/gün olarak önermişlerdir. Van ili koşullarında en yüksek doğruluk oranına sahip günlük E_{pan} değerlerinin tahmin edildiği LN modeli modifiye eşitliği için elde edilen RMSE değeri (0.79 mm/gün) bu sınırın biraz üstünde olmasına rağmen, KN (RMSE= 0.82 mm/gün) ve PT (RMSE= 0.98 mm/gün) modellerine göre daha düşük seviyede kalmıştır. Al-Mukhtar (2021), Üçler & Kutlu (2021), Kumar ve ark. (2022), Adnan ve ark. (2023) hava sıcaklığı, oransal nem, rüzgâr hızı, solar radyasyon, doymuş ve gerçek buhar basınçları ile topraktaki ısı akısına dayalı olarak geliştirdikleri E_{pan} tahmin modelleri arasında en yüksek doğruluğa sahip E_{pan} değerlerinin en fazla

bağımsız değişken kullanılan modeller ile tahmin edildiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmaların aksine, sadece hava sıcaklığı verilerine ihtiyaç duyan LN modeli orijinal ve modifiye eşitlikleri ile Van ili mikroklima alanı iklim ve çevre koşullarında en yüksek doğruluğa sahip günlük E_{pan} değerleri tahmin edilmiştir. Bu modelin yöre koşullarındaki sulama faaliyetleri kapsamında hazırlanacak sulama programları ile kuraklık eylem planı çalışmalarında faydalı olacağı düşünülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, öncelikle PT, KN ve LN buharlaşma tahmin modellerine ait orijinal eşitliklerin Van ili mikroklima alanı koşullarında gerçekleştirilen günlük E_{pan} tahminlerindeki kullanılabilirlik düzeyleri belirlenmiştir. Daha sonra, bu eşitlikler Microsoft Excel programı çözücü eklentisi kullanılarak yöre koşulları ile uyumlu olacak şekilde modifiye edilmiştir.

KN, PT ve LN modellerinin kalibrasyonlarının yapılarak modifiye eşitliklerinin oluşturulması amacıyla, 2012 – 2020 yılları arasında ölçülen günlük T, RH, U_2 , R_s ve E_{pan} verilerinin dokuz yıllık ortalama değerleri kullanılmıştır. Bu modellerin orijinal ve modifiye eşitlikleri hem uzun yıllar ortalama veriler ve hem de 2021 ve 2022 yılı güncel iklim verileri ile test edilmiştir.

Uzun yıllar ortalama veriler (2012 – 2020) kullanılarak PT, KN ve LN modellerinin orijinal eşitlikleri ile sırasıyla %57.52, %74.29 ve %87.24 doğruluk oranlarına sahip günlük E_{pan} değerleri tahmin edilmiştir. Aynı modellerin modifiye eşitlikleri ile tahmin edilen günlük E_{pan} değerlerinin doğruluk oranları ise sırasıyla %87.77, %88.97 ve %90.40 olarak belirlenmiştir.

PT, KN ve LN modellerinin orijinal eşitlikleri kullanılarak 2021 ve 2022 yılı güncel verileri ile yapılan testlerde sırasıyla birinci yıl %57.55, %72.90, %86.05 ve ikinci yıl %69.82, %80.43, %86.17 doğruluk oranlarına sahip günlük E_{pan} değerleri elde edilmiştir. Aynı modellerin modifiye eşitlikleri ile tahmin edilen E_{pan} değerlerinin doğruluk oranları ise sırasıyla birinci yıl %83.02, %84.98, %86.68 ve ikinci yıl %83.82, %85.45, %89.26 olarak belirlenmiştir.

PT, KN ve LN modellerinin orijinal ve modifiye eşitlikleri tahmin performanslarına göre iyiden kötüye doğru LN, KN ve PT şeklinde sıralanmıştır. Modifiye eşitliklerin orijinal eşitliklere göre çok daha yüksek tahmin performanslarına sahip olduğu görülmüştür.

LN modeli orijinal ve modifiye eşitlikleri kullanılarak tahmin edilen günlük E_{pan} değerleri ile A sınıfı buharlaşma kabından ölçülen günlük gerçek E_{pan} değerlerinin oluşturduğu veri gruplarının ortalamaları arasındaki farklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($P > 0.05$, $n = 214$). Van ili mikroklima alanı iklim ve çevre koşullarında LN modeli orijinal ve modifiye eşitlikleri ile tahmin edilen E_{pan} değerlerinin ölçülen gerçek E_{pan} değerleri yerine kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Teşekkür

Çalışmanın istatistiksel analizlerindeki katkılarından dolayı Doç. Dr. Yıldırım DEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Kaynakça

- Abdulkareem, J. H., Abdulkadir, A., & Abdu, N. (2015). A review of different types of lysimeter used in solute transport studies. *International Journal of Plant & Soil Science*, 8(3), 1-14. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2015/18098>
- Abudu, S., Cui, C., King, J. P., Moreno, J., & Bawazir, A. S. (2011). Modeling of daily pan evaporation using partial least squares regression. *Science China Technological Sciences*, 54(1), 163-174. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-4205-z>
- Adnan, R. M., Mostafa, R. R., Dai, H. L., Heddami, S., Kuriqi, A., & Kisi, O. (2023). Pan evaporation estimation by relevance vector machine tuned with new metaheuristic algorithms using limited climatic data. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 17(1), 1-27. <https://doi.org/10.1080/19942060.2023.2192258>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No: 56. Erişim tarihi: 06.04.2021. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>

- Al-Mukhtar, M. (2021). Modeling of pan evaporation based on the development of machine learning methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 146, 961-979. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03760-4>
- Alsumaiei, A. A. (2020). Utility of artificial neural networks in modeling pan evaporation in hyper-arid climates. *Water*, 12, 1508. <https://doi.org/10.3390/w12051508>
- Althoff, D., Rodrigues, L. N., & da Silva, D. D. (2019). Evaluating evaporation methods for estimating small reservoir water surface evaporation in the Brazilian Savannah. *Water*, 11(9), 1942. <https://doi.org/10.3390/w11091942>
- Anyadike, R. N. C. (1987). The linacre evaporation formula tested and compared to others in various climates over West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39(2-3), 111-119. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(87\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0168-1923(87)90030-X)
- Arslan, F., & Ergül, M. (2014). Çayören barajı sulama havzası ve çevresinde tarımsal faaliyetler. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 2(1), 171-190. <http://doi.org/10.16992/ASOS.63>
- Aydın, Y. (2019). Yarı kurak iklim koşullarında A sınıfı Kap'tan olan buharlaşmanın Penman ve Kohler-Nordenson-Fox (KNF) modelleri ile tahmini. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 6(3), 319-327. <https://doi.org/10.19159/tutad.617167>
- Benzaghta, M. A., Mohammed, T. A., Ghazali, A. H., & Som, M. A. M. (2012). Prediction of evaporation in tropical climate using artificial neural network and climate based models. *Scientific Research and Essays*, 7(36), 3133-3148. <https://doi.org/10.5897/SRE11.1311>
- Cabrera, M. C. M., Anache, J. A. A., Youlton, C., & Wendland, E. (2016). Performance of evaporation estimation methods compared with standard 20 m² tank. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(10), 874-879. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n10p874-879>
- Christiansen, J. E. (1968). Pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 94(2), 243-266. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000568>
- Cobaner, M., Çıtakoğlu, H., Haktanır, T., & Yelkara F. (2015). Akdeniz bölgesi için en uygun Hargreaves-samani eşitliğinin belirlenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 7(2), 181-189.
- De Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., & Rossi, F. (2016). Mean absolute percentage error for regression models. *Neurocomputing*, 192(1), 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.114>
- DMİ. (2023). *Van ili iklim verileri*. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Erişim Tarihi: 08.05.2024. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf
- Irmak, S., & Haman, D. Z. (2003). Evaluation of five methods for estimating class A pan evaporation in a humid climate. *HortTechnology*, 13(3), 500-508. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.13.3.0500>
- Jing, W., Yaseen, Z. M., Shahid, S., Saggi, M. K., Tao, H., Kisi, O., ... & Chau, K. W. (2019). Implementation of evolutionary computing models for reference evapotranspiration modeling: short review, assessment and possible future research directions. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), 811-823. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1645045>
- Kaya, S., Evren, S., & Daşcı, E. (2016). Yarı-kurak iklim koşullarında A sınıfı kap buharlaşmasını tahmin için çeşitli eşitliklerin karşılaştırılması. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 30(2), 1-9.
- Kohler, M. A., Nordenson, T. J., & Fox, W. E. (1955). *Evaporation from pans and lakes*. U.S. Department of Commerce Research Paper No. 38. Erişim Tarihi: 06.04.2021. https://library.oarcloud.noaa.gov/noaa_documents.lib/NOAA_historic_documents/WB/Research_papers/WB_Research_Paper_38.pdf
- Kumar, G. M., Babu, B. M., Dashavant, P. B., & Reddy, G. V. (2022). Pan Evaporation Estimation Using Artificial Neural Network (ANN) and Fuzzy Logic Models for Raichur Region, Karnataka: A Case Study. *International Journal of Environment and Climate Change*, 12(11), 3725-3735.. <https://doi.org/10.9734/ijec/2022/v12i111423>

- Linacre, E. T. (1977). A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, 18(6), 409-424. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(77\)90007-3](https://doi.org/10.1016/0002-1571(77)90007-3)
- Maiseli, B. J. (2019). Optimum design of chamfer masks using symmetric mean absolute percentage error. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 74, 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13640-019-0475-y>
- Nakagawa, S., Johnson, P. C., & Schielzeth, H. (2017). The coefficient of determination R^2 and intra-class correlation coefficient from generalized linear mixed-effects models revisited and expanded. *Journal of the Royal Society Interface*, 14(134), 1-11. <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0213>
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of The Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193(1032), 120-145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2)
- Sezer, Ç. Ö., & Öztekin, T. (2016). A-sınıfı buharlaşma kabından olan günlük buharlaşmanın Penman ve Linacre modelleri ile tahmini. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 33(3), 137- 147. <https://doi.org/10.13002/jafag.1055>
- Sezer, Ç. Ö., Öztekin, T., & Kutlu Sezer, E. (2018). A-sınıfı buharlaşma kabından olan buharlaşma miktarının Penman ve Priestley Taylor (PT) modelleri ile tahmini. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 55 (4), 379-388. <http://doi.org/10.20289/zfdergi.414100>
- Şarlak, N., & Bağçacı, S. Ç. (2020). Ampirik potansiyel evapotranspirasyon tahmin yöntemlerinin değerlendirilmesi: uygulama Konya kapalı havzası. *Teknik Dergi*, 31(1), 9755-9772. <https://doi.org/10.18400/tekderg.408019>
- Terzi, Ö. (2011, June). *Modeling of daily pan evaporation of Lake Eğirdir using data-driven techniques*. International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, İstanbul, Türkiye.
- Uzunlar, A., Öz, A., & Diş, M. Ö. (2022). Modifiye yaklaşımların evapotranspirasyon tahminlerine etkisi: Van örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 973-988. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1230919>
- Üçler, N., & Kutlu, F. (2021). Estimating daily pan evaporation data using adaptive neuro fuzzy inference system: case study within Van local station-Turkey. *Politeknik Dergisi*, 24(1), 195-204. <https://doi.org/10.2339/politeknik.635466>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Hakkari ve Civarının (Güneydoğu Anadolu, Türkiye) Güncel Deprem Potansiyeli: Bölge-Zaman-Magnitüd Analizleri

Serkan ÖZTÜRK¹, Hamdi ALKAN^{*2}

¹Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye
Serkan ÖZTÜRK, ORCID No: 0000-0003-1322-5164, Hamdi ALKAN, ORCID No: 0000-0003-3912-7503

*Sorumlu yazar e-posta: hamdialkan@yyu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 07.02.2024
Kabul: 31.07.2024
Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1433478

Anahtar Kelimeler

b-değeri,
Deprem olasılığı,
Gerilme,
Hakkari,
Tekrarlama periyodu,
Z-değeri

Öz: Hakkari (Türkiye), deprensellik ve tektonizma olarak Güneydoğu Anadolu Bölgesinin en aktif illerinden bir tanesidir. Aletsel ve tarihsel dönemde, Hakkari ili ve civarında bulunan bu fay ve fay zonları birçok yıkıcı/hasar verici deprem üretmiştir. Son yıllarda Aralık 2023 (Mw=4.7) ve Şubat 2024'de (Mw=4.3) meydana gelen depremler, bu bölgedeki güncel deprenselliğin önemli göstergelerindedir. Analizlerden elde edilen bulgulara göre, bölgede ortalama *b*-değeri 0.88 ± 0.09 olup en düşük *b*-değerleri Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu civarında gözlenmiştir. Buna ek olarak, pozitif Coulomb gerilme değişimleri Hakkari ili ve civarında KB-GD ve KD-GB yönlü olarak ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan, seçilen bölge için Mw=5.0 büyüklüğündeki bir depremin tekraralama zamanı ~16 yıldır. Ayrıca, Mw=5.0 büyüklüğündeki bir depremin 10, 16 ve 20 yılda oluşma olasılıkları ise sırasıyla ~%45, ~%62 ve ~%69 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada hesaplanan sismotektonik parametrelerin birlikte değerlendirilmesi ile Hakkari ili ve civarının güncel sismik tehlike potansiyeli ortaya çıkarılmıştır.

Current Earthquake Potential of Hakkari and its Surroundings, Southeast Anatolia, Türkiye: Region-Time-Magnitude Analyses

Article Info

Received: 07.02.2024
Accepted: 31.07.2024
Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1433478

Keywords

b-value,
Earthquake probability,
Hakkari,
Return period,
Stress,
Z-value

Abstract: Hakkari, Türkiye, is one of the most active provinces of the Southeast Anatolian Region in terms of seismicity and tectonism. During the instrumental and historical period, these fault systems in the Hakkari region have produced many destructive/damaging earthquakes. The earthquakes that occurred in December 2023 (Mw=4.7) and February 2024 (Mw=4.3) in recent years are important indicators of current seismicity in this region. According to the results obtained from the analyses, the average *b*-value in the study region is 0.88 ± 0.09 and the lowest *b*-values are observed around the Yüksekova-Şemdinli Fault Zone. In addition, positive Coulomb stress changes have been observed in and around Hakkari in NW-SE and NE-SW directions. On the other hand, the return period of an earthquake with a magnitude of Mw=5.0 for the selected region is ~16 years. Also, the occurrence probabilities of an earthquake with a magnitude of Mw=5.0 in 10, 16 and 20 years is calculated as ~45%, 62% and ~69%, respectively. In conclusion, the current seismic hazard potential of Hakkari province and its surroundings has been revealed with the combination of sismotectonic parameters calculated in this study.

1. Giriş

Deprem oluşumlarının bölge-zaman-magnitüd karakteristiklerini tanımlayabilmek için hem Türkiye hem de dünyanın farklı bölgelerini içerisine alan, istatistiksel ve fiziksel modellerle birlikte farklı yöntemlerin kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. Sismotektonik olarak aktif olan bölgelerde deprem oluşumlarının niceliksel olarak değerlendirilebilmesi ve birincil faydalı bilgilerin sağlanabilmesi için genellikle deprem istatistiğinin temeli olan b -değeri, standart normal sapma Z -değeri (sismik durgunluk), M_c -değeri (tamlik magnitüdü, kesme magnitüdü veya süreklilik magnitüdü) analizleri, depremlerin tekrarlama periyodu, oluşma olasılıkları ve gerilme değişimleri gibi temel ve en sık kullanılan ölçeklendirme parametreleri tercih edilir ve bu parametrelerin detaylı analizleri ile depremlerin davranış modelleri hakkında oldukça önemli bulgulara ulaşılmıştır (Hirata, 1989; Frohlich & Davis, 1993; Wiemer & Wyss, 2000; Wu & Chiao, 2006; Katsumata, 2011; Öztürk, 2018; 2020; Coban & Sayıl, 2019; Nanjo, 2020; Yaghmaei-Sabegh & Ostadi-Asl, 2021; Sinaga ve ark., 2022; Alkan ve ark., 2023; Öztürk & Alkan, 2023a). Bu çalışma kapsamında istatistiksel ve sismotektonik analizler için düşünülen değerlendirme parametreleri ise: (i) tamlik magnitüdü (M_c -değeri) analizi ve depremlerin magnitüd-frekans içeriğini tanımlayan b -değeri, (ii) farklı magnitüd değerlerindeki depremlerin tekrarlama periyodları ve oluşma olasılıkları, (iii) depremlerin oluşumundan önce aktivite oranındaki azalmayı ifade eden Z -değeri ve (iv) Coulomb gerilme değişimleri olarak verilebilir.

Depremlerin magnitüdü ve meydana gelme sıklığı magnitüd-frekans ilişkisi ile tanımlanır (Gutenberg & Richter, 1944) ve Gutenberg-Richter (G-R) ilişkisinin b -değeri ile verilir. Bu dağılım istatistiksel sismolojide ve deprem tehlike çalışmalarında en sık kullanılan ilişkidir çünkü güçlü/ yıkıcı depremlerin tekrarlama periyodlarının ve oluşma olasılıklarının tahmini için gereklidir. b -değerinin bölgesel ve zamana bağlı değişimleri, sismotektonik ortamların özellikleri, gerilmenin bölge-zaman-derinlik değişimleri ile küçük ve büyük depremlerin rölatif oranlarını tanımlayabilmek için kullanılabilir (Scholz, 1968). Genel bir ifadeyle, sismotektonik olarak aktif bir bölge için b -değerinde bir azalma eğilimi varsa o bölgede deprem olma ihtimalinin olduğu şeklinde yorumlanabilir. Deprem oluşumlarının bölge-zaman-magnitüd davranışlarının tanımlanmasına yönelik diğer önemli bir araç ise sismik aktivitedeki değişimlerinin değerlendirilmesidir çünkü durgunluk periyodu güçlü bir şekilde sismik ve tektonik oluşumlara bağlıdır. Wyss & Martirosyan (1998) sismik durgunluğu, mevcut aktivite oranına kıyasla ortalama deprensellik oranındaki önemli bir azalma olarak tanımlanmıştır. Deprensellik oranındaki bu durgunluk, ana şokun oluşumundan birkaç yıl önce deprem odak bölgesi ve civarında gözlenebilir veya bu azalma nispeten kısa bir zaman dilimi ile deprensellikteki artma eğilimine bağlı olarak ayırt edilebilir (Wyss & Haberman, 1988). b -değeri ve Z -değerine ek olarak, Coulomb gerilme analizleri bir bölgede önceki depremlerin yüklediği gerilimin artım miktarını gözleyebilmek açısından oldukça önemlidir. Gerilme, büyük depremlerden önce yüklenme döngüsü boyunca artabilir veya hızla azalabilir. Bu nedenle deprem kaynaklı kabuk deformasyonu, deprem bölgesi ve çevresinde gerilme değişimlerine neden olur. Deprem fiziği açısından bakıldığında bir sonraki büyük depremin olası konumu, önceki depremlerin yüklediği gerilmenin durumuna ve mevcut sismotektonik koşullara bağlıdır. Bu nedenle gerilme değişimleri, deprem etkileşimleri açısından önemlidir ve ön deprem tahminleri için kullanılabilir. Son yıllarda yapılan çalışmalar depremlerin kabukta gerilme birikimine neden olduğunu ve bu sürecin civar faylardaki depremleri tetikleyebileceğini göstermektedir (King ve ark., 1994; Toda ve ark., 2011; Ahadov & Jin, 2019; Nanjo, 2020; Alkan ve ark., 2023).

Türkiye, sismik ve tektonik olarak dünyanın en aktif bölgelerinden biridir. Bu nedenle, son yıllarda, Türkiye'nin farklı sismotektonik bölgelerindeki deprem tehlikesini/potansiyelini ortaya koyabilmek için deprem davranışlarının tanımlanması amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Özellikle, Türkiye'nin doğu ve güney doğu Anadolu bölgeleri orta ve uzun vadede büyük depremlerin oluşumu açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Çalışma alanındaki Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu (YŞFZ) Türkiye'deki önemli sismik boşluklardan biridir ve bölgedeki sismotektonik yapı, YŞFZ ve civarında bir depremin etkisini artırabilecektir. Dolayısıyla bu çalışmanın temel amacı, 2024 yılı başlangıcında Güneydoğu Anadolu Bindirme Zonu (GABZ) ve YŞFZ civarındaki deprenselliğin bölge-zaman-magnitüd analizlerinin gerçekleştirilmesi ile deprem tahmini ve tehlikesinin değerlendirilebilmesi için farklı bir bakış açısı sunmaktır. İstatistiksel analizler için ZMAP, Coulomb 3.4 ve Generic Mapping Tools, GMT yazılımları kullanılmıştır (Wiemer, 2001; Toda ve ark., 2011; Wessel ve ark., 2019). Elde edilecek bulgular sadece deprem davranışlarının tanımlanması açısından önemli olmayacak, aynı zamanda çalışma alanındaki deprem oluşumlarının anlaşılmasına da katkı sağlayacaktır. Dolayısıyla, bu

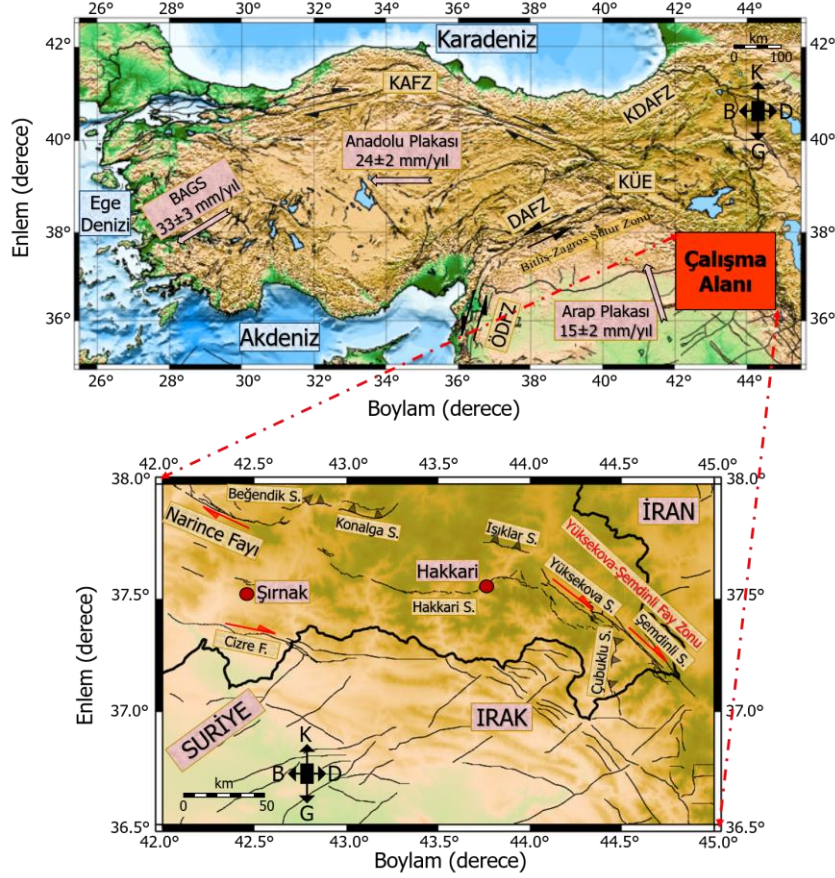
parametreler Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesinde ve yakın civarında yaşanabilecek bir sonraki deprem oluşumunun gerçek zamanlı olarak araştırılmasına yönelik değerli bulguları da sağlayabilecektir.

2. Hakkari ve Civarının Sismotektonik Yapısı ve Analiz Verileri

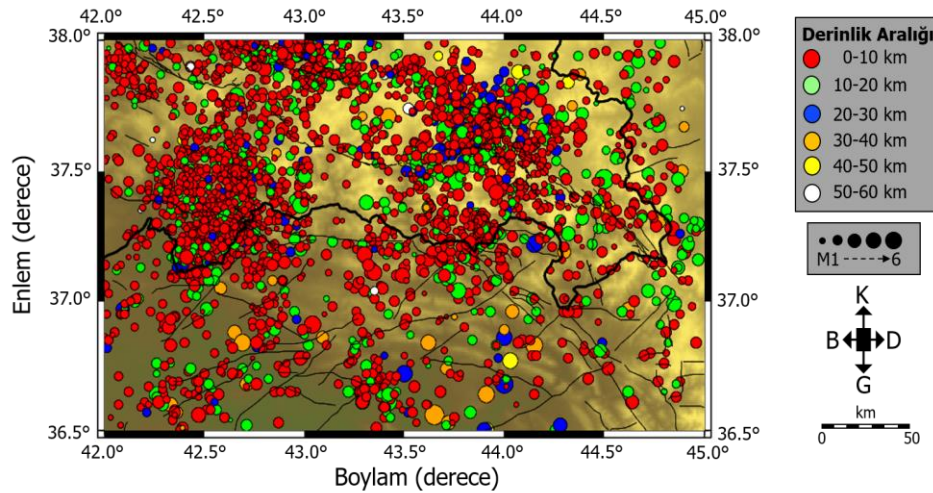
Anadolu Plakası (Türkiye) Alp-Himalaya orojenik kuşağının Doğu Akdeniz kısmındadır ve ~12 My öncesinden (Serravalien) günümüze kadar Avrasya Plakası, Afrika Plakası ve Arap Plakasının göreceli tektonik hareketlerine maruz kalmıştır (Irmak ve ark., 2012; Emre ve ark., 2018). Bu ana tektonik yapılara göre, Arap Plakası Bitlis-Zagros Bindirme Zonu (BZBZ) boyunca kuzey yönünde (~18 mm/yıl) Avrasya Plakasına doğru (~5 mm/yıl) hareket etmektedir (Reilinger ve ark., 2006). Arap ve Avrasya Plakaları arasındaki bu çarpışma tektoniği, Anadolu Plakasının saat yönünün tersine dönmesine ve batıya doğru hareketine (~24 mm/yıl) yol açmaktadır (Şengör & Yılmaz, 1981; Bozkurt, 2001; Reilinger ve ark., 2006). Batıya doğru olan bu hareket Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ve Batı Anadolu Graben Sistemi (BAGS) olarak adlandırılan üç ana tektonik birimi (Şekil 1) oluşturmaktadır. Diğer yandan, Afrika Plakası daha yavaş bir hızla Arap Plakasından kuzeye doğru hareket etmekte ve Ölü Deniz Fay Zonu (ÖDFZ) bu plakalar arasındaki farklı hareketi oluşturmaktadır (Türkoğlu ve ark., 2015). Batı Anadolu Bölgesindeki genişleme deformasyonu, Anadolu Plakasının batıya doğru hareketi ve dahan Afrika Plakasının ile tektonik deformasyonu şekillendiren Orta Anadolu Bölgesinin aşağı yöndeki hareketiyle gelişmektedir (Delph ve ark., 2015; Alkan, 2022).

Doğu Anadolu Bölgesi (DAB) hem aletsel ve tarihsel dönemde sismotektonik açıdan en aktif bölgelerden biridir. Bu aktif depremsellik, kuzey-güney yönlü tektonik rejim, doğrultu atımlı faylar, bindirme fayları ve normal faylardan kaynaklı güncel deformasyonlardan kaynaklanır (Şengör & Yılmaz, 1981; Emre ve ark., 2018). Çalışma alanı, DAB'nin güneydoğusunda yer almakta olup GABZ ve YŞFZ gibi önemli iki tektonik yapıdan oluşmaktadır. Yüksekova-Şemdinli, genel olarak kalın alüvyon ve konsolide olmamış kil, çimentolu çakıl, kum ve silt gibi jeolojik birimlerin yer aldığı suya dolgun yapılar üzerinde yerleşmiştir (Akkaya ve ark., 2013; Akkaya, 2015). Bu jeolojik yapılar ve yeraltı su seviyesi, YŞFZ ve civarında meydana gelebilecek depremi önemli ölçüde tetikleyebilir ve deprem riskini artırabilir. YŞFZ'nin özelliği sağ yanal doğrultu atımlı mekanizmaya sahip olması ve 2 segmentten oluşmasıdır. Buna karşın, GABZ düşük açılı bindirme fayları ile karakterize edilir ve 12 segmentten oluşur (Emre ve ark., 2018). 1503 Hakkari (IX şiddetinde), 1884 Pervari-Siirt (VIII şiddetinde), 19 Nisan 1947 Ortaköy (moment magnitüdü $M_w=5.6$), 3 Aralık 1984 Konalga ($M_w=5.7$), 26 Şubat 2000 Şemdinli ($M_w=5.2$), 25 Ocak 2005 Hakkari-Sütlüce ($M_w=5.9$), 27 Ekim 2011 Hakkari (lokal magnitüd $M_L=5.6$), 5 Ağustos 2012 Şırnak ($M_L=5.3$) gibi aletsel ve tarihsel dönemde meydana gelmiş birçok güçlü/yıkıcı depremin kaynağı bu tektonik yapılarıdır (AFAD-Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, deprem kataloğu: AFAD (2024); USGS-United States of Geological Service, deprem kataloğu: USGS (2024)). Ayrıca, yakın zamanda meydana gelmiş olan 31 Aralık 2023 Yazılı-Yüksekova ($M_w=4.7$) depremi bu bölgedeki sismotektonik aktivitenin ve son deprem oluşumlarının detaylı olarak analiz edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Bu çalışma kapsamında, deprem potansiyelinin bölge-zaman-magnitüd analizini yapabilmek için 1905-2018 yılları arasında M_w magnitüdüne göre homojen olan deprem verisi Tan (2021)'den alınmıştır. Bu veriye ek olarak 2018-2024 yılları arasında M_L magnitüdüne sahip deprem kataloğu Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nden (KRDAE) derlenmiştir. 2018-2024 yılları arasında M_w magnitüdüne göre homojen bir katalog oluşturabilmek amacıyla Tan (2021) tarafından M_w-M_L dönüşümleri için önerilen ampirik ilişki ($M_w=1.017*M_L-0.012$) kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra, çalışma alanındaki veriler seçilmiş ve 26 Ekim 1958-31 Aralık 2023 tarihleri arasında magnitüdü $1.0 \leq M_w \leq 6.0$ aralığında değişen yaklaşık 65.18 yıllık süreçte 3257 sığ (derinliği 70 km'den düşük) depremi içeren bir deprem kataloğu oluşturulmuştur. Çalışma bölgesi için aletsel dönemdeki deprem verisi Şekil 2'de gösterilmiştir. Ayrıca, Coulomb gerilme değişimleri, gelecek deprem tehlikesi için modellenmiş ve yorumlanmıştır. Bu amaçla, $M \geq 4.0$ olan 23 deprem kullanılmış ve bu depremlere bilgiler ve ait odak mekanizması çözümleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. (Üst) Türkiye ve civarındaki tektonik yapılar (Emre ve ark., 2018 'ten değiştirilerek alınmıştır). Büyük oklar plaka hareket yönlerini göstermektedir (Reilinger ve ark. (2006)'dan alınmıştır). Çalışma alanı kırmızı dikdörtgen alan içerisinde gösterilmiştir. Kısaltmalar: BAGS: Batı Anadolu Graben Sistemi; KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu; DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu; KDAFZ: Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu; ÖDFZ: Ölü Deniz Fay Zonu; KÜE: Karlıova Üçlü Eklemi. (Alt) Çalışma alanındaki aktif tektonik (Emre ve ark. (2018)'den değiştirilerek alınmıştır). Şehir konumları bordo dairelerle verilmiştir.



Şekil 2. Çalışma bölgesinde 26 Ekim 1958-31 Aralık 2023 yılları arasında $M_w \geq 1.0$ olan 3257 sığ depremin episantr dağılım haritası (Tan, 2021)' den ve KRDAE web sayfasından temin edilmiştir (KOERI, 2024). Depremlerin magnitüd ve derinlik dağılımları farklı sembollerle gösterilmiştir.

Çizelge 1. Coulomb gerilme değişimlerini hesaplamak için kullanılan depremlerin odak mekanizması çözümleri (Depremlere ait odak mekanizması çözümleri USGS (<https://www.usgs.gov/>), G-CMT (<https://www.globalcmt.org/>), KRDAE (<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/>) ve AFAD (<https://tdvms.afad.gov.tr/>) web sitelerinden alınmıştır) (D/E/K: Doğrultu/Eğim/Atım)

No	Tarih (UTC)	Derinlik (km)	Magnitüd	Enlem (°K)	Boylam (°D)	D/E/A (°)	Yer
1	25/01/2005 16:44:16	13.2	M _w =5.9	37.622	43.703	301°/78°/-169°	Hakkari (Merkez)
2	29/05/2011 11:02:29	11.2	M _L =4.6	37.216	42.560	58°/78°/4°	Şırnak (Silopi)
3	27/10/2011 08:04:22	20.0	M _w =5.1	37.256	43.860	310°/75°/-174°	Hakkari (Çukurca)
4	02/11/2011 11:43:02	7.78	M _L =4.8	37.253	43.900	156°/80°/-179°	Hakkari (Çukurca)
5	02/11/2011 18:32:50	7.79	M _L =4.1	37.252	43.891	288°/70°/-143°	Hakkari (Çukurca)
6	06/12/2011 15:46:25	3.19	M _L =4.6	37.263	43.876	312°/83°/-166°	Hakkari (Çukurca)
7	14/06/2012 05:50:01	11.1	M _L =4.0	37.224	42.435	139°/56°/95°	Şırnak (Silopi)
8	14/06/2012 05:52:51	11.6	M _w =5.2	37.157	42.443	318°/30°/121°	Şırnak (Silopi)
9	15/06/2012 23:48:14	8.69	M _L =4.2	37.209	42.458	118°/80°/-168°	Şırnak (Silopi)
10	05/08/2012 20:37:21	12.94	M _L =5.3	37.463	42.979	71°/71°/59°	Şırnak (Uludere)
11	25/02/2013 08:03:44	4.09	M _L =4.1	37.188	44.752	259°/62°/-143°	Hakkari (Şemdinli)
12	11/03/2013 14:57:93	12.0	M _w =5.2	36.560	43.360	277°/41°/90°	Kuzey Irak
13	13/03/2013 06:22:58	4.07	M _L =4.8	36.565	43.342	271°/48°/47°	Hakkari (Çukurca)
14	03/04/2014 13:56:13	12.0	M _w =4.2	37.845	42.972	324°/82°/-166°	Van (Çatak)
15	01/06/2015 14:54:16	12.6	M _w =4.0	37.508	43.882	227°/50°/16°	Hakkari (Merkez)
16	01/09/2015 14:14:04	14.95	M _w =4.2	37.472	42.992	114°/70°/126°	Şırnak (Uludere)
17	12/12/2015 15:48:25	9.96	M _w =4.1	37.882	43.521	303°/76°/166°	Van (Gürpınar)
18	18/04/2017 22:40:54	14.16	M _w =4.0	37.543	42.673	338°/76°/-172°	Şırnak (Merkez)
19	02/12/2017 11:58:04	8.0	M _w =4.4	37.710	44.580	186°/59°/115°	Hakkari (Esendere)
20	22/11/2018 05:50:52	6.97	M _w =4.1	37.259	42.464	325°/29°/130°	Şırnak (Silopi)
21	07/08/2020 19:20:12	10.0	M _w =4.8	37.949	42.660	143°/59°/-111°	Siirt (Beğendik)
22	31/12/2023 16:37:55	10.0	M _w =4.4	37.380	44.000	312°/55°/179°	Hakkari (Yüksekova)
23	31/12/2023 17:06:04	2.52	M _w =4.6	37.340	44.100	134°/85°/-133°	Hakkari (Yüksekova)

3. Materyal ve Yöntem

3.1. *b*-değeri (Gutenberg-Richter ilişkisi), *Mc*-değeri (tamlık magnitüdü), oluşma olasılıkları (*P*(*M*)) ve tekrarlama periyodu (*Q*)

Deprem oluşumlarının magnitüd-deprem sayısı ilişkisi için ampirik bir ölçek yasası [Gutenberg & Richter \(1944\)](#) tarafından tanımlanmıştır. Bu form deprem istatistiğinin temel bağıntısıdır ve aşağıdaki denklemle verilir:

$$\log_{10}N(M) = a - bM \quad (1)$$

Bu denklemde $N(M)$; magnitüdü M 'ye eşit veya ondan büyük olan belirli bir zaman periyodundaki olayların kümülatif sayısıdır. a ve b -değerleri pozitif katsayılardır. b -değeri magnitüd-deprem sayısı ilişkisinin eğiminden hesaplanır. Bununla birlikte, a -değeri deprensellik oranı ile ilişkilidir. Farklı sismik alanlar için a -değerindeki değişimler deprem kataloğunun süresi, çalışma alanının boyutu ve deprem sayısı ile ilişkilidir. Yapılan çalışmalar b -değerinin dünyanın farklı bölgeleri için 0.3-2.0 arasında değişim gösterdiğini ortaya koymuştur ([Utsu, 1971](#)). Ortalama b -değeri ise 1.0 civarındadır ([Frohlich & Davis, 1993](#)). b -değeri, büyük ve küçük depremlerin göreceli dağılımlarıyla ilişkilidir. Bununla birlikte, tektonik özellikler, gerilme heterojeniteleri ve anizotropik yapı gibi birçok faktör b -değerindeki değişimleri etkileyebilir. b -değeri ile gerilme dağılımı arasında negatif bir ilişki vardır. Ayrıca, jeolojik yapılar, fay uzunluğu, çatlak yoğunluğu, ısısal değişimler, malzeme özellikleri, sismik dalga hız değişimleri, sismik soğrulma, yamulma ve eğim değişimleri gibi birçok parametre b -değerindeki değişimleri etkiler ([Mogi, 1962](#); [Schorlemmer ve ark., 2005](#); [Scholz, 2015](#)). Magmatik zonlarda deprem aktivitesi nispeten yüksek b -değeri ile karakterize edilir. Dolayısıyla, küçük ama etkili gerilme değişimleri yüksek gözenek basıncıyla ve jeotermal değişimlerle ilişkili olabilir ([Abdelfattah ve ark., 2020](#)). Sonuç olarak, b -değerinin bir bölgedeki deprem potansiyelini ortaya koymada oldukça önemli bir parametre olduğu düşünülür.

Belirli periyodlarda ve farklı magnitüd değerlerindeki depremler için oluşma olasılıkları G-R ilişkisi dikkat alınarak aşağıdaki denklemle verilir ([Tabban & Gencoğlu, 1975](#)):

$$P(M) = 1 - e^{-N(M)*Tr} \quad (2)$$

Burada $P(M)$; en azından bir depremin belirli Tr periyodlarındaki oluşma olasılığıdır. $N(M)$ ve M değerleri 1. denklemden elde edilir. 2. denklem Poisson dağılımının bir sonucudur. $N(M)$ ayrıca, yıl bazında depremlerin sayısını ifade eder. Bununla birlikte, belirli magnitüd değerlerindeki herhangi bir depremin tekrarlama periyodu ise aşağıdaki denklemle verilir ([Tabban & Gencoğlu, 1975](#)):

$$Q = 1/N(M) \quad (3)$$

Burada Q ; bir depremin tekrarlama periyodudur ve magnitüdü M 'ye eşit ve ondan büyük olan bir deprem için beklenen zaman aralığıdır.

b -değerinin tahmininde ve sismik durgunluğun analizinde güvenilir ve kaliteli istatistiksel sonuçlar için en yüksek veri sayısının kullanımı önemlidir. Dolayısıyla tamlık magnitüdü çok önemli bir parametredir ve bu tür bir tahmin, analizler için ilk aşama olarak gerçekleştirilmelidir. Mc -değeri, tam bir deprem kaydının en düşük magnitüdü olarak tanımlanır ve verinin %90-95'inin bir güç yasası ile temsil edilebildiği magnitüd değeri olarak verilir. Kayıt ağlarının depremden sonraki süreçte hemen kurulamayışı deprem aktivitesinin yüksek olduğu dönemde küçük olayların kayıt edilmesini zorlaştırır ve buna bağlı olarak ta veri setinin ilk dönemlerinde tamlık magnitüdü yüksek olur. Mc -değerinin hesabı, magnitüd-deprem sayısı dağılımına ve Mc -değerinin yaklaşık ilk dizisi olarak bu dağılımın ilk türevinin maksimum değer hesabına dayanır ([Wiemer & Wyss, 2000](#)). Belli sayıda depremi kapsayan her pencere içerisindeki olaylar dikkate alınarak bu deprem dizisi için ortalama bir büyüklük değeri hesaplanır ve her bir pencere için hesaplanan bu değer o pencerenin zaman aralığı için ortalama tamlık magnitüdü olarak kabul edilir. Dolayısıyla, zamanın bir fonksiyonu olarak tamlık magnitüdünün hesabı, hareketli ve üst üste binen pencere yöntemi kullanılarak maksimum olasılık tekniğiyle yapılabilir.

3.2. Ayırıştırma (kümesizleştirme, decluster) işlemi ve standart normal sapma (Z-değeri)

Deprem yığılımları, öncü şoklar, artçı şoklar ve patlatmalar gibi ikincil olayların deprem kataloglarından ayrılması, deprem tehlike analizlerinin ve deprensellik oran değişimlerinin değerlendirilebilmesi için niceliksel deprem istatistiklerinde en temel aşamalardan biridir. Kümelenme yaklaşımında, bir katalog bağımlı ve bağımsız olaylar ayırıştırılır. Bu ayırıştırma işlemi bütün ana olayları her bir gruptan ayırır ve bütün birincil depremler farklı bir olay olarak kaydedilir. Dolayısıyla, deprem tahmin modellerinde tekdüze bir deprem verisi elde edebilmek için kataloglara ayırıştırma işlemi uygulanmalıdır. Bu çalışmada, deprem kataloğunun ayırıştırılabilmesi için, [Reasenberg \(1985\)](#) tarafından tanımlanan ve *ZMAP* yazılımında mevcut olan ayırıştırma algoritması kullanılmıştır.

Sismik durgunluk hipotezi ilk kez [Wyss & Habermann \(1988\)](#) tarafından önerilmiştir. Bu hipoteze göre, sismojenik bir zonun sınırlı bir kısmında deprem aktivitesinde önemli bir azalma olur ve aktivitedeki bu düşüş sismik durgunluk olarak tanımlanır ([Wiemer & Wyss, 1994](#)). Deprem aktivitesindeki değişimleri tanımlayan ve karakterize eden farklı modeller mevcuttur. Bu modellerin çoğu ana olaylardan önceki durgunluğun bölge-zaman değişimlerini kullanır. *ZMAP* yazılımında kullanılan yöntem [Wiemer & Wyss \(1994\)](#) tarafından önerilmiştir ve bu tür uygulamalar içerisinde en yaygın yöntemlerden bir tanesi de standart normal sapma *Z*-testidir. *ZMAP* tekniği, deprem aktivitesinde mevcut olan durgunluğu ortaya koyabilmek için kullanılır. *Z*-testi, standart sapma biriminde güven seviyesinin istatistiksel olarak değerlendirilebilmesi için *LTA(t)* fonksiyonunu (Long Term Average, Uzun Vadeli Ortalama) oluşturur ([Wiemer & Wyss, 1994](#)):

$$Z(t) = \frac{R_1 - R_2}{[(\sigma_1^2/n_1) + (\sigma_2^2/n_2)]^{1/2}} \quad (4)$$

Burada R_1 ; tüm periyotlardaki ortalama deprensellik oranı (deprem sayısı), R_2 ; düşünülen periyottaki ortalama deprensellik oranıdır. σ_1 ve σ_2 ; bu periyotlardaki deprem yoğunluk fonksiyonlarının standart sapmaları, n_1 ve n_2 ise ölçülen sismik aktivite oranındaki örneklerin sayısı ile ilişkili parametrelerdir. *Z*-değeri zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanır ve *LTA* olarak tanımlanır.

3.3. Coulomb gerilme değişimleri

Coulomb gerilme analizi, kaynak fayda bir kopmanın meydana geldiği durumlarda gerilme koşullarını ortaya koyabilmek için kullanılan oldukça kullanışlı bir yaklaşımdır. Alıcı fay üzerindeki Coulomb kopma gerilmesinin ($\Delta\sigma_{cfs}$) değişimi aşağıdaki denklemle verilir ([King ve ark., 1994](#)):

$$\Delta\sigma_{cfs} = \Delta\tau_s + \mu' \Delta\sigma_{n'} \quad (5)$$

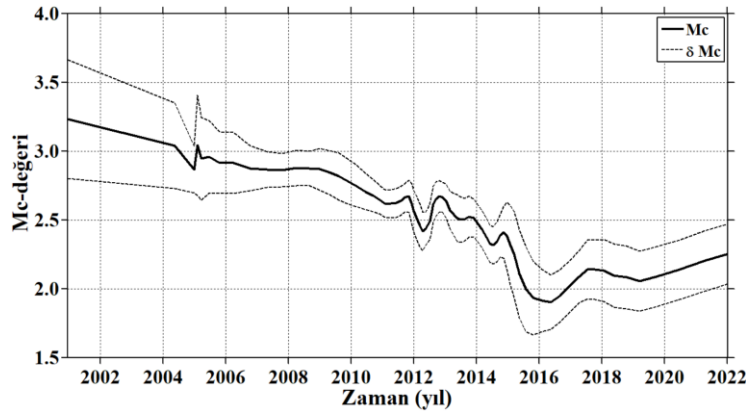
Burada $\Delta\tau_s$; alıcı fay atımının pozitif yönüyle ilişkili makaslama gerilmesi değişimi, $\Delta\sigma_{n'}$; fay düzlemi boyunca ki normal gerilme değişimi ve μ' ise fay üzerindeki efektif sürtünme katsayısıdır ([Toda ve ark., 2011](#)). μ' , gözenek basıncı değişimlerinin etkilerini dahil etmek anlamına gelir ve 0-1 arasında değişir. Seçilen depremlerin odak mekanizması çözümleri genellikle doğrultu atımlı ve ters fay mekanizmasına sahiptir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında elastik yarı-sonsuz bir ortamda 0.4 olarak alınmıştır ([King ve ark., 1994](#)). Boyutsuz Poisson oranı (ν) 0.25 ve Young modülü (E) ise 8×10^5 bar olarak alınmıştır. ± 0.1 aralığında değişen Coulomb gerilme değeri gelecek deprem tehlikesini tahmin etmede katkı sağlar ([Yadav ve ark., 2012](#)). Pozitif Coulomb gerilme değişimi, fayı gevrek kırılmaya doğru iten gerilme artışı gösterirken, Coulomb gerilme dağılımındaki negatif değişimler ise depremin kırılmaya neden olmasını engelleyen gerilme boşalımı ile ilişkilidir ([Stein ve ark., 1994](#); [Liao ve ark., 2022](#)).

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada temel amaç, deprem oluşumlarının bölge-zaman-magnitüd davranışlarını tanımlayabilmek için tamlık magnitüdü *Mc*-değeri, G-R ilişkisindeki *b*-değeri, depremlerin tekrarlamaya periyotları ve oluşma olasılıkları, öncü sismik durgunluk *Z*-değeri ve Coulomb gerilme değişimleri gibi

istatistiksel parametreler analiz edilerek 2024 yılı başlangıcında Hakkari ve civarındaki deprem tehlikesi ve gelecek deprem potansiyeli için bazı ön bulguları ortaya koyabilmektedir.

Deprem kataloglarında minimum magnitüd zamanla değişim gösterdiği için istatistiksel deprensellik analizlerinde tamlık magnitüdü M_c -değerinin seçimi oldukça önemlidir ve bu tür çalışmaların ilk aşaması olmalıdır. Ayrıca bu tür çalışmalarda, güvenilir sonuçların elde edilebilmesi için maksimum deprem sayısının kullanılması hedeflenir. Yöntem kısmında bahsedildiği gibi M_c -değerinin ve standart sapmasının zamana bağlı değişimleri hareketli zaman penceresi tekniği kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 3'te verilmiştir. Analizlerde $M_w \geq 1.0$ olan ve 3257 depremi içeren tam katalog verisi dikkate alınmış ve M_c -değerinin hesabı için pencere başına 200 olay ile örnekleme yapılmıştır. M_c -değeri, 2014 yılına kadar 2.5-3.2 arasında değişim gösterdiği görülmektedir. 2014 yılından itibaren 2.5 değerinin altına düşmekte ve 2014 yılından 2024 yılına kadarki on yıllık süreçte 2.3-2.5 arasında dalgalanma göstermektedir. M_c -değerindeki zamana bağlı değişimler durağan değildir ve 1958-2024 yılları arasında ortalama 2.5 değeri civarında dağılım gösterdiği görülmektedir. Sonuç olarak, çalışma kapsamında b -değeri, Z -değeri, tekrarlama periyodu, oluşma olasılıkları ve gerilme analizi gibi istatistikler yapılacağı için M_c -değerinin belirlenmesi ilk adım olarak gerçekleştirilmiş ve M_c -değeri ortalama 2.5 olarak varsayılmıştır. Bu değer, Öztürk & Alkan (2023b) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarıyla da uyumludur.

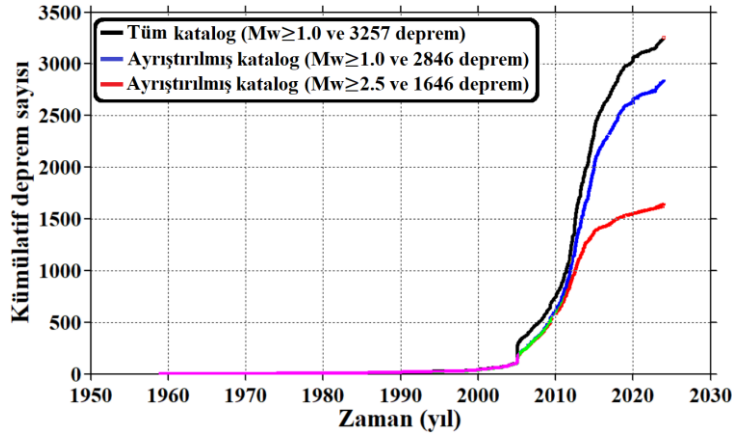


Şekil 3. M_c -değerinin zamanla değişimi. Kesikli çizgi standart sapmayı (δM_c) göstermektedir.

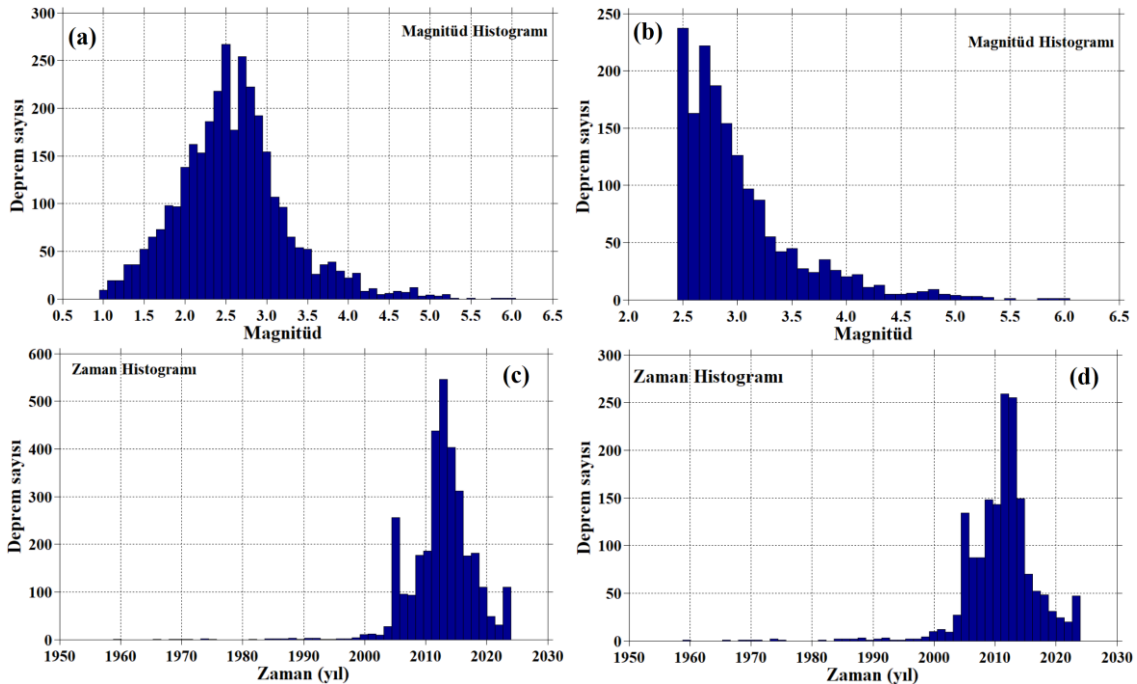
Veri bölümünde ifade edildiği gibi tam katalog içerisinde 1958-2024 yılları arasında $M_w \geq 1.0$ olan toplam 3257 deprem mevcuttur. Ayırıştırma işlemi uygulandıktan sonra 411 deprem (%12.62) katalogdan çıkarılmıştır. $M_c=2.5$ dikkate alınarak, ayırıştırılmış katalog içerisindeki $M_w < 2.5$ olan 1200 deprem de katalogdan çıkarılmıştır. Ayırıştırma işlemi ve M_c -değeri dikkate alınarak yapılan eliminasyon işlemi sonucunda toplamda 1611 (%49.46) deprem katalogdan çıkarılmıştır. Böylece, sismik durgunluk analizleri için daha homojen, standart ve bağımsız bir deprem kataloğu oluşturulmuştur. Şekil 4, farklı magnitüd değerleri ve ayırıştırılmış kataloglar için zamanın bir fonksiyonu olarak kümülatif deprem sayısını göstermektedir. Tam deprem kataloğu $M_w \geq 1.0$ olan 3257 depremi (siyah çizgi), ayırıştırılmış ancak tüm deprem verisini kullanan deprem kataloğu $M_w \geq 1.0$ olan 2846 depremi (mavi çizgi), ayırıştırılmış ve M_c -değerini dikkate alan deprem kataloğu ise $M_w \geq 2.5$ olan 1646 depremi (kırmızı çizgi) içermektedir (Şekil 4). 1958 ile 2000 yılları arasında sismik aktivitede önemli bir dalgalanma yoktur ve 2001-2005 yılları arasında çok az bir deprensellik değişimi mevcuttur. Bununla birlikte 25 Ocak 2005 Hakkari depreminden sonra sismik aktivitede önemli bir artışın olduğu görülmektedir. Şekil 4'ten görüldüğü gibi, $M_w \geq 2.5$ olan ayırıştırılmış deprem kataloğunun kümülatif sayı eğrisi tam deprem kataloğuna kıyasla daha düzgün bir yönelime sahiptir. Literatür çalışmaları, M_c -değerini dikkate alan ayırıştırma çalışmalarının, öncü şok, artçı şok veya deprem yığılımı gibi bağımlı aktivitelerin katalogdan uzaklaştırılabilmesi için gerekli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, deprensellik oran değişimlerinin istatistiksel olarak değerlendirilebilmesi için bu işlemin birincil adım olarak yapılması gerekmektedir (Katsumata & Kasahara, 1999; Joseph ve ark., 2011). Sonuçta, ayırıştırma ve sonrasında $M_w < 2.5$ olan depremlerin katalogdan elenmesi ile bağımlı olaylardan temizlenmiş, sismik durgunluk analizleri için tekdüze ve daha güvenilir bir deprem kataloğu elde edilmiştir.

Şekil 5, Hakkari ve civarında magnitüdü $1.0 \leq M_w \leq 6.0$ arasında değişen yaklaşık 3257 sığ depremin (70 km'den küçük) magnitüd ve zaman histogramlarını göstermektedir. Şekil 5a'da görüldüğü

gibi, deprem magnitüdlerinin büyük çoğunluğu 2.0-3.0 arasında değişmektedir ve $M_w=2.5$ değerinde maksimum sayıya ulaşmıştır. Katalog içerisinde $M_w>3.0$ olan 2473 deprem, $3.0 \leq M_w < 4.0$ arasında 658 deprem, $4.0 \leq M_w < 5.0$ arasında 109 deprem ve $5.0 \leq M_w$ olan 17 deprem mevcuttur. Ayrıca, ayrıştırılmış katalog için magnitüd histogramı Şekil 5b’de verilmiştir. Sonuç olarak, Hakkari ve civar için magnitüdü 2.0-3.0 arasında değişen depremlerin daha sık meydana geldiği söylenebilir. Küçük depremlerin sayılarında gözlenen bu artma eğilimi son yıllarda Hakkari ve civarındaki gerilme artışının bir belirtisi olarak yorumlanabilir. 1958-2024 yılları arasında yaklaşık 65.18 yıllık süreçte meydana gelen depremlerin zaman histogramı Şekil 5c’de verilmektedir. 1958-2005 yılları arasındaki depremsellik oldukça azdır ve bu zaman aralığında 105 deprem meydana gelmiştir. 2005-2011 yılları arasındaki deprem aktivitesi güçlü artış ve azalmalar göstermesine rağmen, 2011 yılından itibaren deprem sayısında genel bir azalma söz konusudur. 2005-2011 yılları arasında 1121 deprem gözlenirken 2012-2024 yılları arasında toplamda 2031 deprem meydana gelmiştir. Bununla birlikte, 2021 yılından itibaren deprem aktivitesinin yeniden artmaya başladığı görülmektedir. Tüm kataloga ek olarak, ayrıştırılmış katalog için zaman histogramı Şekil 5d’de verilmiştir. Dolayısıyla, bu tür istatistiksel analizler depremsellik oran değişimlerinin gözlenebilmesi için ilksel bilgiler sağlayabilir ve bu tür değişimler Hakkari ve civarındaki öncü sismik durgunluk değerlendirmesi için kullanılabilir.

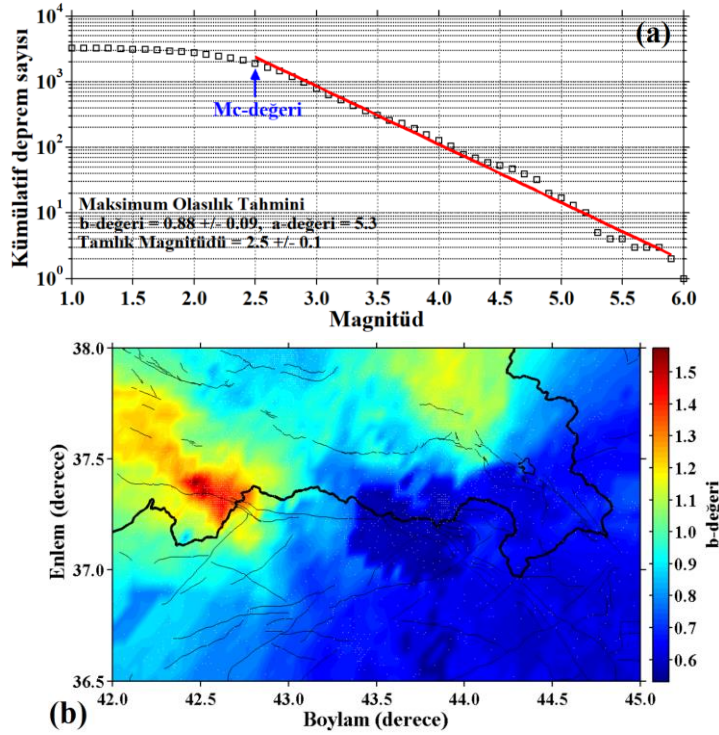


Şekil 4. Tüm ve ayrıştırılmış veri setleri için zamanın bir fonksiyonu olarak kümülatif deprem sayısı.



Şekil 5. Hakkari ve civarı için 1958-2024 yılları arasındaki depremlerin (a) tüm katalog için magnitüd histogramı, (b) ayrıştırılmış katalog ($M_w \geq 2.5$) için magnitüd histogramı, (c) tüm katalog için zaman histogramı, (d) ayrıştırılmış katalog ($M_w \geq 2.5$) için zaman histogramı.

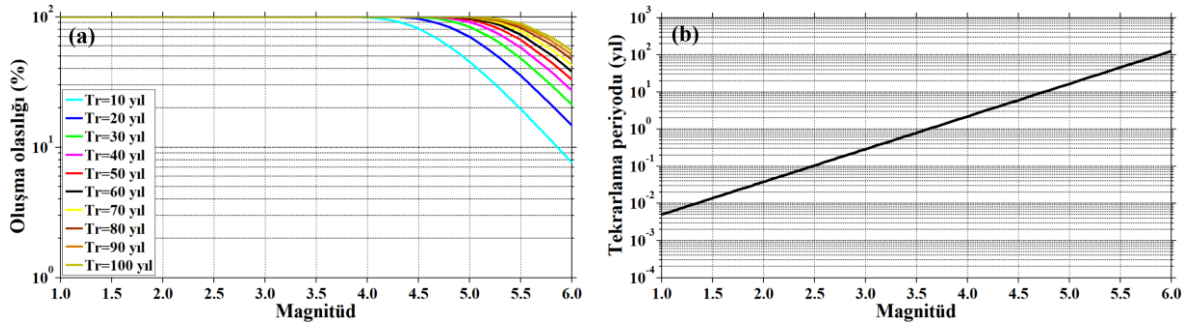
Şekil 6, b -değeri ve bölgesel değişim haritasını göstermektedir. b -değeri, tüm deprem kataloğu kullanılarak ve $M_c=2.5$ alınarak maksimum olasılık yöntemi ile 0.88 ± 0.09 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6a). Küresel ölçekte b -değerinin 0.3-2.0 arasında değiştiği bilinir. Ortalama b -değeri 1.0 olarak önerilmekle birlikte tektonik depremler 0.5-1.5 arasında değişen b -değerlerine sahiptir. Dolayısıyla, Hakkari ve civarı için hesaplanan $b=0.88$ değerinin G-R ilişkisiyle iyi uyum sağladığı ve ortalama b -değerine kıyasla nispeten küçük bir değer olduğu söylenebilir. Bu da Türkiye'nin bu kısmında artan bir gerilme durumunun olabileceği şeklinde yorumlanabilir. b -değerinin bölgesel değişimi hareketli pencere tekniği ile pencere başına 400 deprem kullanılarak enlem ve boylamda $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ grid aralığı ile hesaplanmış ve Şekil 6b'de verilmiştir. Bölgesel b -değeri 0.53-1.53 arasında değişim göstermektedir. Frohlich & Davis (1993)'e göre deprem oluşumları için b -değeri, ortalama 1.0 civarında G-R ilişkisi ile iyi temsil edilir. Bu tanımlamaya göre, büyük b -değerleri ($b>1.0$) Cizre fayını içeren Şırnak ve civarında, Narince segmentini içerisine alan Güneydoğu Anadolu Bindirme Zonunda, Işıklar segmenti ve kuzeyini içerisine alan bölgede gözlenmiştir. Bununla birlikte düşük b -değerleri ($b<1.0$), Beğendik, Konalga, Hakkari, Yüksekova, Şemdinli ve Çubuklu segmentlerinde gözlenirken en düşük b -değerlerinin büyük magnitüdü deprem oluşumlarıyla (Şekil 2) ilişkili olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, b -değeri dağılımı deprem aktivitesiyle iyi uyum içerisindedir.



Şekil 6. (a) G-R ilişkisi ve b -değeri. b -değeri, standart sapması, a -değeri ve M_c -değeri de şekil üzerinde verilmiştir. (b) b -değeri bölgesel değişim haritası.

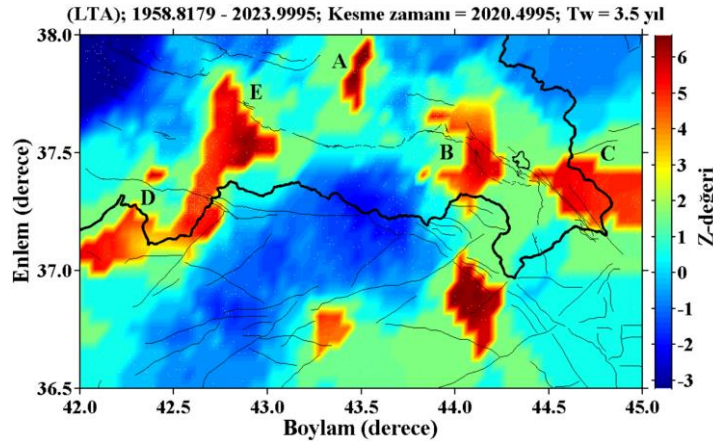
Bir bölgenin deprem potansiyelinin istatistiksel olarak değerlendirilmesinde en önemli araçlardan biri deprem oluşumlarının tekrarlamama periyodu ile oluşma olasılıklarının hesaplanmasıdır. Çalışma kapsamında tüm magnitüd seviyelerindeki bu tür değişimler Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7a'da görüldüğü gibi, farklı T_r (recurrence time, return period, tekrarlamama zamanı) periyodlar için %~80-100 arasında değişen en yüksek oluşma olasılıkları $1.0 \leq M_w < 4.5$ aralığındaki depremler için tahmin edilmiştir. $M_w=5.0$ büyüklüğündeki depremler için farklı T_r periyodlarındaki oluşma olasılıkları %~40-100 arasında değişim göstermektedir. Ayrıca, $M_w=5.5$ ve $M_w=6.0$ olan depremlerin $T_r=10$ ve $T_r=20$ yılda oluşma olasılıkları %20'den küçükken, bu büyüklükteki depremlerin $T_r=30$ ve daha uzun periyodlardaki oluşma olasılıkları %20'den büyüktür. Şekil 7a'ya göre, $M_w=5.0$ büyüklüğündeki bir depremin $T_r=10, 20, 50, 70$ ve 100 yılda oluşma olasılıkları sırasıyla %~45.20, %~69.97, %~95.06, %~98.52 ve %~99.76 olarak verilebilir. $M_w=5.5$ büyüklüğündeki bir depremin $T_r=10, 20, 50, 70$ ve 100 yılda oluşma olasılıkları ise sırasıyla %~19.62, %~35.39, %~66.44, %~73.31 ve %~88.74 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, çalışma alanı içerisinde meydana gelmiş en büyük deprem olan $M_w=6.0$ için

$T_r=10, 20, 50, 70$ ve 100 yılda oluşma olasılıkları ise sırasıyla $\% \sim 7.62, \% \sim 14.66, \% \sim 32.72, \% \sim 49$ ve $\% \sim 54.73$ olarak tahmin edilmiştir. Bu belirli magnitüd değerlerine ek olarak bütün magnitüd seviyeleri için farklı T_r periyodlarındaki oluşma olasılıkları Şekil 7a'dan görülebilir. Oluşma olasılıklarıyla birlikte, tüm magnitüd değerleri için depremlerin tekrarlamaya periyodları Şekil 7b'de verilmiştir. Nispeten küçük tekrarlamaya periyodları ($< \sim 1$ yıl) magnitüdü $M_w=1.0-3.6$ arasındaki depremler için gözlenirken, $\sim 1-10$ yıllık tekrarlamaya periyoduna sahip depremler magnitüdü $M_w=3.6-4.7$ arasında değişen depremler için hesaplanmıştır. $\sim 10-20$ yıl arasındaki tekrarlamaya periyodları $M_w=5.0-5.1$ aralığındaki depremler için tahmin edilmişken, 20 yıldan daha uzun tekrarlamaya periyoduna sahip depremler ise $M_w=5.1$ 'den büyüktür. Şekil 7b'ye göre, $M_w=5.0, 5.5$ ve 6.0 olan depremlerin tekrarlamaya zamanları sırasıyla $\sim 16.63, \sim 45.80$ ve ~ 126.30 yıl olarak verilebilir. Ayrıca, farklı magnitüd seviyeleri için tekrarlamaya periyodları Şekil 7b'dan tahmin edilebilir. Elde edilen sonuçlar, $M_w=4.0-5.0$ aralığındaki depremlerin tekrarlamaya periyodlarının diğer depremlere göre daha kısa ve oluşma olasılıklarının daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuçta, bu tahminler çalışma alanı veya Türkiye'nin aktif tektonik bölgelerindeki deprem potansiyelini ortaya koymada ilksel ve kayda değer bulgular sağlayabilir.



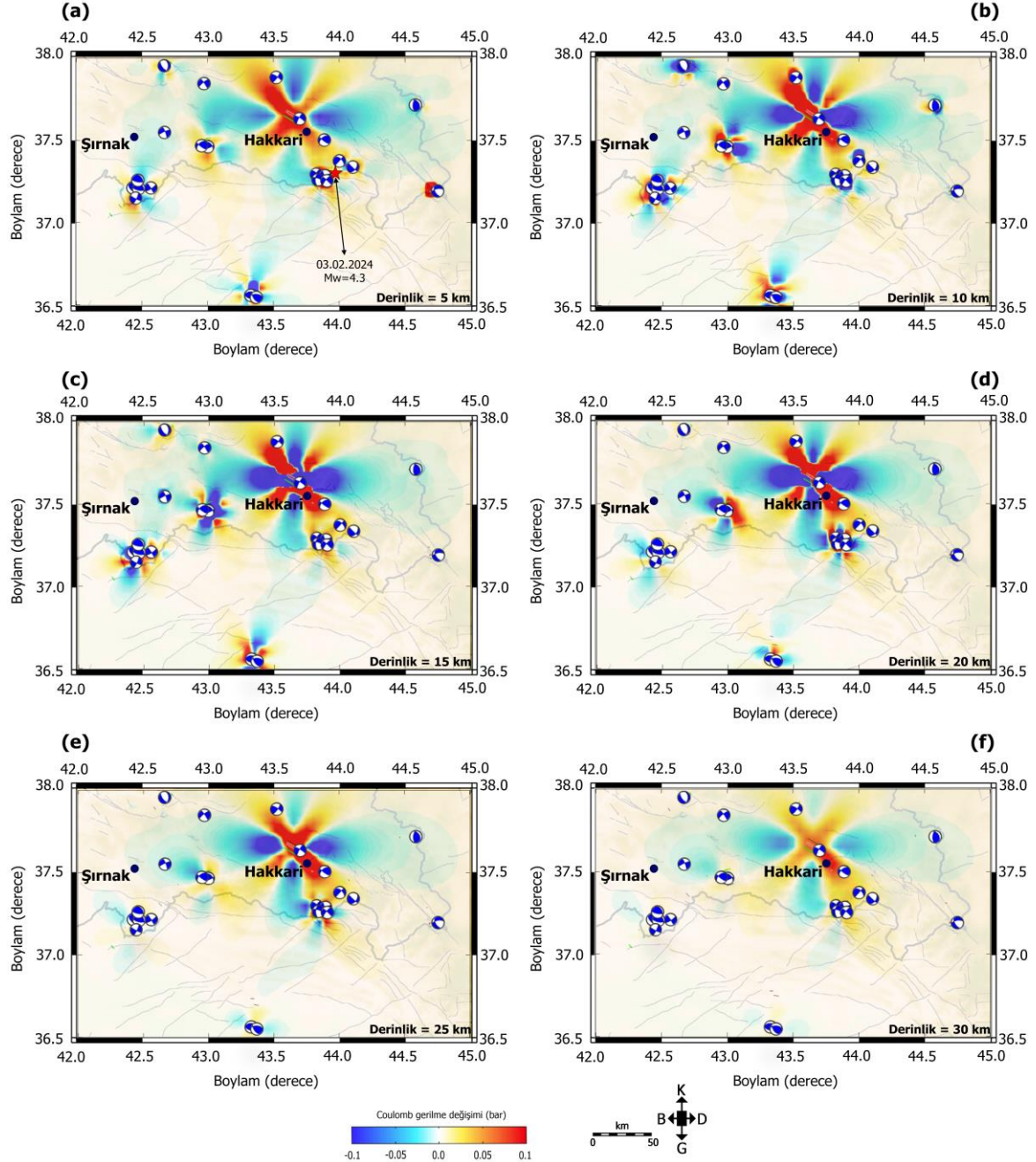
Şekil 7. (a) $T_r=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ ve 100 yıllık periyodlar için deprem oluşma olasılıkları. (b) Depremlerin tekrarlamaya periyodları.

Daha önce de ifade edildiği gibi, bir bölgedeki depremsellik oranını ortaya koyan deprem aktivitesindeki öncü durgunluğun tanımı deprem tahmini için önemli bulgular ortaya koyabilir. Bu amaçla, b -değeri hesabında olduğu gibi, çalışma alanı enlem ve boylamda $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ grid aralıklarına bölünmüş ve zaman penceresinin uzunluğu $T_w=3.5$ yıl alınarak Z -değeri haritası oluşturulmuştur (Şekil 8). Bu analiz için $M_w \geq 2.5$ olan ve 1646 depremi içeren ayrıştırılmış katalog kullanılmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi, 2024 yılı başlangıcında Türkiye sınırları içerisinde sismik durgunluk gösteren 5 bölge tespit edilmiştir. Bu bölgeler, Konalga segmentinin doğu kısmı (A bölgesi), Işıklar segmenti ve güneyi (B bölgesi), Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu (C bölgesi), Cizre fayı ve civarı (D bölgesi), Narince segmenti ile Hakkari segmenti arasında kalan ve Güneydoğu Anadolu Bindirme Zonunu içeren bölgeler (E bölgesi) olarak verilebilir. Sonuç olarak, durgunluk görülen anomali bölgeleri önemli olabilir ve bu detaylı Z -testi sonuçları çalışma alanı için deprem tahmininde öncü belirtilerin güvenilirliğini artırabilir.



Şekil 8. Z -değeri bölgesel değişim haritası. 2024 yılı başlangıcında sismik durgunluk gösteren bölgeler (A, B, C, D, E, F ve G) $T_w=3.5$ yıllık pencere aralığı ile hesaplanmıştır.

Şekil 9'da farklı derinlik aralıkları (5, 10, 15, 20, 25, 30 km) için Coulomb gerilme değişimi sonuçları gösterilmiştir. Coulomb gerilme transferi sonucu elde edilen pozitif değerler artan gerilimi ifade ederken negatif değerler ise gerilimin azaldığını ifade etmektedir (Alkan ve ark., 2021; Alkan & Bayrak, 2022). Tüm derinlik seviyelerindeki gerilme değişimleri dikkate alındığında, ilk olarak Hakkari ili civarında KB-GD ve KD-GB yönünde 4 adet pozitif Coulomb gerilme lobu göze çarpmaktadır. Bu bölgeler Işıklar, Yüksekova, Şemdinli ve Çubuklu segmentlerinin bulunduğu Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu ve Güneydoğu Anadolu Terslenme zonunu içeren bölgelerdir. Özellikle sıg derinliklerde, bu segmentler civarında pozitif gerilme değerleri (~0.1 bar) gözlemlenmiştir.



Şekil 9. Çizelge 1'de verilen depremlerin odak mekanizması çözümleri kullanılarak Hakkari ve civarında farklı derinlikler: (a) 5 km, (b) 10 km, (c) 15 km, (d) 20 km, (e) 25 km ve (f) 30 km için Coulomb gerilme değişim haritaları. 2005 ve 2023 yılları arasında meydana gelen 23 adet depremin ($4.0 \leq M_w \leq 5.9$) odak mekanizması çözümleri mavi plaj topları ile gösterilmiştir. 5 km derinlik haritasında kırmızı yıldız ile gösterilen deprem 03.02.2024 tarihinde meydana gelen Hakkari depremini temsil etmektedir (Depremin episantr bilgileri AFAD web sitesinden alınmıştır (<https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>)).

Şekil 9a'da kırmızı yıldız ile gösterilen deprem ($M_w=4.3$) 03.02.2024 tarihinde Hakkari'nin yaklaşık olarak güney doğusunda meydana gelmiştir (AFAD, 2024) ve bindirme tektoniği ile ilişkilidir. AFAD'ın odak mekanizması çözümlemesine göre sığ bir depreme ($h=7.0$ km) karşılık gelen bu depremi episantr noktası bu çalışmada hesaplanan pozitif Coulomb gerilme alanı içine düşmektedir. Bunun aksine, Hakkari ili ve civarında özellikle 15 km derinlik seviyesinin devamında yaklaşık olarak K-G ve D-B yönünde negatif gerilme lobları ortaya çıkmıştır. Bu durum, artan derinliklerde gerilme değerlerinin negatif olduğunu ve herhangi bir sismik aktivite olabilme ihtimalinin daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, çalışma alanının batısında Şırnak ilinin hemen kuzeyinde yer alan Narince fayı, Beğendik fayı ve Konalga fayı civarında ise küçük ölçekte pozitif ve negatif anomaliler göze çarpmaktadır. Tüm derinlik haritaları incelendiğinde Şırnak ilinin kuzeyine nazaran güneyinde 20 km derinlik seviyesine kadar pozitif gerilme (>0 bar) değerleri gözlenmektedir.

Anadolu & Kalyoncuoğlu (2010), Hakkari ve civarını da içerisine alan Güneydoğu Anadolu bölgesinin deprem tehlikesini ortaya koyabilmek için, depremlerin magnitüd-frekans içeriğini ortaya koyan b -değerini, depremlerin oluşma olasılıklarını ve geri dönüşüm periyotlarını hesaplamışlardır. Bitlis-Zagros Bindirme Zonu, DAFZ ile KAFZ'ın kesiştiği Erzincan-Elazığ-Muş-Erzurum bölgelerinde ve Van Gölü'nün kuzeydoğusunda düşük b -değerleri gözlemlemişler, çalışma alanı içerisinde 100 yıllık bir süreçte magnitüdü 6.5'e eşit ve büyük bir depremin oluşma olasılığını ise %70-75 arasında vermişlerdir. Bu büyüklükte bir depremin tekrarlama zamanını ise 50 yıldan daha az bir süreyle vermişlerdir. Düşük b -değerlerinin yüksek gerilme değişimleriyle ilişkili olması nedeniyle bu bölgelerin deprem tehlikesi altında olduğunu ifade etmişlerdir. Hakkari ve civarındaki deprem tehlikesinin ortaya konmaya çalışıldığı bu çalışmada da bu parametreler analiz edilmiş ve Anadolu & Kalyoncuoğlu (2010)'dan elde edilen sonuçlara benzer değerlendirmeler yapılmıştır.

Akkaya ve ark. (2013), Yüksekova (Hakkari) ve civarının deprem potansiyeli ve tehlike durumunu ortaya koyabilmek için ivme değerleri, depremlerin magnitüd-frekans ilişkisi, oluşma olasılıkları ve geri dönüşüm periyotları gibi sismotektonik parametreleri analiz etmişlerdir. Tamlık magnitüdü $M_c=3.0$ alınarak b -değeri 0.761 ± 0.04 olarak hesaplanmış olup, bu düşük b -değerinin bölgedeki kırıklı yapı ve heterojeniteyle, büyük gerilme ve yamulmayla, büyük deformasyon hızıyla ve büyük faylarla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Magnitüdü 5.0 olan bir deprem için geri dönüşüm periyodu 2 yıl ve 10 yılda olma olasılığı ise %100 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, $M=6.0$ büyüklüğündeki bir depremin 10 yıl içerisinde oluşma olasılığı %78 ve tekrarlama periyodu ise 15 yıl olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular neticesinde ve Yüksekova civarındaki faylarda son dönemlerde büyük depremlerin kaydedilmemiş olması nedeniyle deprem potansiyelinin yüksek olduğu ifade edilmiştir. Mevcut çalışma kapsamında elde edilen bulguların Akkaya ve ark. (2013) tarafından elde edilen sonuçlarla benzer olduğu görülmektedir.

Akkaya (2015), Yüksekova ve civarının yerel zemin özelliklerini araştırmak için HVSR ölçümleri alıp, bölgenin sismotektonik özelliklerini değerlendirmiştir. Bölgedeki önemli tektonik yapılar olarak YŞFZ, Başkale Fay Zonu ve BZBZ, Salmas Fay Zonu ve Main Recent Fault Zonu olarak tanımlamıştır. Bu fay ve fay zonları ile ilişkili olarak bölgede aletsel dönemde meydana gelen önemli/yıkıcı depremleri 1908 Başkale ($M=6.0$), 1930 Salmas-Iran ($M=7.2$), 2005 Hakkari-Sütlüce ($M_w=5.9$) ve 2011 Yüksekova ($M=5.2$) olarak sıralamıştır. Yüksekova bölgesinin genellikle Kuvaterner çökelleri üzerindeki konsolide olmamış killi birimler ile birlikte gevşek-orta derecede çimentolanmış çakıl, kum, siltli birimlerden oluşmasından dolayı, yukarıda bahsedilen fay ve fay zonlarının üreteceği yıkıcı bir depremin önemli ölçüde zarara neden olacağını ifade etmiştir.

Taghipour ve ark. (2018), KB İran'daki aktif doğrultu atımlı fay zonlarının dağılımını incelemişlerdir. YŞFZ'nun doğusunda ve Main Recent Fay Zonunun kuzeyinde bulunan ve 7 alt-segmentten meydana gelen Salmas ve Maragheh Fay Zonlarının genellikle sağ yönlü doğrultu atımlı fay mekanizmasına sahip olduklarını belirtmişlerdir. Diğer taraftan, yaklaşık 4.0 mm/yıl'lık GPS hızı ile Türkiye-İran Plakalarındaki faylanmaya katkı sağladıklarını ifade etmişlerdir. Buna ek olarak, Niassarifard ve ark. (2021), kuzeybatı İran ve güneydoğu Anadolu'nun bölgedeki ana fay zonlarından dolayı tektonik kaçış, blok ötelenmesi ve lokal genişleme gibi farklı tektonik süreçlerin etkisiyle aktif gerilme alanından etkileneceğini belirtmişlerdir.

Öztürk (2015) Hakkari ve civarını içerisine alan Doğu Anadolu bölgesi civarında çoklu parametre kullanımı ile orta vadede beklenen güçlü depremlerin tahmini üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma kapsamında, G-R ilişkisindeki b -değeri, tamlık magnitüdü M_c -değeri, fraktal boyut D_c -değeri, göreceli yoğunlaşma ve oluşum bilgilerine dayalı analizler gerçekleştirmiştir. Elde edilen

bulgular neticesinde, bu çalışmanın sınırları içerisinde yer alan Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu civarında 2014-2024 yılları arasında deprem oluşma olasılığının yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Benzer parametrelerin kullanıldığı fakat yalnızca Hakkari ve civarını içerisine alan ve benzer bir çalışma Öztürk & Alkan (2023b) tarafından gerçekleştirilmiştir. Öztürk & Alkan (2023b), 1958-2022 yılları arasındaki deprem verisini kullanarak yaptıkları analizlerde, tamlık magnitüdünü $M_c=2.5$ almışlar ve $b=0.83\pm 0.05$ olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, $M_w=5.0$, 5.5 ve 5.9 büyüklüğündeki depremlerin orta vadede (10 yıl) gerçekleşme olasılıklarını sırasıyla $\sim 68.39\%$, $\sim 35.79\%$ ve $\sim 18.64\%$ olarak, geri dönüşüm periyodlarını ise sırasıyla ~ 9 , ~ 23 ve ~ 48 yıl olarak tahmin etmişlerdir. Ayrıca, Beğendik, Konalga, Hakkari, Yüksekova, Şemdinli ve Çubuklu segmentlerinde düşük b -değerleri, Konalga, Hakkari, Işıklar ve Çubuklu segmentlerinde pozitif gerilme değerleri gözlemlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar dikkate alındığında literatürdeki çalışmalarla da uyumlu olduğu görülmektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmada Türkiye'nin doğusunda yer alan Hakkari ili ve civarındaki Güneydoğu Anadolu Bindirme Zonu, Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu, Narince Fayı ve Cizre Fayı gibi doğrultu atımlı fay ve ters fay mekanizmalarına sahip tektonik birliklerin gelecek deprem üretme potansiyeli sismotektonik b -değeri, öncü suskunluk Z -değeri, Coulomb gerilme değişimi, deprem oluşma olasılığı ve tekrarlama periyodu gibi sismolojik parametreler ile araştırılmıştır. Aletsel dönem deprenselliği incelendiğinde, bölgede genellikle orta büyüklükte depremler meydana gelmiştir. Son yıllarda büyük/yıkıcı deprem meydana gelmemekle birlikte, en son 2005 yılında Hakkari'de (Sütlüce) $M_w=5.9$ büyüklüğünde bir deprem Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu civarında meydana gelmiştir. Bu doğrultuda ilk olarak 36.5°K - 38°K enlem ve 42.0°D - 45°D boylam koordinatları için çalışma bölgesinde meydana gelen depremler seçilmiştir.

Yukarıda bahsedilen sismolojik parametrelerin hesaplanması için 1958-2023 yılları arasında magnitüdüleri $1.0 \leq M_w \leq 6.0$ arasında değişen 3257 sığ deprem seçilerek homojen deprem kataloğu oluşturulmuştur. Coulomb gerilme değişimlerinin hesaplanması için ise 2005 yılı başlangıcı itibari ile büyüklüğü $M_w \geq 4.6$ olan 23 adet sığ depremin odak mekanizması çözümleri kullanılmıştır. Kesme magnitüdü $M_c=2.5$ alınarak elde edilen b -değerleri 0.53 - 1.53 arasında değişmektedir ve ortalaması ~ 0.88 olarak hesaplanmıştır. Düşük b -değerlerinin artan gerilme ile ilişkili olduğu dikkate alındığında, özellikle en düşük b -değerleri Yüksekova, Şemdinli ve Çubuklu segmentleri civarında gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, farklı derinlik değerleri için hesaplanan Coulomb gerilme değişimi haritalarında da Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu civarında pozitif gerilme lobları (≥ 1.0 bar) ortaya çıkmıştır. Hesaplanan bu iki sismolojik parametreye ek olarak, herhangi bir anaşok öncesi ilgili bölgedeki sismik aktivitenin düşüşüne karşılık gelen sismik durgunluk değeri (Z -değeri), özellikle Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu, Cizre fayı ve Narince segmenti civarının büyük değerlere karşılık geldiği gözlemlenmiştir. Çalışma bölgesinin geçmiş deprenselliği, hesaplanan deprem tekrarlama periyodu ve deprem oluşma olasılıkları dikkate alındığında, 2024 yılı itibari ile orta vadede (~ 10 yıl) magnitüdü $M_w \geq 5.0$ olan bir depremin meydana gelme ihtimalinin oldukça yüksektir ($\geq \sim 45\%$). Sonuç olarak, hesaplanan bu sismotektonik parametreler arasındaki ilişki, Hakkari ve civarındaki deprem gelecek deprem oluşumlarını değerlendirebilmek için önemli katkılar sağlayacak ve dolayısıyla güncel deprem tehlikesi ve potansiyeli için öncül bilgiler sağlayacaktır.

Teşekkür

Bazı şekiller ZMAP (Wiemer, 2001) ve GMT (Wessel ve ark., 2019) kullanılarak oluşturulmuştur. Coulomb gerilme haritaları Coulomb 3.4 (Toda ve ark., 2011) kullanılarak hazırlanmıştır. Tektonik birimler Emre ve ark., (2018)'ten alınmıştır. Deprem kataloğu Tan (2021) ve Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü web sayfasından (KRDAE, www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/), odak mekanizması çözümlerine ait bilgiler ise Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığından (AFAD, www.afad.gov.tr) temin edilmiştir.

Kaynakça

- Abdelfattah, A. K., Jallouli, C., Qaysi, S., & Al-Qadasi, B. (2020). Crustal stress in the Northern Red Sea Region as inferred from seismic b -values, seismic moment release, focal mechanisms, gravity, magnetic, and heat flow data. *Surveys in Geophysics*, 41, 963-986. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09602-8>
- AFAD. (2024). Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, deprem kataloğu. Erişim tarihi: 31.01.2024. <https://deprem.afad.gov.tr/home-page>
- Ahadov, B., & Jin, S. (2019). Effects of Coulomb stress change on $M_w > 6$ earthquakes in the Caucasus region. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 29(106326), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.106326>
- Akkaya, İ., Şengül, M. A., Özvan, A., & Tapan, M. (2013). Yüksekova (Hakkari) bölgesinin depremselliği ve sismik tehlike analizleri. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 26(1), 37-51.
- Akkaya, İ. (2015). The application of HVSR microtremor survey method in Yüksekova (Hakkari) gion, Eastern Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 109, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.05.018>
- Alkan, H., Büyüksaraç, A., Bektaş, Ö., & Işık, E. (2021). Coulomb stress change before and after 24.01.2020 Sivrice (Elazığ) Earthquake ($M_w = 6.8$) on the East Anatolian Fault Zone. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2648. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09080-1>
- Alkan, H. (2022). Crustal structure in and around the East Anatolian volcanic belt by using receiver functions stacking. *Journal of African Earth Sciences*, 191, 104532, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104532>
- Alkan, H., & Bayrak, E. (2022). Coulomb stress changes and magnitude-frequency distribution for Lake Van region. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 168(168), 141-156. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.990666>
- Alkan, H., Öztürk, S., & Akkaya, İ. (2023). Seismic hazard implications in and around the Yedisu seismic gap (Eastern Türkiye) based on Coulomb stress changes, b -values, and S-wave velocity. *Pure and Applied Geophysics*, 180, 3227-3248. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03342-7>
- Anadolu, N. C., & Kalyoncuoğlu, Ü. Y. (2010). Güneydoğu Anadolu bölgesinin depremselliği ve deprem tehlike analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(1), 84-94.
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Türkiye-a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14(1-3), 3-30. <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432432>
- Coban, K. H., & Sayıl, N. (2019). Evaluation of earthquake recurrences with different distribution models in western Anatolia. *Journal of Seismology*, 23, 1405-1422. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09876-5>
- Delph, J. R., Biryol, C. B., Beck, S. L., Zandt, G., & Ward, K. M. (2015). Shear wave velocity structure of the Anatolian Plate: anomalously slow crust in southwestern Turkey. *Geophysical Journal International*, 202(1), 261-276. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv141>
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H., & Çan, T. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229-3275. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Frohlich, C., & Davis, S. (1993). Teleseismic b -values: Or, much ado about 1.0. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B1), 631-644. <https://doi.org/10.1029/92JB01891>
- GCMT. (2024). Global Centroid-Moment-Tensor. Erişim tarihi: 31.01.2024. <https://www.globalcmt.org/>
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 185-188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>
- Hirata, T. (1989). Correlation between the b -value and the fractal dimension of earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94, 7507-7514. <https://doi.org/10.1029/JB094iB06p07507>
- Irmak, T. S., Doğan, B., & Karakaş, A. (2012). Source mechanism of the 23 October 2011, Van (Turkey) earthquake ($M_w=7.1$) and aftershocks with its tectonic implications. *Earth, Planets and Space*, 64, 991-1003. <https://doi.org/10.5047/eps.2012.05.002>

- Joseph, J. D. R., Rao, B., Anoop, M.B. (2011). A study on clustered and de-clustered world-wide earthquake data using G-R recurrence law. *International Journal of Earth Science and Engineering*, 4, 178-182.
- Katsumata, K., & Kasahara, M. (1999). Precursory seismic quiescence before the 1994 Kurile earthquake (Mw=8.3) revealed by three independent seismic catalogs. *Pure and Applied Geophysics*, 155, 443-470. <https://doi.org/10.1007/s000240050274>
- Katsumata, K. (2011). A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M=9.0). *Earth Planets Space*, 63, 709-712. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.033>
- King, G. C., Stein, R. S., & Lin, J. (1994). Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3), 935-953.
- KOERI. (2024). Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. Erişim tarihi: 31.01.2024. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/>
- Liao, B. Y., Huang, H. C., & Xie, S. (2022). The source characteristics of the Mw6.4, 2016 Meinong Taiwan earthquake from teleseismic data using the hybrid homomorphic deconvolution method. *Applied Sciences*, 12(494), 1-13. <https://doi.org/10.3390/app12010494>
- Mogi, K. (1962). Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University*, 40, 831-853.
- Nanjo, K. Z. (2020). Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes? *Nature Communication*, 11 (3082), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16867-5>
- Niassarifard, M., Shabanian, E., Azad, S.S., & Madanipour, S. (2021). New tectonic configuration in NW Iran: Intracontinental dextral shear between NW Iran and SE Anatolia. *Tectonophysics*, 811, 228886. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228886>
- Öztürk, S. (2015). Depremselliğin fractal boyutu ve beklenen güçlü depremlerin orta vadede bölgesel olarak tahmini üzerine bir modelleme: Doğu Anadolu Bölgesi, Türkiye. *Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1), 1-23.
- Öztürk, S. (2018). Earthquake hazard potential in the eastern Anatolian region of Turkey: seismotectonic *b* and *Dc*-values and precursory quiescence *Z*-value. *Frontiers of Earth Science*, 12(1), 215–236. <https://doi.org/10.1007/s11707-017-0642-3>
- Öztürk, S. (2020). A study on the variations of recent seismicity in and around the Central Anatolian region of Turkey. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 301 (106453), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106453>
- Öztürk, S., & Alkan, H. (2023a). Multiple parameter analysis for assessing and forecasting earthquake hazards in the Lake Van region, Turkey. *BALTICA*, 36(2), 133-154. <https://doi.org/10.5200/baltica.2023.2.4>
- Öztürk, S., & Alkan, H. (2023b, Mayıs). *Current earthquake hazard in and around the southeastern part of Türkiye: Evaluation of the multiple parameters*. 10th International Mardin Artuklu Scientific Researches Conference, Mardin, Türkiye, 95-105.
- Reasenber, P. (1985). Second-order moment of Central California seismicity, 1969-1982. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7), 5479-5495. <https://doi.org/10.1029/JB090iB07p05479>
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, ... & Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B05411, 1-26. <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>
- Scholz, C. H. (1968). The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 399-415. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580010399>
- Scholz, C. H. (2015). On the stress dependence of the earthquake *b* value. *Geophysical Research Letters*, 42, 1399-1402. <https://doi.org/10.1002/2014GL028663>
- Schorlemmer, D., Wiemer, S., & Wyss, M. (2005). Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. *Nature*, 437. <https://doi.org/10.1038/nature04094>

- Sinaga, G. H. D., Silaban, W., & Simanullang, A.F. (2022). Analysis of Coulomb stress of Sumatera earthquake against pyroclastic flow of mount Sinabung as data Prone Volcano disaster. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 13(1), 793-803. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.13.1.0086>
- Stein, R. S., King, G. C. P., & Lin, J. (1994). Stress Triggering of the 1994 M = 6.7 Northridge, California, earthquake by its predecessors. *Science*, 265(5177), 1432-1435. <https://doi.org/10.1126/science.265.5177.1432>
- Şengör, A. M. C., & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Türkiye: a plate Tectonic approach. *Tectonophysics*, 75,181-241. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4)
- Tabban, A., & Gencoğlu, S. (1975). Earthquake and its parameters. *Bulletin of the Earthquake Research Institute of Turkey*, 11, 7-83.
- Taghipour, K., Khatib, M. M., Heyhat, M., Shabanian, E., & Vaezihir, A. (2018). Evidence for distributed active strike-slip faulting in NW Iran: The Maragheh and Salmas fault zones. *Tectonophysics*, 742, 15-33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.022>
- Tan, O. (2021). A homogeneous earthquake catalogue for Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(7), 2059-2073. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2059-2021>
- Toda, S., Stein, R. S., & Lin, J. (2011). Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M=9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer. *Geophysical Research Letters*, 38(7), L00G03, 1-5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047834>
- Türkoğlu, E., Unsworth, M., Bulut, F., & Çağlar, İ. (2015). Crustal structure of the North Anatolian and East Anatolian Fault Systems from magnetotelluric data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 241, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.01.003>
- USGS. (2024). United States Geological Survey. Erişim tarihi: 31.01.2024. <https://www.usgs.gov/>
- Utsu, T. (1971). Aftershock and earthquake statistic (III): Analyses of the distribution of earthquakes in magnitude, time and space with special consideration to clustering characteristics of earthquake occurrence (1). *Journal of Faculty of Science Hokkaido University Series VII (Geophysics)*, 3(5), 379-441. <http://hdl.handle.net/2115/8688>
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556-5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
- Wiemer, S., & Wyss, M. (1994). Seismic quiescence before the Landers (M=7.5) and Big Bear (6.5) 1992 earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3), 900-916.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bulletin Seismological Society of America*, 90(4), 859-869. <https://doi.org/10.1785/0119990114>
- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(2), 373-382. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>
- Wu, Y. M., & Chiao, Y. L. (2006). Seismic quiescence before the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Mw7.6 earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (1), 321-327. <https://doi.org/10.1785/0120050069>
- Wyss, M., & Habermann, R. E. (1988). Precursory seismic quiescence. *Pure and Applied Geophysics*, 126(2-4), 319-332. <https://doi.org/10.1007/BF00879001>
- Wyss, M., & Martirosyan, A. H. (1998). Seismic quiescence before the M7, 1988, Spitak earthquake, Armenia. *Geophysical Journal International*, 134(2), 329-340. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00543.x>
- Yadav, R. B. S., Gahalaut, V. K., Chopra, S., Bin, S. (2012). Tectonic implications and seismicity triggering during the 2008 Baluchistan, Pakistan earthquake sequence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.10.003>
- Yaghmaei-Sabegh, S., & Ostadi-Asl, G. (2021). Estimating of the b-value based on the characteristic earthquake model. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 15(03), 2150015. <https://doi.org/10.1142/S1793431121500159>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Kriterlerinin İncelenmesi

İsmail SARAÇ

Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye
İsmail SARAÇ, ORCID No: 0000-0001-8438-2744

*Sorumlu yazar e-posta: ismailsarac@aksaray.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 22.11.2023
Kabul: 16.04.2024
Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1394411

Anahtar Kelimeler

Gevrek yapıştırıcı,
Hasar analizi,
Sünek yapıştırıcı,
Yapıştırma bağlantıları

Öz: Yapıştırıcıların endüstriyel uygulamalarda kullanımının artmasıyla birlikte, yapıştırma bağlantılarında hasar analiz çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalar, yapıştırma bağlantılı yapıların tasarımında mühendisler için önemli bilgiler sunmuş ve tasarımların şekillenmesine katkı sağlamıştır. Yapıştırma bağlantılarının mukavemetini tahmin etmeye yönelik ilk çalışmalar analitik yaklaşımlar kullanılarak yapılmıştır. Bunu takiben, Sonlu Elemanlar Yönteminin yaygınlaşmasıyla birlikte, geometri sınırlaması olmaksızın, yapıştırma bağlantılarının dayanım tahminleri kapsamlı bir şekilde yapılmaya başlanmıştır. Yapıştırıcılar için literatürde çok sayıda hasar kriteri mevcuttur. Hasar kriteri seçiminde, kullanılan yapıştırıcının sünek veya gevrek yapıda olduğunun bilinmesi önemlidir. Ayrıca, yapıştırıcı hasar kriterinin uygulanabilmesi için, yapıştırıcı tabakasının, bağlantının toplam mukavemetinin en zayıf kısmı olması gerekir. Bu çalışmada, gevrek karakterli Araldite AV138 ve sünek yapıda olan Araldite 2015 yapıştırıcılar kullanılarak oluşturulan tek tesirli bindirme bağlantılarında analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak hasar yükleri hesaplanmıştır. Elde edilen analitik ve sayısal hasar yükleri literatürdeki bir deneysel çalışma ile karşılaştırılarak, yapıştırıcı plastik davranışının, hasar kriteri seçiminde önemi gösterilmiştir. Çalışma sonucunda, gevrek karakterli yüksek dayanımlı AV138 yapıştırıcının kullanıldığı tek tesirli yapıştırma bağlantılarında Von Mises kriterinin, sünek yapıdaki Araldite 2015 yapıştırıcının kullanıldığı tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ise Global Akma kriterinin kullanılmasının incelenen diğer yöntemlere göre daha uygun olduğu gösterilmiştir.

An Investigation of Failure Criteria in Adhesive Joints

Article Info

Received: 22.11.2023
Accepted: 16.04.2024
Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1394411

Keywords

Adhesive joints,
Brittle adhesive,
Ductile adhesive,
Failure analysis

Abstract: With the increasing use of adhesives in industrial applications, failure analysis studies have begun to be carried out on adhesive joints. The analysis studies provided important information for engineers in the design of bonded structures and contributed to the shaping of the designs. Initial studies to predict the strength of adhesive joints were conducted using analytical approaches. Following this, with the widespread use of the Finite Element Method, strength predictions of the adhesive joints began to be made comprehensively, without geometry limitations. There are many failure criteria for adhesives in the literature. When choosing a failure criterion, it is important to know whether the adhesive used is ductile or brittle. Additionally, for the adhesive failure criterion to apply, the adhesive layer must be the weakest part of the total strength of the joint. In this study, failure loads were calculated using analytical and numerical methods for single-lap adhesive joints formed using brittle Araldite AV138 and ductile Araldite 2015 adhesives. The obtained analytical and numerical failure loads were compared with the results of experimental studies in the literature and

the importance of adhesive plastic behavior in the selecting of adhesive failure criteria was revealed. It has been shown that the use of the Von Mises criterion in the brittle, high-strength AV138 adhesive, and the Global Yield criterion in the ductile Araldite 2015 adhesive is more appropriate than the other methods examined in this study.

1. Giriş

Mühendislik uygulamalarında çok sayıda birleştirme tekniği kullanılmaktadır. Yıllar içinde, cıvata, perçin, kaynak ve lehim gibi birleştirme elemanları geliştirilmiş ve standartlaştırılmıştır. Bu tekniklerin kullanımında herhangi bir tereddüt yoktur ve hasar tahmin yöntemleri bilinmektedir. Yapıştırma tekniği ise, ilk çağlardan beri insanlar tarafından kullanılmasına rağmen mühendislik uygulamalarında kullanımının son yıllarda yaygınlaştığını söylemek mümkündür. Tek bindirmeli bağlantı yöntemi, yapıştırıcı gerilme davranışını anlayabilmek için yaygın olarak kullanılan birleştirme yöntemidir. Yapıştırma bağlantılarının mukavemetini etkileyen birçok parametre vardır. Bunlar yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mekanik özellikleri, yapıştırılan malzemenin kalınlığı, bindirme uzunluğu, yapıştırıcı hattı kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, yüzey hazırlama yöntemi ve kürlenme işlemi olarak sıralanabilir (Adams & Wake, 1984).

Yüksek mukavemetli yapısal yapıştırıcıların üretimi ile birlikte mühendislik uygulamalarında yapıştırıcı kullanımı yaygınlaşmıştır. Yapıştırma bağlantılarının diğer mekanik birleştirme yöntemlerine göre önemli avantajları vardır (Rodríguez ve ark., 2012). Ancak, hasar tahmin prosedürleri açık kurallara tabi değildir. Yapıştırıcıların tarihsel sürecinde, özellikle 1940'lardan bu yana birçok hasar tahmin yöntemi önerilmiştir. İlk yapıştırma bağlantı hasar ve gerilme analizleri, klasik analizler olarak da adlandırılan Volkersen (1938), Goland & Reissner (1944) ve Hart Smith (1973) tarafından oluşturulan iki boyutlu, lineer analizlerdir. İlerleyen süreçte klasik analizler referans alınarak birçok elastik ve elasto-plastik analiz çalışmaları yapılmıştır. Ancak geliştirilen modeller daha genel hale geldikçe denklem sayısı ve karmaşa artmış ve bilgisayar kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Da Silva ve ark. (2008), yaptıkları kapsamlı literatür araştırmasında, yapıştırma bağlantıları ile ilgili analitik ve sayısal modelleri kronolojik olarak bir tabloda sunmuşlardır. Analitik çözümlerin büyük çoğunluğu iki boyutludur. Bu analiz yöntemlerinde yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler elastik kabul edilir ve sadece gevrek yapıştırıcılar için doğru sonuçlar elde edilebilir. Plastik deformasyon özelliği yüksek yapıştırıcılar kullanıldığında, gerilme dağılımlarının doğru hesaplanabilmesi için plastisite özelliklerinin dikkate alınması gerekmektedir. Literatürdeki iki boyutlu elasto-plastik analitik modellerde, sadece yapıştırıcının plastik davranışı dikkate alınmaktadır (Raghava ve ark., 1973; Bigwood & Crocombe, 1989; Adams & Mallick, 1993; Mortensen & Thomsen, 2002).

Ortalama kayma gerilmesi teorisi, yapıştırma bağlantıları ile ilgili en basit teoridir. Bu teoriye göre yapıştırıcının sadece kesme etkisiyle deforme olduğu ve yapıştırılan levhaların rijit olduğu kabul edilmektedir. Bu teoride, yapıştırıcı hattı boyunca kayma gerilmesinin değişmediği varsayılmıştır. Yapıştırıcı tabakasındaki ortalama kayma gerilmesi, uygulanan yükün bindirme alanına bölünmesiyle hesaplanır. Bu analiz yöntemi, özellikle yapıştırıcı tabakadaki kayma gerilmesinin sabit olduğu varsayıldığı için çok gerçekçi değildir. Ancak, yapıştırıcı mukavemeti ile ilgili ortalama bir yaklaşım sunmaktadır.

Yapıştırma bağlantıları ile ilgili literatürdeki ilk analitik model Volkersen (1938), tarafından geliştirilmiştir. Volkersen modelinde, tek bindirmeli bağlantılarda eksantrik yüklemekten kaynaklanan eğilme etkisi dikkate alınmamıştır. Bu yöntem kullanılarak, yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi dağılımı hesaplanabilir. Volkersen yönteminde yapıştırıcının sadece kesme etkisiyle, yapıştırılan levhaların ise sadece çekme etkisiyle deforme olduğu varsayılmaktadır. Bu teoriye göre kayma gerilmesi bindirme uçlarında maksimum değerler alırken, orta kısımda ise minimum değerler alır. Volkersen teorisinden farklı olarak, Goland & Reissner (1944), levhaların eğilme etkisini de hesaba katmışlardır. Tek bindirmeli birleştirmelerde eksantrik yüklemekten dolayı eğilme momenti oluşur. Eğilme momentinin etkisi altında özellikle bindirme uçlarında yapıştırıcılar için yıkıcı olan soyulma gerilmeleri oluşur. Yapıştırıcının plastik davranışı Hart Smith (1973) teorisinde dikkate alınır. Bu teori, sünek yapıştırıcıların kullanıldığı birleştirmelerde tercih edilebilir. Bu teoride kayma gerilmeleri elastik ve plastik olarak hesaplanabilirken, soyulma gerilmeleri sadece elastik olarak hesaplanabilir.

Analitik modeller, bağlantılardaki gerilmeler hakkında fikir verse de, sayısal yöntemlerin, gerilme ve gerinim analizi için daha iyi bir araç sağladığı kanıtlanmıştır. Sınırlı özelliklere sahip bağlantılar için analitik modeller geliştirilmiştir, ancak sayısal tekniklerde analiz için gerekli parametreler bilinirse sınırlamalar yoktur. En çok kullanılan sayısal çözüm tekniği, herhangi bir geometrinin kolayca modellenebildiği Sonlu Elemanlar Modeli'dir (SEM). Kapalı form analizine dayalı analitik çalışmalarda, yapıştırıcı kalınlığı boyunca soyulma ve kayma gerilmelerinin sabit olduğu ve yapıştırılan malzemelerin sadece çekme etkisiyle deforme olduğu varsayılmıştır. Sürekli ortam mekaniği yaklaşımının bir parçası olarak kapalı form analizlerinin kullanımı, oldukça idealleştirilmiş bağlantılarla sınırlıdır ve yapıştırıcının doğrusal olmayan davranışı ihmal edilir. Bu nedenle yapıştırma bağlantılarının analizi SEM başta olmak üzere sayısal yöntemler kullanılarak daha kapsamlı bir şekilde yapılabilmektedir (Adams & Peppiatt, 1974; Crocombe, 1989; Odi & Friend, 2004). SEM, Adams'ın öncü çalışmalarından sonra yapıştırma bağlantılarını araştırmak için en yaygın kullanılan analiz yöntemi haline geldi (Adams & Wake, 1984; Adams ve ark., 1986). SEM'de geometrik ve malzeme doğrusalsızlıklarının analize kolayca uyarlanabilmesi, matematiksel iş yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır.

Literatürde birçok yapıştırıcı hasar tahmin kriteri bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları; maksimum değer kriteri, limit durum kriteri ve Koheziv Bölge Modeli yaklaşımıdır. Hasar tahmini için hangi kriterin en uygun olduğu konusunda net bir şey söylemek zordur. Yapıştırıcı özellikleri ve bağlantı geometrisi seçilecek hasar kriterlerini etkilemektedir. Ayrıca yapıştırıcı hasar kriterinin kullanılabilmesi için yapıştırıcı tabakasının birleştirilmesinin en zayıf kısmı olması ve yapıştırıcının, yapıştırılan kısımlardan önce zarar görmüş olması gerekmektedir. Tek bindirmeli bağlantılar, yapıştırma bağlantılarının gerilme analizinde en sık kullanılan bağlantı geometrisidir. Tek tesirli bağlantılar kullanılarak yapıştırıcıların kayma ve soyulma özellikleri kolayca analiz edilebilir. Bindirme uzunluğu boyunca gerilme dağılımları, analitik yöntemler kullanılarak hesaplanabilir. Analitik yöntemlerin temel hasar tahmin yöntemi, yapıştırıcı bölgesindeki maksimum gerilme değerlerini hesaplayarak bu gerilmeyi yapıştırıcı mukavemeti ile karşılaştırmaktır. Teorik yöntemler, yapıştırma bağlantılardaki gerilme dağılımı ve hasar durumu hakkında önemli bilgiler sağlasa da, yalnızca basit geometrilere uygulanabilir. Gelişen bilgisayar teknolojisi tüm mühendislik problemlerinde olduğu gibi yapıştırma bağlantılarında da sayısal çözümleri vazgeçilmez yapmıştır. Özellikle SEM'i kullanan yazılımların geliştirilmesiyle, yapıştırma bağlantılarının geometri sınırlaması olmadan daha etkin bir şekilde analiz edilebilmesi sağlanmıştır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde analitik modellerin büyük çoğunluğu iki boyutludur. Bu modellerde düzlem gerilme veya düzlem şekil değiştirme yaklaşımları kullanılmıştır. Malzemelerin plastik davranışlarının dikkate alınması analizi çok karmaşık hale getirdiğinden, çoğu analizde yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler elastik olarak modellenir. Yapıştırıcının sünekliği veya kırılma eğilimi, eğilme etkisinin derecesi, yapıştırılan malzemelerin mekanik davranışı gibi birçok faktör çözümü ve dolayısıyla çözüm için kullanılacak yöntemi etkiler. Literatürdeki çalışmalar düşünüldüğünde, genel olarak yapıştırma bağlantıları ile ilgili hasara analiz çalışmaları bulunmakla birlikte, yapıştırıcının mekanik davranışına göre hangi hasar tahmin yönteminin optimum sonuçlar vereceği konusunda belirgin bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, gevrek yapıdaki Araldite AV138 ve sünek yapıdaki Araldite 2015 epoksi yapıştırıcılar kullanılarak oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında analitik ve sayısal hasar yükleri hesaplanmıştır. Hesaplanan hasar yükleri, Özer & Öz (2017), tarafından yapılan deneysel çalışmadan alınan hasar yükleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, yapıştırıcı süneklik özelliğinin hasar yükü tahmin yöntemleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analitik hasar yüklerinin belirlenmesinde Volkersen, Goland-Reissner ve Hart Smith analitik modelleri kullanılmıştır. Sonlu Elemanlar analizleri, sürekli ortam mekaniği ve Koheziv Bölge Modeli (KBM) yaklaşımlarına göre yapılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Malzeme ve bağlantı modeli

DIN C75 yüksek dayanımlı çelik plaka, Araldite AV138 ve Araldite 2015 epoksi yapıştırıcılar kullanılarak tek tesirli yapıştırma bağlantıları modellenmiştir. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri Çizelge 1'de ve DIN C75 mekanik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Yapıştırıcıların tek eksenli çekme

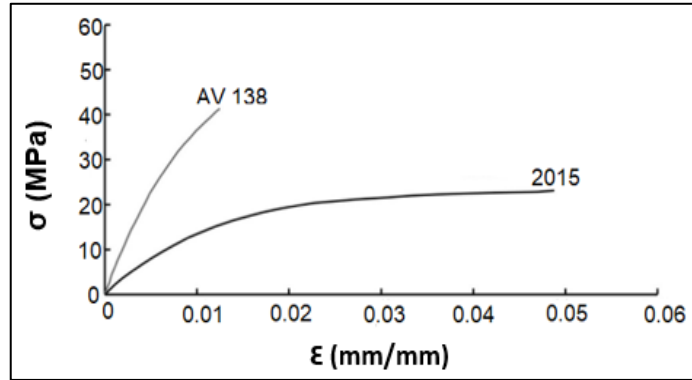
testi sonucunda elde edilen gerilme-birim uzama grafikleri Şekil 1'de gösterilmiştir (Marques & Da Silva, 2008).

Çizelge 1. Yapıştırıcı malzemelerin mekanik özellikleri (Özer & Öz, 2017)

	2015	AV 138
Elastisite modülü, E (GPa)	1.85	4.89
Poisson oranı, ν	0.33	0.35
Çekme dayanımı, σ_f (MPa)	21.63	39.45
Akma dayanımı, σ_y (MPa)	12.63	36.49
Kopma yüzde uzaması, ϵ_t (%)	4.77	1.21
Kayma modülü, G (GPa)	0.56	1.56
Kayma dayanımı, τ_f (MPa)	17.9	30.2
Kayma akma dayanımı, τ_y (MPa)	14.6	25.1
Kayma kopma yüzde uzaması, γ_t (%)	43.9	7.8

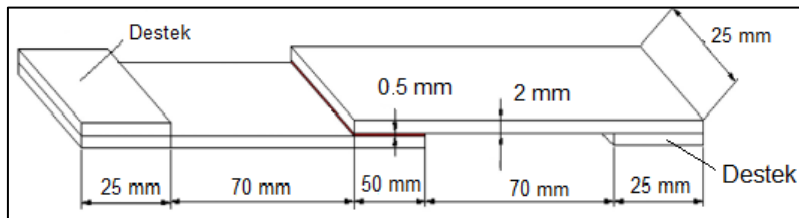
Çizelge 2. DIN C75 mekanik özellikleri (Özer & Öz, 2017)

Elastisite modülü, E (MPa)	198300
Poisson oranı, ν	0.29
Çekme dayanımı, σ_f (MPa)	1413
Akma dayanımı, σ_y (MPa)	1260



Şekil 1. Yapıştırıcıların gerilim-gerinim eğrileri (Marques & Da Silva, 2008).

Çalışmada modellenen tek bindirme bağlantısı boyutları Şekil 2'de gösterilmiştir. Bağlantı geometrisi Özer & Öz (2017) tarafından yapılan çalışmaya uygun olarak belirlenmiştir. Özer & Öz (2017), tek tesirli bindirme bağlantılarında AV138 ve Araldite 2015 yapıştırıcılarını aynı koşullar altında kullanarak deneysel hasar yüklerini elde etmişlerdir (Çizelge 3).



Şekil 2. Tek tesirli bindirme bağlantı modeli.

Çizelge 3. Deneysel kırılma yükleri (Özer & Öz, 2017)

Araldite 2015 hasar yükü (N)	20760
Araldite AV138 hasar yükü (N)	14510

2.2. Yapıştırma bağlantıları ile ilgili analitik yöntemler

Bu çalışmada Volkersen, Goland-Reissner ve Hart Smith modelleri analitik yöntemle hasar yüklerini belirlemek için tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan analitik yöntemlerin açıklamaları ve hasar yükü analizinde kullanılan denklemler detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.

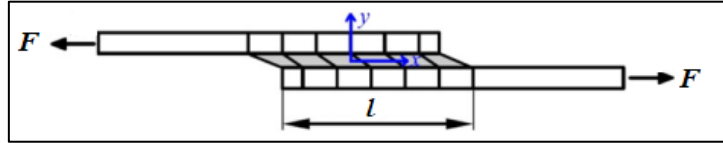
2.2.1. Volkersen modeli

Volkersen modelinde yapıştırıcı tabakadaki kayma gerilmesi dağılımı Denklem (1) ile hesaplanır. Bindirme bölgesinin merkezinden kenarlara kadar olan x mesafesi Denklem (1)' e girilir ve bindirme bölgesinin merkezinden uçlarına kadar olan gerilme dağılımları elde edilir.

$$\tau(x) = \frac{F\omega \cosh(\omega x)}{2b \sinh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} + \left(\frac{t_t - t_b}{t_t + t_b}\right) \left(\frac{\omega l}{2}\right) \frac{\sinh(\omega x)}{\cosh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{G_a}{E t_t t_a} \left(1 + \frac{t_t}{t_b}\right)} \quad (2)$$

Denklem (1) ve Denklem (2)' de, t_t üst levha kalınlığı, t_b alt levha kalınlığı, t_a yapıştırıcı kalınlığı, b levha genişliği, l bindirme bölgesi uzunluğu, E levha elastisite modülü, G_a yapıştırıcı kayma modülünü ve F bağlantıya uygulanan yükü temsil eder. Volkersen modelinde yapıştırıcının sadece kayma gerilmesi etkisiyle hasara uğrayacağı varsayımı yapılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Volkersen modeli.

2.2.2. Goland Reissner modeli

Goland ve Reissner modelinde, bağlantıya uygulanan çekme kuvvetinin neden olduğu eğilme etkisi hesaba dahil edilir (Şekil 4). Eğilme etkisinin gerilme analizinde dikkate alınmasıyla, özellikle tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı hattındaki soyulma gerilmesi dağılımını hesaplamak mümkündür. Yapıştırıcı tabakadaki kayma gerilmesi dağılımı Denklem (3)' e göre hesaplanır.

$$\tau(x) = -\frac{1}{8} \frac{\bar{F}}{c} \left[\frac{\beta c}{t} (1 + 3k) \frac{\cosh\left(\left(\frac{\beta c}{t}\right) \left(\frac{x}{c}\right)\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right] \quad (3)$$

$$k = \frac{\cosh(\Phi c)}{\cosh(\Phi c) + 2\sqrt{2} \sinh(\Phi c)} \quad (4)$$

$$\Phi = \sqrt{\frac{3(1 - \nu^2)}{2}} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{\bar{F}}{tE}} \quad (5)$$

$$\beta^2 = 8 \frac{G_a}{E} \frac{t}{t_a} \quad (6)$$

Denklem (3)' te kullanılan; \bar{F} birim genişliğine uygulanan çekme yükü, c bindirme uzunluğunun yarısı, t yapıştırılan levhanın kalınlığı, k eğilme momenti faktörü, ν poisson oranıdır. Goland-Reissner teorisine göre soyulma gerilmesi dağılımı Denklem (7)' ye göre hesaplanır.

$$\sigma = \frac{1}{\Delta} \frac{\bar{F}t}{c^2} (A + B) \quad (7)$$

$$A = \left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cos \lambda \cosh(\lambda) \right) \cosh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \quad (8)$$

$$B = \left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sin \lambda \sinh(\lambda) \right) \sinh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \sin\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \quad (9)$$

$$k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1 - \nu^2) \frac{\bar{F}}{tE}} \quad (10)$$

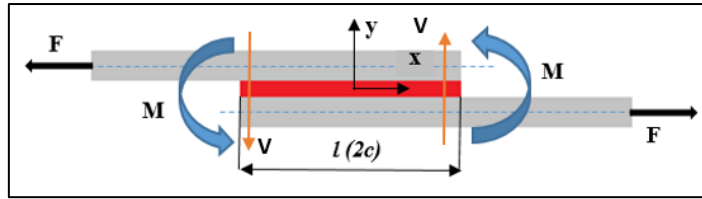
$$\lambda = \gamma \frac{c}{t} \quad (11)$$

$$\gamma^4 = 6 \frac{E_a}{E} \frac{t}{t_a} \quad (12)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} (\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)) \quad (13)$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (14)$$

$$R_2 = -\cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (15)$$



Şekil 4. Goland Reissner modeli.

2.2.3. Hart Smith modeli

Hart Smith modelinde, yapıştırıcı tabakasındaki soyulma ve kayma gerilmeleri dağılımları hesaplanabilmektedir. Kayma gerilmeleri elastik ve elasto-plastik olarak hesaplanır ve soyulma gerilmeleri sadece elastik olarak hesaplanır. Bu modelde Goland-Reissner modelinde olduğu gibi tek bindirmeli birleştirmelerde meydana gelen eğilme etkisi hesaplamalarda dikkate alınmaktadır. Hart Smith modelinde yapıştırıcının plastik deformasyon özelliği dikkate alınmıştır. Plastik deformasyon özelliği dikkate alındığında, gerilmeye dayalı hasar kriteri yerine gerinmeye dayalı hasar kriteri kullanılmaktadır. Hart Smith Modeline göre, yapıştırıcı hattındaki kayma gerilmesi dağılımı Denklem (16) kullanılarak elastik olarak hesaplanabilmektedir.

$$\tau(x) = A_2 \cosh(2\lambda'x) + C_2 \quad (16)$$

$$\lambda' = \sqrt{\left[\frac{1 + 3(1 - \nu^2)}{4} \right] \frac{2G_a}{t_a E t}} \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{G_a}{t_a E t} \left[\bar{F} + \frac{6(1 - \nu^2)M}{t} \right] \frac{1}{2\lambda' \sinh(2\lambda'c)} \quad (18)$$

$$C_2 = \frac{1}{2c} \left[\bar{F} - \frac{A_2}{\lambda'} \sinh(2\lambda'c) \right] \quad (19)$$

$$M = \bar{F} \left(\frac{t + t_a}{2} \right) \frac{1}{1 + \xi c + \left(\frac{\xi^2 c^2}{6} \right)} \quad (20)$$

$$\xi^2 = \frac{\bar{F}}{D} \quad (21)$$

$$D = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (22)$$

\bar{F} , G_a , t_a , E , E_a , ν , t , c değişkenleri, Volkersen ve Goland-Reissner teorisinde verilen değişkenlerle aynıdır. Hart Smith Teorisine göre, yapıştırıcı tabakasındaki soyulma gerilmesi dağılımı Denklem (23) ile hesaplanır.

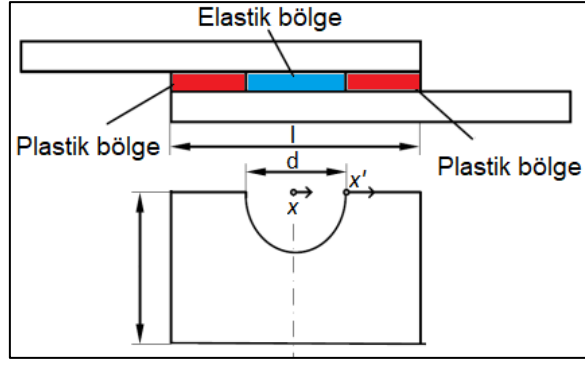
$$\sigma(x) = A \cosh(\chi x) \cos(\chi x) + B \sinh(\chi x) \sin(\chi x) \quad (23)$$

$$B = \frac{E_a M [\sin(\chi c) + \cos(\chi c)]}{D t_a \chi^2 e^{\chi c}} \quad (24)$$

$$A = \frac{-E_a M [\sin(\chi c) - \cos(\chi c)]}{D t_a \chi^2 e^{\chi c}} \quad (25)$$

$$\chi^4 = \frac{E_a}{2D t_a} \quad (26)$$

Hart Smith modelinde, yapıştırıcının elastik-plastik davranışı dikkate alınarak, Denklem (27)'ye göre kayma gerilmeleri hesaplanabilir. Bu yaklaşıma göre yapıştırıcı tabaka üç bölgeye ayrılır, orta kısım elastik bölge, kenarlar ise plastik bölge olarak tanımlanır (Şekil 5).



Şekil 5. Hart Smith Modeli yapıştırıcı tabakasındaki bölgeler.

$$\tau(x) = A_2 \cosh(2\lambda'x) + \tau_p(1 - K) \quad (27)$$

τ_p , yapıştırıcının plastik kayma gerilmesidir.

$$A_2 = \frac{K\tau_p}{\cosh(\lambda'd)} \quad (28)$$

K ve d , Denklem (29), Denklem (30) ve Denklem (31) kullanılarak yinelemeli yaklaşımla elde edilir.

$$\frac{\bar{F}}{l\tau_p}(\lambda'l) = 2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) + (1-K)(\lambda'd) + K \tanh(\lambda'd) \quad (29)$$

$$\left[1 + 3k(1 - \nu^2) \left(1 + \frac{t_a}{t} \right) \right] \frac{\bar{F}}{\tau_p} \lambda^2 \left(\frac{l-d}{2} \right) = 2 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_e} \right) + K \left[2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) \right]^2 \quad (30)$$

$$2 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_e} \right) = K \left\{ \left[2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) + \tanh(\lambda'd) \right]^2 - \tanh^2(\lambda'd) \right\} \quad (31)$$

γ_e ve γ_p , elastik ve plastik kayma şekil değiştirmeleridir.

2.3. Sonlu elemanlar analizi

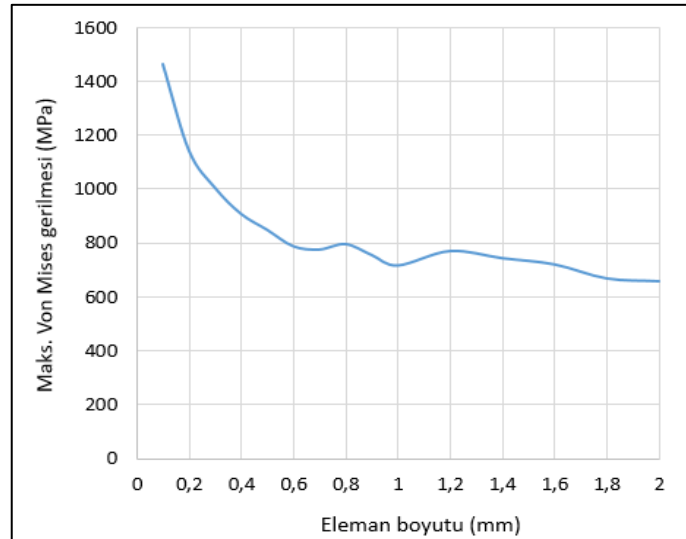
Çoğu analitik yöntemde, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mükemmel elastik kabulüne göre çözümler yapılır. Analitik yöntemlerde malzeme doğrusalsızlıklarının dikkate alınması problemi ve çözümü karmaşık hale getirir. Günümüzde, karmaşık ve analitik olarak çözümü zor olan problemleri çözmek için SEM kullanılmaktadır. Sonlu Elemanlar çalışması, malzeme ve geometrik doğrusalsızlıklar dikkate alınarak ANSYS 2023 R2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcı ve bağlı malzemelerin plastikleşme davranışı, BISO (Bilinear Isotropic Hardening) malzeme modeli kullanılarak karakterize edilmiştir. BISO malzeme modelinde, malzemelerin, tek eksenli çekme testinden elde edilen akma dayanımları ve Tanjant Modüllerinin analiz programına girilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin akma dayanımları Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Yapıştırıcıların Tanjant Modülleri, Şekil 1'de gösterilen gerilme-gerinim eğrileri kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre, malzemelerin gerilme birim şekil değiştirme eğrilerinin akma dayanımı ve çekme dayanımı noktaları grafik üzerinden işaretlenerek birleştirilmiştir. Elde edilen doğruların eğimi hesaplanarak tanjant modülleri bulunmuştur. Araldite 2015 ve AV138 yapıştırıcılarının Tanjant Modülleri sırasıyla 228 MPa ve 1680 MPa olarak hesaplanmış ve programa girilmiştir. DIN C75 çeliğinin Tanjant Modülü 765 MPa alınmıştır.

Sayısal çalışmada iki farklı yöntem kullanılarak hasar yükleri belirlenmiştir. Bunlar, yapıştırıcı tabakadaki maksimum Von Mises gerilmesi ve Koheziv Bölge Modeli (KBM) yöntemleridir. Yapıştırma bağlantısı, deneysel çalışmada kullanılan numune boyutlarına göre 2 boyutlu olarak modellenmiştir. Çözümde düzlem gerilme yaklaşımı kullanılmıştır.

2.3.1. Ağ yapısı belirleme çalışması

Sonlu elemanlar çalışmalarında ağ yapısı sonuçları etkilemektedir. Ağ yapısını etkileyen en önemli faktör ise birim eleman boyutudur. Eleman boyutunun ideal değerden büyük seçilmesi çözüm sürelerini kısaltmasına rağmen sonucun gerçek değerden oldukça farklı olmasına neden olmaktadır. Eleman boyutunun uygun değerden çok küçük olması ise çözüm sürelerinin çok uzamasına ve sonuçların gerçek değerden büyük olmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla bir sonlu eleman çalışmasında, ağ yapısının oluşturulması aşaması çalışmanın doğruluğu ile yakından ilişkilidir. Literatürde ağ yakınsama çalışması olarak adlandırılan ön çalışmanın yapılması önerilmektedir.

Bu çalışmada eleman boyutları 0.1 mm ile 2 mm arasında değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda Şekil 6'da görüldüğü gibi 0.6 mm ve 1.2 mm aralığında olan eleman boyutlarında yapılan analizlerde gerilme değerleri arasındaki değişim azalmıştır. Buna göre eleman boyutunun 0.6 mm olmasına karar verilmiştir.



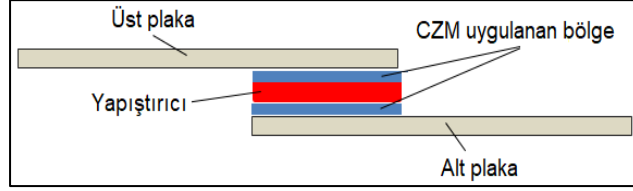
Şekil 6. Ağ yapısı yakınsama çalışması grafiği.

İki boyutlu yapıştırma bağlantı modelinin dikdörtgenel yüzeylere sahip olmasından dolayı 8 düğümlü quad-8 eleman kullanılmıştır. Yapılan bölüntüleme (mesh) işlemi sonucunda eleman sayısı 1765, düğüm (node) sayısı ise 6372 olmuştur. Ağ yapısı kalitesi değerlendirmelerinde kullanılan ortalama skewness değeri 1.5307e-004 olarak bulunmuştur. Skewness değeri, ideal eleman boyutu ile mevcut eleman boyutu arasında yapılan karşılaştırmaya göre yazılım tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır. Skewness değerinin sıfıra yaklaşması ideal eleman boyutuna yaklaşmak anlamına geldiğinden mesh kalitesinin arttığını göstermektedir. Skewness değerinin artması ise mesh kalitesinin düştüğünü göstermektedir. Diğer mesh kalitesi değerlendirme yöntemlerine göre, ortalama aspect ratio değeri 1.1579, ortalama jacobian ratio değeri (MPADL) 1.0002, ortalama element quality değeri 0.98878 çıkmıştır. Bu ağ kalitesi değerlendirme kriterlerine göre hesaplanan değerler mükemmel yakın bir ağ yapısı oluşturulduğunu kanıtlamaktadır.

2.3.2. Koheziv bölge modeli (KBM)

Kırılma mekaniği tabanlı bir yaklaşım olan KBM yöntemi, kompozit malzemelerde ve yapıştırma bağlantılarında ara yüzey ayrılmasının modellendiği oldukça kullanışlı bir yöntemdir. (Campilho ve ark., 2011; Noorman, 2014; Waseem & Kumar, 2014; Fiamegkou, 2015). KBM

yaklaşımında, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tepe noktasına kadar elastik şekil değişimi olduğu, eğrinin en üst noktasından sonra hasar başlayarak kopma meydana geldiği ifade edilmektedir (Saraç, 2021a). Bu çalışmada, yapıştırıcı tabakasının alt ve üst plakalarla oluşturduğu ara yüzlere KBM modeli uygulanmıştır (Şekil 7). KBM yönteminin uygulandığı ara yüzler koheziv elemanlarla temsil edilir ve çekme-ayırma kanunları uygulanır.



Şekil 7. Yapıştırıcıda KBM uygulanmış bölgeler.

Ara yüzelerde çekme-ayırma kanunlarının uygulanabilmesi için yapıştırıcıların KBM parametrelerinin bilinmesi gerekir. Bu çalışmada kullanılan Araldite 2015 ve AV138 yapıştırıcılarının KBM parametreleri Çizelge 4' te verilmiştir (Pinto ve ark., 2014). Bu parametreler maksimum normal kontak gerilmesi (t_n^0), maksimum teğetsel kontak gerilmesi (t_s^0), normal kritik kırılma enerjisi (G_n^0) ve teğetsel kritik kırılma enerjisi (G_s^0)'dir.

Çizelge 4. Araldite 2015 ve AV138 KBM parametreleri

KBM parametreleri	AV138	2015
t_n^0 (MPa)	39.4	21.63
t_s^0 (MPa)	30.2	17.9
G_n^0 (N/mm)	0.20	0.43
G_s^0 (N/mm)	0.38	4.70

2.4. Hasar kriterleri

Literatürde yapıştırma bağlantılarıyla ilgili birçok hasar kriteri vardır. Bu kriterler iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlardan ilki, yapıştırılan malzemenin özellikle kompozit malzemelerin hasarı, ikincisi ise yapıştırıcı hasar kriterleridir. Bu çalışmada yapıştırılan malzeme çelik olarak seçildiğinden yapıştırıcı hasarına odaklanılmıştır. Yapıştırıcı hasarı ile ilgili, maksimum değer, belirli bir bölgedeki kritik gerilme veya gerinme, limit durum ve kırılma mekaniği kriterleri literatürde yer almaktadır (Rodríguez ve ark., 2012; Odi & Friend, 2004).

2.4.1. Maksimum değer kriteri

Bu kriter yapıştırıcılar için en çok kullanılan hasar kriteridir. Bu kriter gere göre yapıştırıcı tabakasında hesaplanan maksimum gerilme veya gerinme değerleri yapıştırıcının kritik dayanım değerlerinin üzerinde ise hasar beklenir. Analitik yöntemlerin gelişimine paralel olarak, bu hasar kriterleri ve tasarım yöntemleri de gelişmiştir. Örneğin, Volkersen modelinde yapıştırıcının sadece kayma gerilmesi ile deforme olduğu varsayıldığından, sonuç olarak maksimum kayma gerilmesi kriteri kırılma kriteri olarak ortaya çıkmıştır.

Maksimum soyulma gerilmesi, Hart Smith (1973), tarafından hasar kriteri olarak benimsenmiştir. Yapıştırıcılar üzerindeki yıkıcı etkileri nedeniyle, tasarım aşamalarında soyulma gerilmeleri en aza indirilmelidir. Harris & Adams (1984), maksimum asal gerilme ve gerinme kriterlerini kullanarak yaptıkları elastoplastik sonlu elemanlar analizleri sonucunda tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının dayanımını yaklaşık %10'luk bir doğrulukla tahmin etmişlerdir.

Crocombe ve ark. (1990), maksimum asal gerilim kriterinin kırılma yapıştırıcılar için daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ikegami ve ark. (1990), maksimum Von Mises gerilme kriterini kavisli birleştirmeler için hasar kriteri olarak kullanmıştır. Charalambides ve ark. (1996), maksimum Von Mises gerilme kriterinin çift bindirmeli yapıştırma bağlantılarında etkisiz olduğunu belirtmişlerdir.

Maksimum asal gerilme kriteri [Turan & Kaman \(2010\)](#), tarafından yapılan çalışmada yapıştırıcı hasar değerlendirmesinde kullanılmıştır.

Von Mises gerilme kriterinin, polimerlerin deformasyon davranışını önemli ölçüde etkileyen hidrostatik gerilmeyi hesaba katmadığı için polimerlerin analizinde kullanılması doğru bir yaklaşım olmadığı belirtilmiştir ([Odi & Friend, 2004](#); [Rodríguez ve ark., 2012](#)).

Maksimum kayma gerilmesi kriteri, [Lee & Lee \(1992\)](#), tarafından silindirik birleştirme bağlantıları için kullanılmıştır. [Crocombe & Adams \(1982\)](#), soyulma testi numunelerinde tek eksenli plastik gerinim kriterini kullanmışlardır.

Maksimum gerilme veya gerinim kriterleri için sorun, gerilme veya gerinim değerlerinin tekilliklerden kaynaklı çok yüksek değerler almasıdır. Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırma bölgelerinin uçlarında her zaman tekillikler ile karşılaşılır. Tekillikleri en aza indirmek için sayısal çözümlerde ağ yapısını iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Literatür incelendiğinde, özellikle tek bindirmeli yapıştırma birleştirme modellerinde bindirme uçlarındaki tekillikleri azaltmak için birçok sayısal çalışmaya rastlanmaktadır ([Kırkayak, 2019](#); [Saraç, 2020](#); [Saraç, 2021b](#)). Bu çalışmalarda, bağlantı geometrisinde yapılan tasarım değişiklikleri ile bindirme uç bölgesindeki gerilmelerin önemli oranlarda azaltılabileceği gösterilmiştir.

2.4.2. Von Mises akma kriteri

Von Mises kriteri, gerilme tensöründeki deviatorik gerilmeye dayalı olarak geliştirilmiştir. Von Mises kriterine göre eşdeğer gerilme, asal gerilmeler ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) kullanılarak Denklem (32)' e göre hesaplanır.

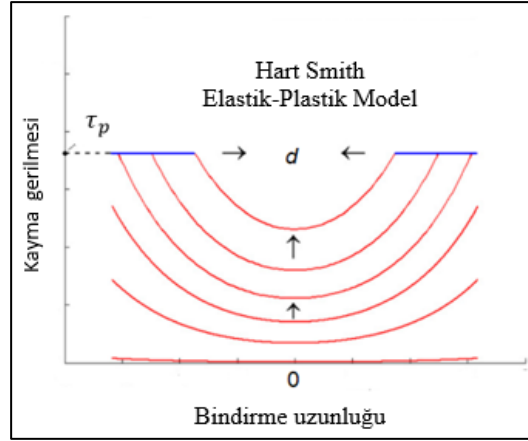
$$\sigma_{VM} = \sqrt{\{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]\}/2} \quad (32)$$

Yapıştırıcı tabakasındaki Von Mises gerilme dağılımları, Sonlu Elemanlar yöntemine göre çözüm üreten programlar kullanılarak hesaplanabilir. Buna göre, yapıştırıcı tabakasındaki hesaplanan maksimum Von Mises gerilmesi, yapıştırıcının tek eksenli çekme testinde elde edilen akma dayanımına ulaştığında akmanın başladığı kabul edilir.

2.4.3. Limit durum kriteri

Bu kriter ilk olarak [Crocombe \(1989\)](#), tarafından ortaya atılmıştır. Limit durum kriterinin ana yaklaşımı, yapıştırıcıya etki eden yükün belirli bir değerden sonra önemli ölçüde artmayacağı ve yapıştırıcının kritik bir uzamaya kadar plastik olarak akacağı prensibine dayanmaktadır. Bu kriter, sınırlı ölçüde yapıştırma bağlantıları için geçerlidir. Yapısal yapıştırıcıların çoğu yeterince sünek olmadığından, akma dayanımı aşıldığında kırılma meydana gelir.

Hart Smith Modelinde yapışkan tabaka ortadaki elastik bölge ve kenarlardaki plastik bölge olmak üzere üç kısma ayrılır. Yük arttıkça plastik bölge de genişler (Şekil 8). Yapıştırıcı bölge uygulanan yük artışı ile tamamen plastik olduğunda ($d=0$) bağlantı maksimum taşıma kapasitesine ulaşır. Bu durum literatürde global akma olarak adlandırılmaktadır. Sonuç olarak, bu kriteri göre yapıştırıcının tamamen plastikleşmesiyle hasarın oluşacağı varsayılmıştır. Global akma hasar kriteri, sünek yapıştırıcılar kullanıldığında deneysel sonuçlarla daha iyi uyum sağlamaktadır.



Şekil 8. Hart Smith modelinde yapıştırıcı plastikleşmesi.

Hart-Smith tarafından önerilen elastik-plastik modelin formülasyonu oldukça karmaşıktır ve çözümü iteratif bir yaklaşım gerektirir. Ancak bazı basitleştirmeler yaparak hasar yükü hesaplanabilir. Denklem (29) yeniden yazılırsa:

$$\frac{\bar{F}}{l\tau_p}(\lambda'l) = 2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) + (1-K)(\lambda'd) + K \tanh(\lambda'd)$$

Global akma kriterine göre $d=0$ ise, Denklem (33) elde edilir.

$$\bar{F} = \frac{F}{b} = l\tau_p \quad (33)$$

Denklem (33)'e göre, hasar yükü yalnızca yapıştırıcının kayma akma dayanımına (τ_p), bindirme uzunluğuna (l) ve bağlantı genişliğine (b) bağlıdır. Buna göre hasar yükü Denklem (34) kullanılarak hesaplanabilir.

$$F_{HASAR} = bl\tau_p \quad (34)$$

3. Bulgular

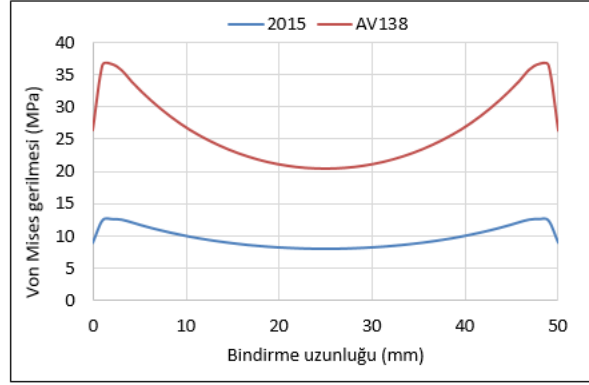
Bu çalışmada Volkersen, Goland-Reissner ve Hart Smith analitik yöntemleri ve SEM kullanılarak hasar yükleri hesaplanmıştır. Elde edilen analitik ve sayısal hasar yükleri, literatürden alınan deneysel hasar yükleri ile karşılaştırılmıştır.

Sonlu elemanlar çalışmasına göre hasar yükü sürekli ortam mekaniği yaklaşımına göre yapıştırıcı tabakasındaki maksimum Von Mises eşdeğer gerilmesine göre ve KBM yaklaşımına göre hesaplanmıştır. Von Mises eşdeğer yaklaşımına göre, yapıştırıcı tabakasındaki maksimum Von Mises gerilmesi, yapıştırıcının akma dayanımına eşit olduğu durumdaki yük hasar yükü olarak kabul edilmiştir. Yapıştırıcı tabakasındaki Von Mises gerilme dağılımları, Şekil 9' da gösterilen A-B hattından alınmıştır. Gerilme tekilliği, ağ yapısı ve geometrik faktörler nedeniyle sonlu elemanlar çalışmalarında dikkate alınması gereken bir konudur. Yapıştırma bağlantılarında, gerilme tekilliği etkisini en aza indirmenin en yaygın yolu, yapıştırıcı tabakasının orta hattındaki gerilme dağılımını referans almaktır. Bu yöntem literatürde orta çizgi (centerline) yöntemi olarak yer almaktadır (Yue & Wahab, 2014). Yapıştırıcı tabakasında orta çizgi yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 9. SEM çözümlerinde gerilmelerin alındığı çizgi.

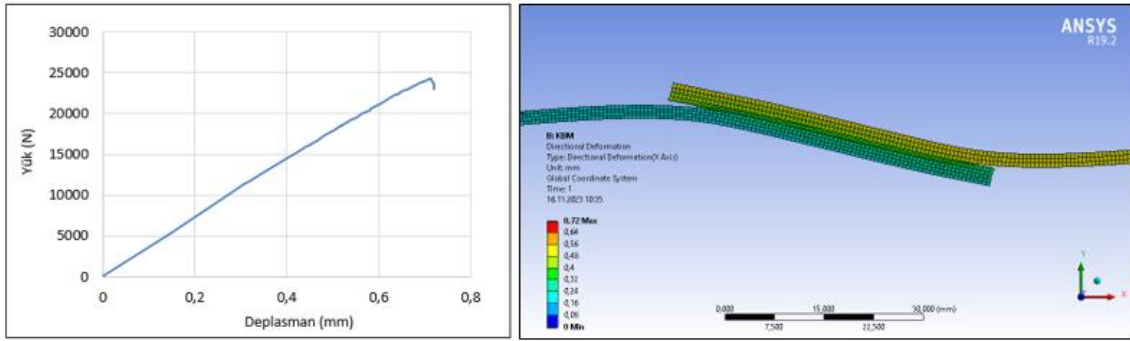
Şekilde 10'da A-B hattındaki, Von Mises gerilme dağılımı gösterilmiştir. Von Mises gerilme dağılımları her iki yapıştırıcı için hasar yükleri uygulanarak elde edilmiştir.



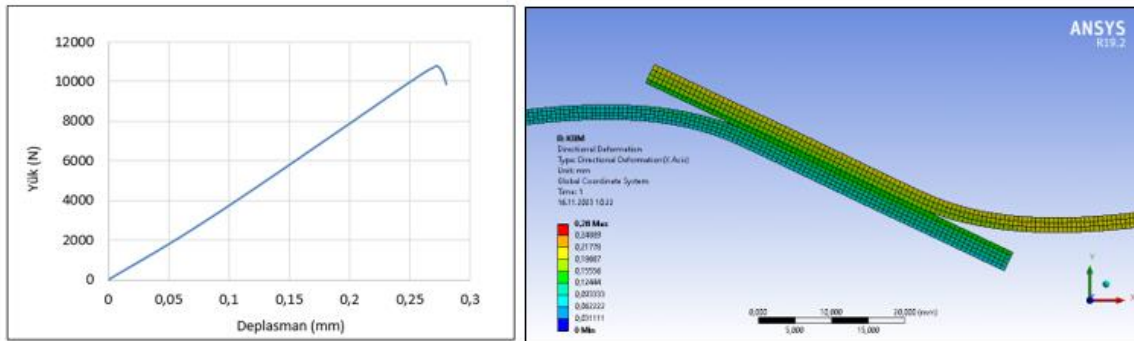
Şekil 10. Hasar yüklerine göre A-B hattı Von Mises gerilme dağılımları.

Şekilde 11 ve 12'de her iki yapıştırıcı için KBM çözümleri gösterilmiştir. KBM çözümleri sonucu elde edilen kuvvet deplasman grafiklerindeki maksimum yük değeri hasar yükü olarak kabul edilmiştir.

Analitik hasar yükü hesaplamaları ise Bölüm 2'de gösterilen analitik denklemler kullanılarak yapılmıştır.

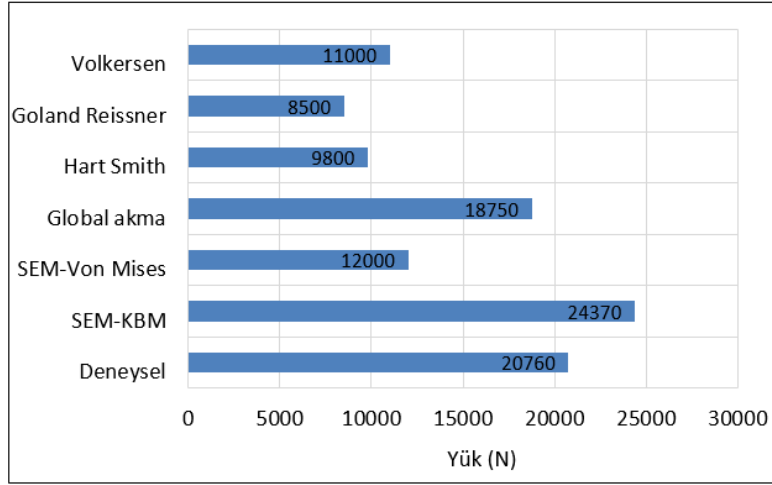


Şekil 11. 2015 yapıştırıcı KBM çözümü ve yük-deplasman grafiği.

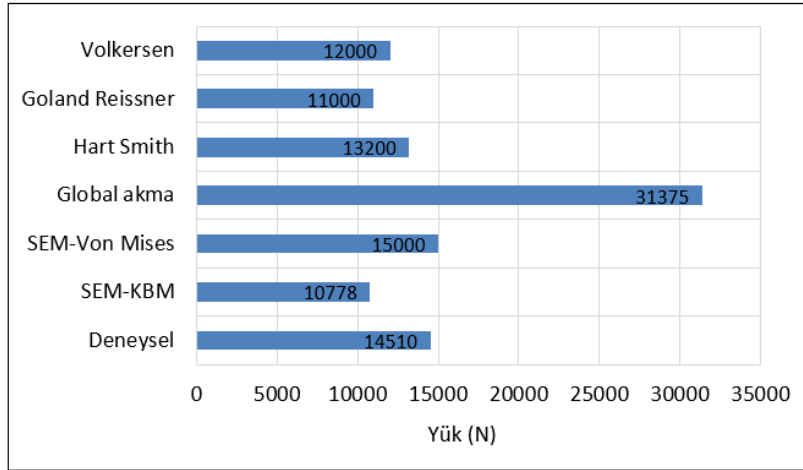


Şekil 12. AV138 yapıştırıcı KBM çözümü ve yük-deplasman grafiği.

Araldite 2015 ve AV138 yapıştırıcıları için hesaplanan hasar yükleri Şekil 13 ve Şekil 14' te gösterilmektedir.



Şekil 13. 2015 yapıştırıcı hasar yükleri.



Şekil 14. AV138 yapıştırıcı hasar yükleri.

Çizelge 5' te analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak elde edilen hasar yüklerinin kullanılan yapıştırıcı tipine bağlı olarak deneysel sonuçlardan sapma oranları verilmiştir.

Çizelge 5. Deneysel sonuçlardan sapma oranları

Hasar tahmin yöntemi	AV138	2015
SEM-KBM	% 25	% 17
SEM-Maks. Von Mises gerilmesi	% 3	% 42
Hart-Smith modeli	% 9	% 53
Volkersen modeli	%17	% 47
Goland Reissner modeli	% 24	% 59
Global akma kriteri	% 116	% 9

Çizelge 5 incelendiğinde, sünek karakterli Araldite 2015 yapıştırıcı kullanıldığında, bulunan hasar yükleri içerisinde deneysel sonuçlara en yakın hasar yükü Global akma kriterine göre yapılan

hesaplama %9 sapma oranıyla elde edilmiştir. Deneysel sonuçlardan sapma oranları; SEM-KBM yaklaşımında %17, SEM-Von Mises yaklaşımında %42, Volkersen modelinde %47, Hart Smith modelinde %53, Goland Reissner modelinde %59 bulunmuştur. Gevrek ve yüksek dayanımlı Araldite AV138 yapıştırıcı kullanıldığında, bulunan hasar yükleri içerisinde deneysel sonuçlara en yakın hasar yükü SEM-Von Mises yaklaşımına göre yapılan hesaplamada %3 sapma değeriyle elde edilmiştir. Deneysel sonuçlardan sapma oranları; Hart Smith modelinde %9, Volkersen modelinde %17, Goland Reissner modelinde %24, SEM-KBM yaklaşımında %25 bulunmuştur. Global akma kriteri kullanıldığında, hasar yüklerinin deneysel sonuçlardan sapma oranı %116 olarak çok yüksek bir değer çıkmıştır.

Analitik yaklaşımlar, kırılgen yapıştırıcı (AV138) kullanıldığında deneysel sonuçlarla daha uyumludur. Bunun nedeni, kırılgen yapıştırıcının düşük deformasyon özelliklerine sahip olması ve bu nedenle tam elastik davranışa yakın bir özellik sergilemesidir. 2015 sünek yapıştırıcının, çekme-uzama eğrisi incelendiğinde plastisite özelliğinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla elastik olarak modellenen analitik yaklaşımlara göre hasar yüklerindeki sapmaların deneysel sonuçlara göre yüksek olması normaldir.

Global akma kriterlerine göre hasar yükleri incelendiğinde kırılgen karakterde ve dolayısıyla plastisite özelliği çok düşük olan AV138 yapıştırıcının kullanıldığı bağlantılarda sapma oranı çok yüksektir. Global akma kriteri tanımında, yapıştırıcı üzerindeki yükün belirli bir değerden sonra artmadığı ve yapıştırıcının plastik deformasyona uğrayarak zarar gördüğü belirtilmektedir. Araldite 2015 yapıştırıcı, çok yüksek süneklığe sahip bir yapıştırıcıdır, bu nedenle Araldite 2015 yapıştırıcı kullanıldığında, Global akma kriterine göre deneysel hasar yüküne yakın bir sonuç bulunmuştur.

Von Mises eşdeğer gerilme kriterine göre yapılan hasar yükü hesaplamalarında, gevrek özellikteki AV138 yapıştırıcı kullanıldığında, deneysel sonuçlardan sapma oranının düşük olması, Von Mises kriterinin gevrek karakterli yapıştırıcıların sayısal hasar yükü belirleme çalışmalarında kullanılabilceğini göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, analitik ve nümerik yöntemler kullanılarak basit bindirmeli yapıştırma bağlantısı için hasar yükleri tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürden alınan deneysel hasar yükleri ile karşılaştırılmıştır. Yapıştırma bağlantıları, kırılgen AV138 ve sünek Araldite 2015 yapıştırıcıların mekanik özellikleri kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen genel sonuçlar aşağıda her bir yapıştırıcı türü için ayrı ayrı verilmiştir.

AV138 yapıştırıcı kullanıldığında elde edilen sonuçlar:

- Deneysel sonuçlarla en uyumlu hasar yükü, Von Mises eş değer gerilme kriterine göre yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir. Literatürde, Von Mises gerilme kriterinin, polimerlerin deformasyon davranışını önemli ölçüde etkileyen hidrostatik gerilmeyi hesaba katmadığı için polimerlerin analizinde kullanılması doğru bir yaklaşım olmadığı belirtilmiştir (Odi & Friend, 2004; Rodríguez ve ark., 2012). Ancak yapılan bu çalışmada gevrek karakterli AV138 yapıştırıcı için en iyi sonuç Von Mises eş değer gerilme yaklaşımında elde edilmiştir.
- Analitik çözümler kullanılarak belirlenen hasar yükleri arasında deneysel sonuçlardan en az sapma oranı Hart Smith modeline göre yapılan analiz sonucunda bulunmuştur.
- Global akma kriterlerine göre hesaplanan hasar yükü, deneysel sonuçlarda çok yüksek bir sapma (% 116) göstermiştir. AV138 yapıştırıcısı ile benzer mekanik davranışa sahip yapıştırıcıların hasar yükünün hesaplanmasında bu kriterin kullanılmaması gerektiği vurgulanmıştır.

2015 yapıştırıcı kullanıldığında elde edilen sonuçlar:

- Deneysel sonuçlara en yakın hasar yükü Global Akma kriterine göre yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir. Sünek yapıştırıcıların kullanıldığı yapıştırma bağlantılarının hasar tahminlerinde Global Akma kriterinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu Crocombe (1989) tarafından da vurgulanmıştır.

- Analitik yöntemlerle hesaplanan hasar yüklerinin deneysel sonuçlardan sapma oranları çok yüksek çıkmıştır (% 50 civarında). Buna göre, elastik çözümler üreten analitik modellerin sünek bir yapıştırıcıda kullanılmasının yanlış olduğu gösterilmiştir.
- Von Mises akma kriterine göre hesaplanan hasar yükünün deneysel sonuçlardan sapma oranı yüksek (% 42) çıkmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde gevrek karakterli yüksek dayanımlı yapıştırıcıların kullanıldığı tek tesirli yapıştırma bağlantılarında hasar yükü belirleme çalışmalarında Von Mises kriterinin, sünek yapıdaki yapıştırıcıların kullanıldığı tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ise Global akma kriterinin kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Kaynakça

- Adams, R. D., & Peppiatt, N. A. (1974). Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *Journal of Strain Analysis*, 9(3), 185-196. <https://doi.org/10.1243/03093247V093185>
- Adams, R. D., & Wake, W. C. (1984). The nature and magnitude of stresses in adhesive joints. In *Structural Adhesive Joints in Engineering* (pp. 14-114). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5616-2_2
- Adams, R. D., & Mallick, V. (1993). The effect of temperature on the strength of adhesively-bonded composite-aluminium joints. *The Journal of Adhesion*, 43(1-2), 17-33. <https://doi.org/10.1080/00218469308026585>
- Adams, R. D., Atkins, R. W., Harris, J. A., & Kinloch, A. J. (1986). Stress analysis and failure properties of carbon-fibre-reinforced-plastic/steel double-lap joints. *The Journal of Adhesion*, 20(1), 29-53. <https://doi.org/10.1080/00218468608073238>
- Bigwood, D. A., & Crocombe, A. D. (1989). Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 9(4), 229-242. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(89\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0143-7496(89)90066-3)
- Campilho, R. D., Banea, M. D., Pinto, A. M., da Silva, L. F., & De Jesus, A. M. P. (2011). Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(5), 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.09.008>
- Charalambides, M. N., Kinloch, A. J., & Matthews, F. L. (1996, September). *Strength prediction of bonded joints*. 83rd Meeting of the AGARD Structures and Materials Panels on Bolted/Bonded Joints in Polymeric Composites, Florence, Italy.
- Crocombe, A. D., & Adams, R. D. (1982). An elasto-plastic investigation of the peel test. *The Journal of Adhesion*, 13(3-4), 241-267. <https://doi.org/10.1080/00218468208073190>
- Crocombe, A. D. (1989). Global yielding as a failure criterion for bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 9(3), 145-153. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(89\)90110-3](https://doi.org/10.1016/0143-7496(89)90110-3)
- Crocombe, A. D., Bigwood, D. A., & Richardson, G. (1990). Analysing structural adhesive joints for failure. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 10(3), 167-178. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(90\)90100-C](https://doi.org/10.1016/0143-7496(90)90100-C)
- Da Silva, L. F., Lima, R. F., Teixeira, R. M., & Puga, A. (2008). *Closed-form solutions for adhesively bonded joints*. Reports of the project Development of the software for the design of adhesive joints, University of Porto, Portugal.
- Fiamegkou, E. (2015). *Development of improved, multi-functional, nano-structured polymer based adhesives with applications in the bonding of composite components and the repair of engineering structures with composite patches*. (PhD), University of Patras, Greece.
- Goland, M., & Reissner, E. (1944). The stresses in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics*, 11(1), A17-A27. <https://doi.org/10.1115/1.4009336>

- Harris, J. A., & Adams, R. A. (1984). Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 4(2), 65-78. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(84\)90103-9](https://doi.org/10.1016/0143-7496(84)90103-9)
- Hart-Smith, L. J. (1973). *Adhesive-bonded double-lap joints*. NASA CR-112235: National Aeronautics and Space Administration.
- Ikegami, K., Takeshita, T., Matsuo, K., & Sugibayashi, T. (1990). Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre-reinforced plastics and metals. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 10(3), 199-206. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(90\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0143-7496(90)90104-6)
- Kırkayak, L. (2019). Yapıştırma bağlantılı kompozitlerde yapıştırma geometrisinin gerilme dağılımına etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 27-33. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.54289>
- Lee, S. J., & Lee, D. G. (1992). Development of a failure model for the adhesively bonded tubular single lap joint. *The Journal of Adhesion*, 40(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/00218469208030467>
- Marques, E. A. S., & da Silva, L. F. (2008). Joint strength optimization of adhesively bonded patches. *The Journal of Adhesion*, 84(11), 915-934. <https://doi.org/10.1080/00218460802505275>
- Mortensen, F., & Thomsen, O. T. (2002). Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach. *Composites Science and Technology*, 62(7-8), 1011-1031. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00030-1)
- Noorman, D. C. (2014). *Cohesive zone modelling in adhesively bonded joints*. (MSc), Delft University of Technology, Holland.
- Odi, R. A., & Friend, C. M. (2004). An improved 2D model for bonded composite joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24(5), 389-405. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2001.06.001>
- Özer, H., & Öz, Ö. (2017). The use of the exponential Drucker-Prager material model for defining the failure loads of the mono and bi-adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 76, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.02.005>
- Pinto, A. M. G., Campilho, R. D. S. G., Mendes, I. R., & Baptista, A. P. M. (2014). Numerical and experimental analysis of balanced and unbalanced adhesive single-lap joints between aluminium adherends. *The Journal of Adhesion*, 90(1), 89-103. <https://doi.org/10.1080/00218464.2013.773258>
- Raghava, R., Caddell, R. M., & Yeh, G. S. (1973). The macroscopic yield behaviour of polymers. *Journal of Materials Science*, 8, 225-232. <https://doi.org/10.1007/BF00550671>
- Rodríguez, R. Q., de Paiva, W. P., Sollero, P., Rodrigues, M. R. B., & de Albuquerque, É. L. (2012). Failure criteria for adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 37, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.01.009>
- Saraç, İ. (2020). Çekme yükü uygulanmış boru yapıştırma bağlantılarında bindirme uç geometrisinin bağlantı dayanımına etkisinin araştırılması. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8(4), 733-744. <https://doi.org/10.36306/konjes.708239>
- Saraç, İ. (2021a). Yapıştırma bağlantılarında kohezif bölge modeli uygulayarak ve uygulamadan modelleme yapılmasının gerilme dağılımına etkisinin araştırılması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(15), 457-468. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.990291>
- Saraç, İ. (2021b). Failure analysis of simple overlap bonding joints and numerical investigation of the adhered tip geometry effect on the joint strength. *Materials Testing*, 63(11), 1007-1011. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-0035>
- Turan, K., & Kaman, M. O. (2010). Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ilerlemeli hasar analizi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 16(3), 315-323.
- Volkersen, O. (1938). Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtfor Schung*, 15, 41-47.
- Waseem, M., & Kumar, K. (2014). Finite element modelling for delamination analysis of double cantilever beam specimen. *International Journal of Mechanical Engineering*, 1(5), 27-34. <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V1I5P105>
- Yue, T., & Wahab, M. A. (2014). Finite element analysis of stress singularity in partial slip and gross sliding regimes in fretting wear. *Wear*, 321, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.09.008>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Çok Duvarlı Karbon Nanotüp- PVC/PMMA Nanokompozitinin Spektroskopik ve Termal Karakterizasyonu

Afşar ÇELİK, Mustafa Hamdi KARAGÖZ*

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, 65080, Van, Türkiye

Afşar ÇELİK, ORCID No: 0000-0002-5824-8338,

Mustafa Hamdi KARAGÖZ, ORCID No: 0000-0002-6830-7725

*Sorumlu yazar e-posta: mhkaragoz@yahoo.com.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 05.10.2024
Kabul: 15.04.2024
Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1088735](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1088735)

Anahtar Kelimeler

Blend,
Karbon nanotüp,
Nanokompozit,
PMMA,
PVC

Öz: Bu çalışmada farklı oranlarda CNT içeren PVC/PMMA blendleriyle hazırlanan nanokompozit numunelerinin, spektroskopik ve termal analizleri yapıldı. Bu amaçla çözücüye ekleme yöntemiyle PVC/PMMA/CNT kompozitleri hazırlandı. SEM görüntülerinde CNTlerin polimer matrise iyi yerleştikleri ve homojen dağıldıkları gözlemlendi. Nanokompozitin amorf karakterli olduğu XRD analizleriyle görüldü. CNT katkısının, kristallik üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı belirlendi. TGA analizinde bozunmanın 224 °C 'de başladığı, maksimum kütle kaybının 442 °C'de %93'e ulaştığı saptandı. TGA sonuçlarından Coats - Redfern eşitliğiyle aktivasyon enerjileri hesaplandı. DSC analizinde PVC20-0, 0.1, 0.5, 1 numunelerinde sırasıyla 64.86, 61.50, 70.32, 61.80 °C olarak ölçüldü. CNT miktarları ile Tg değerleri arasında bir düzenlilik olmadığı gözlemlendi. CNT katkısının termal bozunmada aktivasyon enerjilerini değiştirmedığı gözlemlendi.

Spectroscopic and Thermal Characterization of Multi-Walled Carbon Nanotube - PVC/PMMA Nanocomposite

Article Info

Received: 05.10.2023
Accepted: 15.04.2024
Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1088735](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1088735)

Keywords

Blend,
Carbon nanotube,
Nanocomposite,
PMMA,
PVC

Abstract: Spectroscopic and thermal analyses were conducted on nanocomposite samples prepared by blending PVC/PMMA (poly(vinyl chloride)/poly(methyl methacrylate)) with MWCNTs (multi-walled carbon nanotubes) at different ratios. The PVC/PMMA/CNT composites were prepared using the solution casting method and SEM images showed that the CNTs were homogeneously dispersed. XRD analyses showed that the nanocomposite had an amorphous structure and that the doping of CNTs did not affect the crystallinity. TGA analysis indicated that degradation began at 224 °C and maximum mass loss was reached at 442 °C. The Coats-Redfern equation was used to calculate activation energies from the TGA results. DSC analysis showed Tg (glass transition temperature) values of 64.86 °C, 61.50 °C, 70.32 °C, and 61.80 °C for PVC20-0, 0.1, 0.5, and 1 samples, respectively. It was observed that there was no clear relationship between the amount of CNT and Tg values. Furthermore, the doping of CNTs did not affect the activation energies of thermal degradation.

1. Giriş

Polimer blendleri yapıları birbirinden farklı, moleküler düzeyde karışabilir olan polimerlerin veya kopolimerlerin kovalent bağ taşımayan ve ikincil kuvvetlerin etkileşimiyle oluşmuş fiziksel bir karışımıdır (Sah & Gupta, 2013). Geleneksel polimerlerin değiştirilmesinin bir parçası olarak, polimer

harmanlarının üretimi 2010 yılında üretilen tüm plastiklerin yarısını oluşturmuştur (Thomas ve ark., 2015). Ramesh ve ark. (2002) çalışmalarında, PVC'nin PMMA ve PEO (polietilenoksit) ile hazırlanan blendelerindeki karışabilirliği incelemişlerdir. Çalışmalarında viskozimetri ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizleri bu iki polimerin karışabilir olduğunu göstermiştir. Sah & Gupta (2013) PMMA ve PVC'nin karışabilir bir blendinin hazırlanmasına yönelik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında viskozimetrik ölçümlere dayanmışlardır. Araştırmacılar çözücü olarak tetrahidrofur kullanmışlardır. Bu iki polimerin her oranda karışabildiğini, %40/60 oranı dışında sıcaklığın karışımı etkilemediğini görmüşlerdir.

İki veya daha fazla sayıdaki aynı veya farklı türdeki malzemelerin, en iyi özelliklerini bir araya getirmek ya da farklı özellikli yeni bir malzeme ortaya çıkarmak amacıyla, bu malzemelerin makro ölçekte birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelere "kompozit malzeme" denir (Şahin, 2000).

Kompozit malzemelerde seramik türevi, metal ve polimerik esaslı matrisler olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin %90'ı polimer esaslı matrislerle üretilmektedir (Bağcı, 2006).

Polimer matrislikompozit malzemeler, saf polimerlerden daha gelişmiş özellikler taşır. Polimerik nanokompozitlerin özelliklerini genellikle katkıları belirler (Harito ve ark., 2019)

Polimerik nanoompozitler, polimer bir matris içinde boyutları 0.1-100nm aralığında değişen dolgu maddelerinin dağıtılmasıyla elde edilen malzemelerdir. Nanomalzemelerin güçlendiriciliği aynı miktardaki mikro ve makro malzemelere göre çok daha iyidir. Bu özellikleri "nano etkisi" denen, polimer matrisle nanomalzeme arasındaki büyük temas derecesinden kaynaklanır (Crosby & Lee, 2007)

Çeşitli inorganik katkılarla oluşturulan polimerik nanokompozitler kara, hava deniz taşıtlarından, elektronik, uzay araçları, tıp, tekstil, boya, inşaat sektörlerine kadar yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimerik nanokompozitleri bu kadar cazip kılan, nano boyutlu katkılarıyla mikroskobik avantajlar sunabilmeleridir (İçli, 2006; Yılmazbayhan, 2006).

Al-Muntaser ve ark. (2020), PVC/PMMA/lityumtitanyumoksit (Li₄Ti₅O₁₂) nanokompozit filmlerini çözelti döküm yöntemiyle hazırlamışlardır. Hazırlanan filmlerin yapısal özellikleri XRD, TEM, FTIR, SEM ve UV/Vis spektroskopi teknikleri kullanılarak araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada kullanılan ortalama molekül ağırlığı 15.000 olan Poli metimetakrilat (PMMA), düşük molekül ağırlıklı Polivinilklorür (PVC), 6-13 nm × 2.5-20 µm >%98 çok duvarlı karbon nanotüpler (CNT)ler ve >%99.9 saflıkta tetrahidrofur (THF) Sigma-Aldrich'ten temin edildi. Manyetik karıştırıcı olarak Dathan MS-MP8, ultrasonik banyo olarak Lab Companion Ultrasonic Cleaner kullanıldı.

Polimer blendi çözücüye ekleme yöntemiyle hazırlandı. 1 g'lık PVC/PMMA katı karışımları %20:80, oranında (200 mg PVC/800 mg PMMA) hazırlandı (Yanmaz, 2018). Toplam karışımın %0.1, 0.5 ve 1'i oranında olacak şekilde CNTeklendi. CNT'ler 5'er mL'lik THF içinde, ultrasonik banyoda 24-30°C sıcaklık aralığında yarım saat disperse edildi.

CNT dispersiyonu, polimer blendi çözeltisine dikkatle eklendikten sonra yeni karışım iki saat ultrasonik banyoda homojenize edildi. Ultrasonik banyodan alınan kompozit dispersiyonu bir saat manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra hassas şekilde petrilere döküldü.

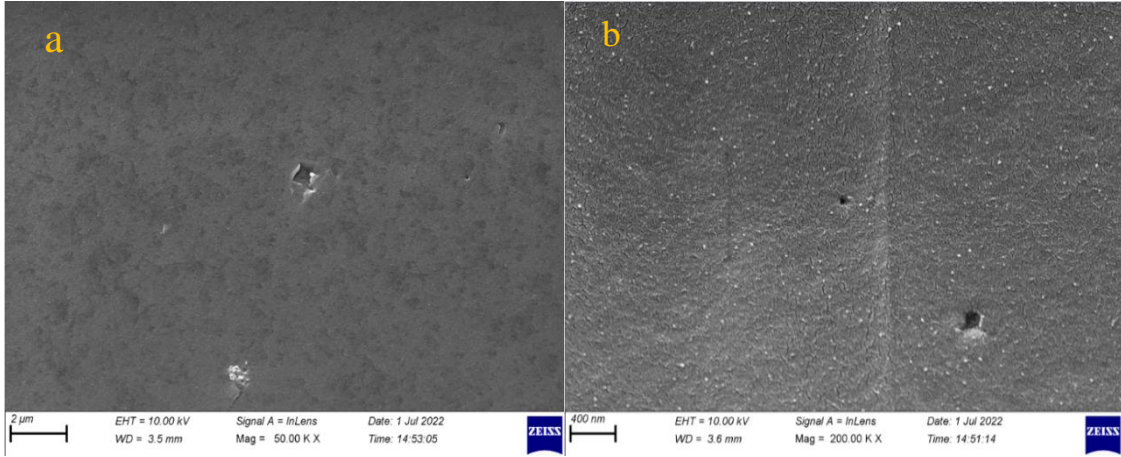
Polimer matrisi, 20:80 PVC/PMMA oranında hazırlandığından, PVC20 olarak kodlanmıştır. Nanokompozitler de polimer matrise eklenen CNT yüzdelere göre PVC20-0, PVC20-0.1, PVC20-0.5 ve PVC20-1olarak tanımlanmıştır

Bu çalışmada, elektron mikroskobu görüntülemesinde Sigma 300 FESEM elektron mikroskobu, XRD analizlerinde RIGAKU ULTIMA IV X-Ray Kırınım Spektrometresi Cihazı, TGA ölçümlerinde Hitachi STA 7300 TGA/DTA Cihazı, DSC ölçümlerinde Perkin ElmerDiamond Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Cihazı kullanılmıştır.

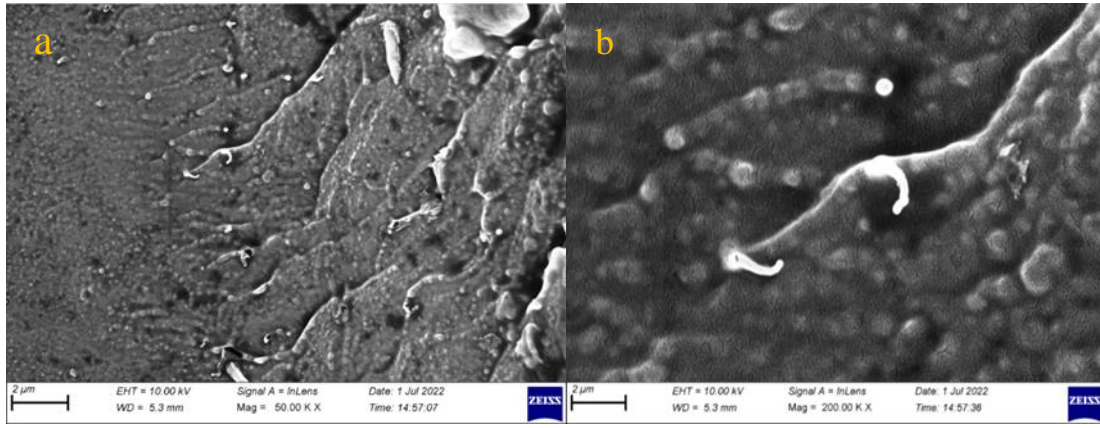
Aktivasyon enerjileri TGA verilerine göre Coats-Redfern eşitliği ile hesaplanmıştır (Alghunaim, 2015).

$$\log \left[\frac{-\log(1 - \alpha)}{T^2} \right] = \log \frac{R}{\Delta E} \left[1 - \frac{2RT}{E} \right] - \frac{1}{2.303} \frac{E}{RT} \quad (1)$$

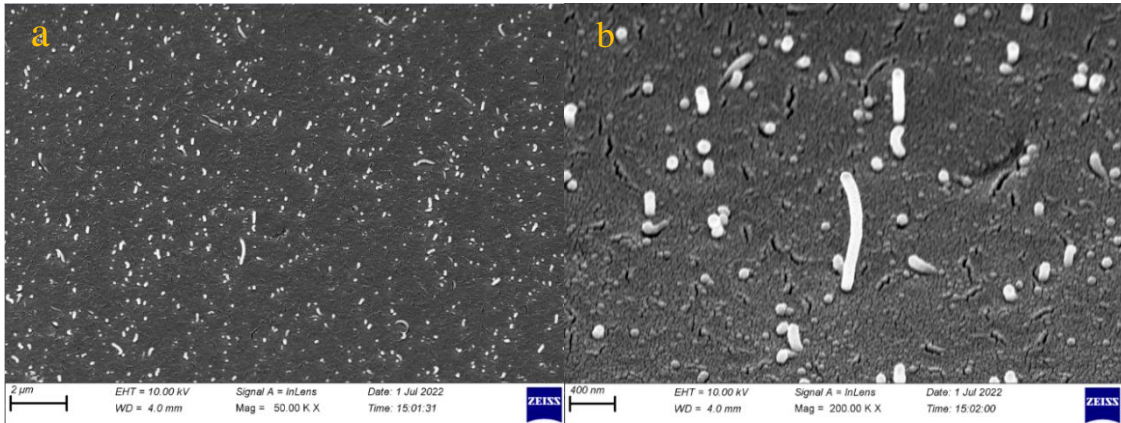
3. Bulgular



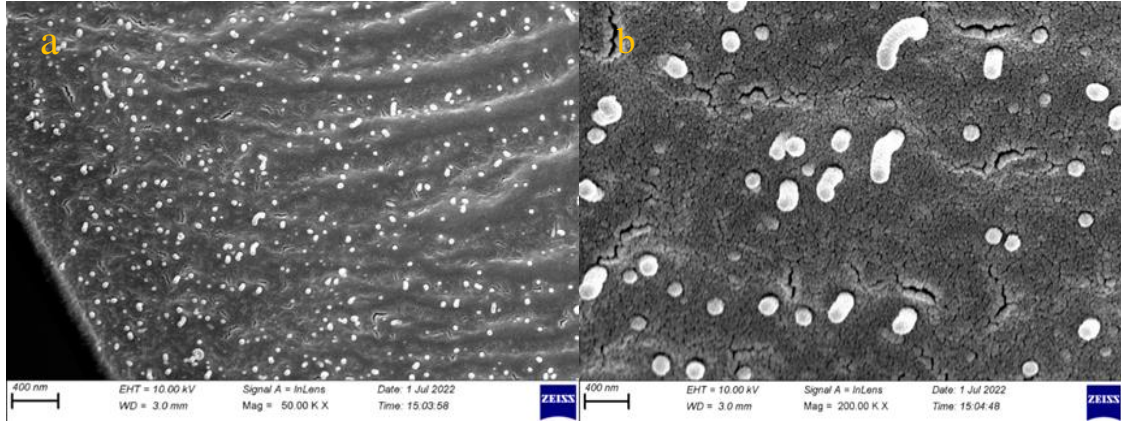
Şekil 1. PVC20-0 numunesi (%20:80:0) PVC/PMMA/CNT 50 X (a) ve 200 X (b) SEM görüntüleri.



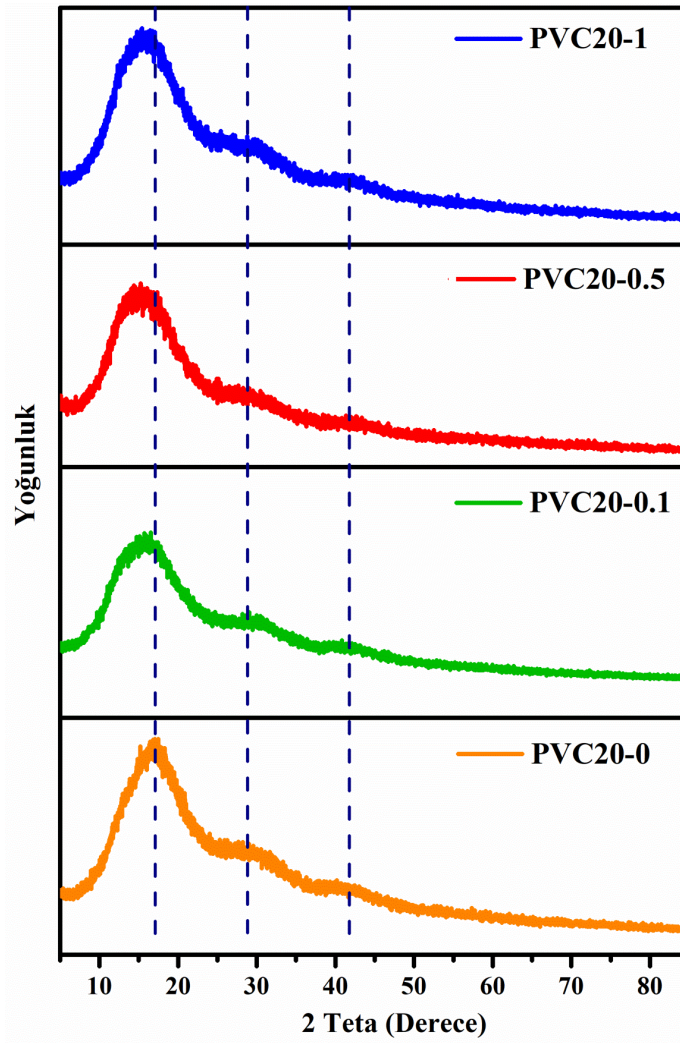
Şekil 2. PVC20-0.1 numunesi (%20:80:0.1) PVC/PMMA/CNT 50 X (a) ve 200 X (b) SEM görüntüleri.



Şekil 3. PVC20-0.5 numunesi (%20:80:0.5) PVC/PMMA/CNT 50 X (a) ve 200 X (b) SEM görüntüleri.



Şekil 4. PVC20-1 numunesi (%20:80:1) PVC/PMMA/CNT 50 X (a) ve 200 X (b) SEM görüntüleri.



Şekil 5. XRD desenleri; PVC20-(0-1) numuneleri.

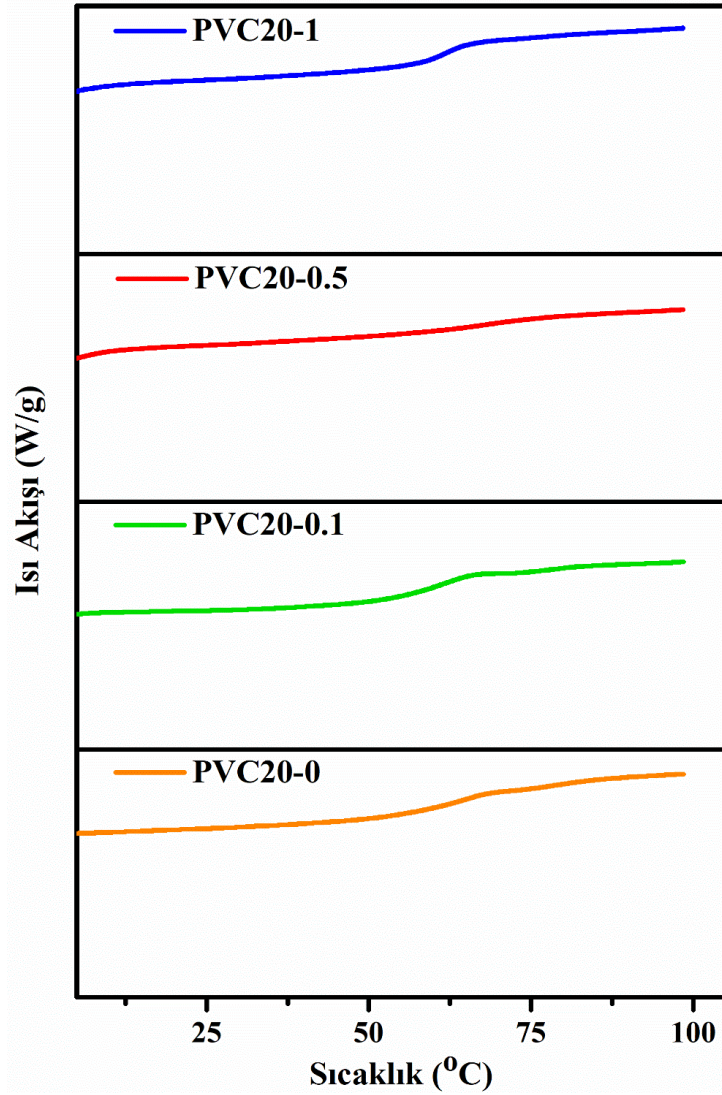
XRD'ye dayalı kristallik:

$$X_c (\%) \text{ (Kristallik \%)} = \left(\frac{\text{Toplam Kristal Bölge}}{\text{Kristal bölge} + \text{Amorf bölge}} \right) \times 100 \quad (2)$$

formülüne göre bulunabilir. Bu formüle göre üç 2 θ pikinin eğri altı alanı, Origin Lab 8.5 programında belirlenmiş ve toplam eğri altı alanına bölünerek kristallik oranı hesaplanmıştır.

Çizelge 1. XRD ölçümlerine dayalı kristallik oranları

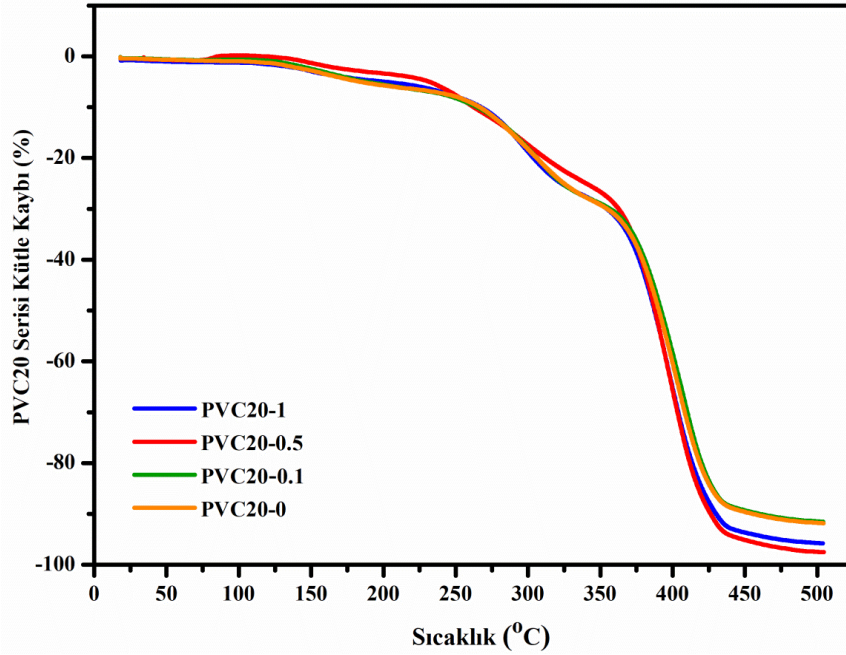
Numune Kodu	2 θ (°)	Kristallik %
PVC20-0	17.04	15.39
	24.44	
	39.88	
PVC20-0.1	16.92	14.55
	24.68	
	38.98	
PVC20-0.5	16.68	14.49
	23.96	
	41.58	
PVC20-1	17.18	15.04
	23.22	
	40.34	
Ortalama Kristallik%		14.87



Şekil 6. DSC grafikleri; PVC20-(0-1) numuneleri.

Çizelge 2. Camsı geçiş sıcaklıkları (T_g)

Numune Kodu	T_g (°C)
PVC20-0	64.86
PVC20-0.1	61.50
PVC20-0.5	70.32
PVC20-1	61.80



Şekil 7. TGA grafikleri PVC20-(0-1) numuneleri.

Çizelge 3. TGA verileri PVC20-(0-1) numuneleri

Numune	PVC20-0		PVC20-0.1		PVC20-0.5		PVC20-1		
	(°C)	%Kütle Kaybı	(°C)	%Kütle Kaybı	(°C)	%Kütle Kaybı	(°C)	%Kütle Kaybı	
Başlangıç	104.49	1.00	104.43	0.65	106.81	0.17	104.51	1.24	
Bitiş	193.73	5.4	193.72	5.24	195.04	3.22	193.75	4.79	
Tb1 Kütle Kaybı (%)		4.45		4.59		3.39		3.55	3.99
Başlangıç	224.34	6.52	224.40	6.60	225.43	4.45	224.30	5.92	
Bitiş	349.07	29.03	349.00	28.80	349.59	26.55	348.91	28.94	
Tb2 Kütle Kaybı (%)		22.51		22.18		22.10		23.02	22.46
Başlangıç	380.0	40.62	380.01	39.45	380.57	42.01	380.09	42.61	
Bitiş	442.57	89.00	442.56	88.72	442.94	94.53	442.43	93.08	91.33
Tb3 Kütle Kaybı (%)		48.38		49.26		52.52		50.47	50.16
Maks. (%)	473.35	91.00	473.27	90.71	473.61	96.61	473.11	94.98	93.33

Çizelge 4. Aktivasyon enerjileri: PVC20-(0-1) numuneleri

Numune Kodu	Aktivasyon Enerjisi E_a (kJ/mol)		
	1. Tb.	2. Tb.	3. Tb.
PVC20-0	132.33	121.92	105.14
PVC20-0.1	132.64	121.94	105.12
PVC20-0.5	137.39	123.40	105.10
PVC20-1	133.82	122.36	104.92

4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan çalışmada numunelerde belirgin kırılma gözlemlendi. Artan CNT miktarına bağlı olarak kırılmanın azaldığı görüldü. Buna karşılık PMMA miktarının PVC ikincil bağlarını zayıflatmasıyla açıklanabilecek kırılma davranışı üzerinde, CNT katkılı yüksek PMMA oranlı blendlerimizde nanotüplerin olumlu etkisinden bahsedilebilir. Bu etkinin açıklanmasında, Luna & Filippone (2016) çalışmalarındaki “*polimer-polimer ara yüzünde biriken nanopartiküllerin, kısmen karışan polimer karışımlarının mikro yapısını iyileştirmede özellikle etkili olduğuna*” dair gözlemleri destekleyicidir.

PMMA'nın varlığı, SEM görüntülerinde açık renkli iri kabarcıklar (droplet) halinde ortaya çıkmaktadır. CNTler polimer matrise iyi yerleşmiş ve genelde homojen dağılmışlardır. Ayrıca CNTlerin ara yüzeyde yerleşmeye eğilimli oldukları görülmüştür. Bu durum Bose ve ark. (2010)'nın bulgularıyla benzerdir.

XRD analizlerinde yapının genel anlamda amorf olduğu görülmüştür. Bu gözlem Sangawar & Moharil (2012) ve El-Gamal & ElSayed (2020) ile desteklenmektedir. CNT katkısının genel olarak %0.1 ve %0.5 oranlarında sırayla azalan bir kristallik ortaya koyduğu ve %1'lik serilerde ise kristallik tekrar arttığı gözlemlendi. Budurum, CNT ve polimer matris arasında kimyasal bağ olmadığında, (Çalışmada kullanılan CNT'ler fonksiyonlandırılmamış olduğundan, bu olasılık ihmal edilebilir) bunların arasındaki elektrostatik etkileşim ve van der Waals kuvvetlerine veya mikromekanik kilitlemeye bağlanabilir (Swain & Jena, 2010). SEM sonuçlarında CNT'lerin polimer matrisle iyi etkileştikleri gözlemi, bu varsayımı desteklemektedir.

TGA analizinde üç basamaklı bir kütle kaybı gözlemlenmiştir.

Birinci basamak kütle kaybı 104-195 °C arasında gerçekleşmiştir. Birinci basamakta ortalama kütle kaybı %4 civarındadır. Bu basamakta kütle kaybının yapıda kalan çözücülerden kaynaklandığı düşünülebilir. İkinci basamak 224-349 °C arasında gerçekleşmiştir. Bu basamakta kütle kaybı PVC'deki dehidroklorinasyondan kaynaklanmaktadır. İkinci basamak ortalama kütle kaybı %22,5 civarındadır. İkinci basamak gözlemimiz Naim ve ark. (2020) ile desteklenebilir. Üçüncü basamak ortalama kütle kaybı yaklaşık %50'dir. Üçüncü basamakta kütle kaybının 442°C'de maksimuma ulaştığı görülmektedir. Bu basamak polimer matrisin dimerler, trimerler ve oligomerler halinde dağıldığı aşama olarak kabul edilmektedir. Maksimum kütle kaybı, ortalama %93'tür.

TGA ölçümlerine dayalı olarak yapılan Coats- Redfern aktivasyon enerjisi hesaplamalarında, CNT katkısının aktivasyon enerjisini neredeyse değiştirmediği söylenebilir.

DSC analizlerinde bütün numunelerde tek bir endotermik Tg eğrisi elde edilmiştir. Bu da karışabilir bir blend elde edildiğini göstermektedir. Buna karşılık CNT miktarıyla Tg arasında anlamlı bir ilişki gözlemlenmedi. CNT miktarının en fazla olduğu PVC20-. 0.5 numunesinde en yüksek Tg gözlemlendi. DSC analizinde PVC20-0, 0.1, 0.5, 1 numunelerinde sırasıyla 64.86, 61.50, 70.32, 61.80 °C olarak ölçüldü.

CNT gibi güncel bir nano malzemenin, PVC ve PMMA gibi sık kullanılan iki endüstriyel polimerin blendlerindeki etkisi, polimerik nanokompozitlerin hazırlanmasına ve karakterizasyonuna bir katkı sağlayabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2020-8776 No'lu proje olarak desteklenmiştir. Makalemize katkılarından dolayı Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Al-Muntaser, A. A., Abdelghany, A. M., Abdelrazek, E. M., & Elshahawy, A. G. (2020). Enhancement of optical and electrical properties of PVC/PMMA blend films doped with Li₄Ti₅O₁₂ nanoparticles. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 789-797. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.019>
- Alghunaim, N. S. (2015). Spectroscopic analysis of PMMA/PVC blends containing CoCl₂. *Results in Physics*, 5, 331-336. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2015.11.003>

- Bağcı, İ. (2006). *Epoksi reçinesi ile nanokompozit sentezi*. (Yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Bose, S., Özdilek, C., Leys, J., Seo, J. W., Wübbenhorst, M., Vermant, J., & Moldenaers, P. (2010). Phase separation as a tool to control dispersion of multiwall carbon nanotubes in polymeric blends. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2(3), 800-807. <https://doi.org/10.1021/am9008067>
- Crosby, A. J., & Lee, J. (2007). Polymer nanocomposites: The “Nano” effect on mechanical properties. *Polymer Reviews*, 47(2), 217-229. <https://doi.org/10.1080/15583720701271278>
- El-Gamal, S. & Elsayed, M. (2020). Synthesis, structural, thermal, mechanical, and nano-scale free volume properties of novel PbO/PVC/PMMA nanocomposites. *Polymer*, 206(29), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122911>
- Harito, C., Bavykin, D. V., Yuliarto, B., Dipojono, H. K., & Walsh, F. C. (2019). Polymer nanocomposites having a high filler content: Synthesis, structures, properties, and applications. *Nanoscale*, 110, 118-125. <https://doi.org/10.1039/C9NR00117D>
- İçli, S. (2006, Kasım). *Polimerik kompozitler: Geleceğin teknolojileri*. I. Polimerik Kompozitler Sempozyumu ve Sergisi, İzmir, Türkiye.
- Luna, M. S., & Filippone, G. (2016). Effects of nanoparticles on the morphology of immiscible polymer blends – Challenges and opportunities. *European Polymer Journal*, 79, 198-218. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.02.023>
- Naim, A. F. A., AlFannakh, H., Arafat, S., & Ibrahim, S. S. (2020). Characterization of PVC/MWCNTs Nanocomposite: Solvent blend. *Science and Engineering of Composite Materials*, 27(1), 55-64. <https://doi.org/10.1515/secm-2020-0003>
- Ramesh, S., Yahaya, A. H., & Arof, A. K. (2002). Miscibility studies of PVC blends (PVC/PMMA an PVC/PEO) based polymer electrolytes. *Solid State Ionics*, 148(3-4), 483-486. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(02\)00091-7](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(02)00091-7)
- Sah, G. K., & Gupta A. K. (2013). Miscibility studies of PVC/PMMA blends in tetrahydrofuran by viscosity, density, refractive index, and ultrasonic velocity method. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 4(2), 288-293.
- Sangawar, V. S. A., & Moharil, A. N. (2012). Study of electrical, thermal, and optical behavior of polypyrrole filled PVC: PMMA thin film thermoelectrics. *Chemical Science Transactions*, 1(2), 447-455.
- Swain, S. K., & Jena, I. (2010). Polymer/carbon nanotube nanocomposites: A novel material. *Asian Journal of Chemistry*, 22(1), 1-15.
- Şahin, Y. (2000). *Kompozit malzemelere giriş* (1. Baskı). Gazi Üniversitesi Kitapevi.
- Thomas, S., Grohens, Y., & Jyotishkumar, P. (2015). *Characterization of polymer blends: Miscibility, morphology, and interfaces*, (First Edition). Wiley-VCH VerlagGmbH&Co. KGaA.
- Yanmaz, E. (2018). *Vinil grubu içeren bazı polimer / modifiye tek duvarlı karbon nanotüp nanokompozitlerinin sentezi ve karakterizasyonu*. (Doktora tezi), Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye.
- Yılmazbayhan, A. (2006). *Maleik anhidritle graflanmış oligomerlerin ve i-pp/silikat nanokompozitlerin tepkimeli ekstrüzyon yöntemiyle sentezi ve karakterizasyonu*. (Yüksek lisans tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Atık Lastiklerin Geri Dönüşümü İçin Kenevir Katkılı Yeşil Kompozit Üretiminin Araştırılması

Arife ŞİMŞEK¹, Gökhan DEMİR^{*2}

¹Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Almus Meslek Yüksekokulu, Ormancılık Bölümü, 60250, Tokat, Türkiye

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun, Türkiye

Arife ŞİMŞEK, [ORCID No:0000-0002-7177-1764](https://orcid.org/0000-0002-7177-1764), Gökhan DEMİR, [ORCID No:0000-0002-3734-1496](https://orcid.org/0000-0002-3734-1496)

*Sorumlu yazar e-posta: gokhan.demir@omu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 06.11.2023

Kabul: 01.05.2024

Online Ağustos 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1386928](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1386928)

Anahtar Kelimeler

Atık lastik,
Geri dönüşüm,
Kauçuk,
Kenevir,
Yeşil yapı malzemesi

Öz: Günümüzde artan çevre sorunları, endüstride sıklıkla kullanılan petrol türevli malzemelerin yerine, organik temelli biyo-bozunur malzemelerin tercih edilmesine neden olmuştur. Bu nedenle mukavemeti düşük olan polimerlerin mekanik dayanımını artırmak için kenevir, keten, jüt gibi doğal liflerle katkılanmış kompozitler hazırlanmaktadır. Çalışma kapsamında, ana maddesi kauçuk olan ömrünü tamamlamış atık lastiklerin (ÖTL) geri dönüşümü için kenevir katkıli kompozit (zemin kaplama) malzeme üretimi ve kullanımı incelenmiştir. Bu amaçla, granül hale getirilmiş kauçuk lastikler ile %10 ve %20 oranlarda olacak şekilde 90-125-250 µm kenevir kütüğü birleştirici malzeme binder ile karıştırılarak kenevir katkıli kompozit ürünler hazırlanmıştır. Son ürün olarak kenevir içerikli yeşil ürün elde edilmesi, sağlığa ve çevreye zararlı olmayan, doğa dostu, karbon salımının azaltılmasını destekleyen kenevir katkıli zemin kaplama malzemesi olarak kullanım potansiyelinin araştırılması amacıyla yapılan analizler sonucunda 90 µm partikül boyutu olan % 10 ve % 20 kenevir katkıli kompozit numuneler ham kauçuk ile benzer ve üstün özellikler göstermiştir. Üretilen kompozit malzeme ile çevre dostu, karbon salımını azaltan bir zemin kaplama malzemesi elde edilmesinin yanı sıra üreticinin bağlayıcı ajan olarak kullandığı binder oranı düşürülerek maliyet açısından da kazanç sağlanmıştır.

Investigation of Hemp-Added Green Composite Production for Recycling Waste Tires

Article Info

Received: 06.11.2023

Accepted: 01.05.2024

Online August 2024

DOI:[10.53433/yyufbed.1386928](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1386928)

Keywords

Green construction material,
Hemp,
Recycling,
Rubber,
Waste tire

Abstract: Increasing environmental problems today have led to the preference for organic-based biodegradable materials instead of petroleum-derived materials, which are frequently used in the industry. For this reason, composites doped with natural fibers such as hemp, flax and jute are prepared to increase the mechanical strength of polymers with low strength. Within the scope of the study, the production and use of hemp-added composite (flooring) material for recycling end-of-life waste tires, the main ingredient of which is rubber, was investigated. For this purpose, hemp-added composite products were prepared by mixing granulated rubber tires with 90-125-250 µm hemp tow binder material in the ratios of 10% and 20%. As the final product, it is aimed to obtain a green product containing hemp. It is a nature-friendly, environmentally friendly, hemp-added flooring material that is not harmful to health and the environment, in areas open to human use such as recreation areas. As a result of the analyses carried out to investigate the potential to be used as an adhesive, 10% and 20% hemp-added composite samples with 90 µm particle size showed similar and superior properties to raw rubber. In addition to obtaining an environmentally friendly floor covering material that reduces carbon emissions, the composite material produced also provides cost savings by reducing the binder ratio used by the manufacturer as a binding agent.

1. Giriş

Son yıllarda, artan çevre sorunları endüstrilerin çevre dostu ürünler yapmak için petrol bazlı malzemeleri, tarım bazlı malzemelerle değiştirmesine neden olmuştur. Yeşil ürünler üretme girişiminde, polimerleri güçlendirmek için doğal lifler ve hibrit kompozitler kullanılmaya başlanmıştır. Kenevir, keten, jüt, sisal gibi doğal lifler, yaygın olan inorganik veya sentetik liflere göre, (örneğin cam ve karbon lifleri) bazı avantajlara sahiptir. Bunlar daha az yoğunluk, işleme sırasında daha az makine aşınması, sağlık açısından tehlike teşkil etmemesi ve yüksek derecede esneklik sağlamasıdır (Mwaikambo ve ark., 2007; Kabir ve ark., 2012; Haghghatnia ve ark., 2017). Endüstrideki önemli doğal liflerden biri, kısa hasat döngüsüne sahip olan ve çok çeşitli ortamlarda kolaylıkla yetiştirilebilen kenevirdir. Ek olarak, yaklaşık 310-1110 MPa çekme mukavemeti olan kenevir, tüm sak lifleri arasında en güçlü liflerden biridir (Müssig & Christian, 2010).

Genel olarak kenevir gibi doğal lifler, sertleşip polimerin deformasyonunu azaltıp, elastik modülünü artırarak kompozitlerin mekanik performansını olumlu yönde etkileme eğilimindedir (Moni Ribeiro Filho ve ark., 2019). Mevcut araştırmalara göre kenevirin ağaçlara göre iki kat daha verimli bir karbon emme ve tutma kapasitesi sergilediği bulunmuştur. Bu özel yöntem, su tasarrufuna sağladığı faydaların yanı sıra su kirliliğini en aza indiriyor, ekim için daha az alan gerektiriyor, antibakteriyel özelliklere sahip ve dayanıklılık gösteriyor. Kenevir lifinin polimerlerde takviye malzemesi olarak kullanılması, hafif yapısı, biyolojik olarak parçalanabilirliği, satın alınabilirliği, düşük yoğunluğu, yaygın bulunabilirliği ve yenilenebilir doğası gibi avantajlı özelliklerinden dolayı büyük ilgi görmüştür (Müssig ve ark., 2020). Birçok yazar, kompozit malzemenin ticarileştirilmesi ve endüstriyel uygulaması için gerekli önemli niteliklerin imalatını ve değerlendirmesini gerçekleştirerek polimerlerde takviye maddesi olarak keneviri kullanmıştır (Deeraj ve ark., 2021; Tucci ve ark., 2022; Kumar ve ark., 2023). Dhakal ve ark. (2007), kenevir lifi ile güçlendirilmiş kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde su emmenin etkisini araştırdılar. Oda sıcaklığında su emiliminin Fickian davranışını takip ettiği bulunmuştur, ancak daha yüksek sıcaklıklarda emme davranışı Fickian değildir. Bu su alım davranışı, nemin neden olduğu bozulma nedeniyle yüksek sıcaklıklarda büyük ölçüde değişir. Kompozitteki su içeriği malzemenin mukavemetinde önemli bir düşüşe yol açar. Rousin ve ark. (2006), reçine transfer kalıplama kullanarak kenevir lifini polyster reçineye dönüştürerek kompozit üretti ve mekanik özelliklerini inceledi. Kenevir lifi içeriğinin eklenmesiyle mekanik özellikler arttığını ve %35'lik lif hacmi içeriğinde en yüksek mekanik özelliklere ulaştığını bildirmiştir. Sair ve ark. (2018), Kenevir elyaf takviyeli poliüretan kompozitlerin mekanik ve termal iletkenlik özelliklerini incelemiş kompozitlerin ısıl iletkenliğinin yoğunlukla doğrusal olarak arttığını, ağırlıkça %15 fiber yüklemeli kompozitlerin mekanik özellikleri mukavemette %40 artış sağladığını belirtmiştir. Ölçülen özellikler, poliüretan-kenevir elyaf kompozitinin, geleneksel yalıtım malzemelerine (cam yünü, mineral yün vb.) kıyasla iyi yalıtım özellikleri sunduğunu gösterdi. Kakrodi ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada kenevir liflerinin öğütülmüş lastik kauçukla birlikte kullanılması, iki takviye ile polietilen polimer matrisi arasında genel olarak iyi bir bağ olduğunu gösterdi. %50 kenevir liflerinin kullanılması aynı zamanda çekme mukavemeti ve elastik modülde önemli bir artışa katkıda bulunmuştur. %60 oranında kenevir ilavesi ile bükülme özellikleri de %260 oranında arttırmıştır. Öte yandan, ağırlıkça %26 oranında kauçuk parçacıklarının kullanılması, kompozitlerin çekme mukavemeti, sertliği ve yoğunluğunun azalmasını yanı sıra enerji emiliminin artmasına da neden olmuştur.

Geri dönüştürülmüş kaynaklardan takviye kullanımı da sürdürülebilir kompozitler üretmek ve atılan malzemeleri yeniden kullanmak için alternatif bir yoldur. Atık kauçuk lastik parçacıklarının, son derece dayanıklı olması ve biyolojik olarak parçalanamaması nedeniyle kauçuk bileşenin yaşam döngüsüne dahil edilmesi önemlidir. Dolayısıyla, döngüsel ekonomiye geçiş, atık ürünler için geri dönüşüm ve yeniden kullanım yollarının uygulanmasını gerektirir.

Bu çalışma, önde gelen ve gelişmekte olan alanlardan birini, sürdürülebilir malzemelerin ve atık işlemenin, yani atık kauçuk lastik ve kenevir yan ürünlerinin geliştirilmesini ele almaktadır. Bu kapsamda, ana maddesi kauçuk olan ömrünü tamamlamış atık lastiklerin (ÖTL) geri dönüşümü için kenevir katkılı kompozit (zemin kaplama) malzeme üretimi, üretilen malzemenin mekanik özelliklerini (basınç ve darbe testi gibi), termogravimetrik özelliklerini, morfolojisini, termal yapısını ve su emme özellikleri araştırılmıştır.

2. Ömrünü Tamamlamış Atık Kauçuk Lastikler (ÖTL)

Sanayileşmenin ve tabii kaynakların bilinçsizce tüketiminin çevresel sorunlara etkisi günümüzde fazlaca hissedilmeye başlamıştır. Artan nüfusla beraber motorlu taşıtların da kullanımı orantılı şekilde yükselmektedir. Artan taşıt sayısı ile birlikte taşıtlar için kullanılacak olan lastik sayısının da paralel şekilde arttığı gözlenmektedir.

Lastik üretimi için toplam doğal ve sentetik kauçuk malzemelerin %70' inden fazlası kullanılmaktadır (Myhre & MacKillop, 2002; Karger-Kocsis ve ark., 2013). Bir lastiğin kullanımı artık verimli veya tatmin edici derecede güvenli olmadığına, kullanım ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL) olarak da adlandırılan atık bir lastik haline gelir (Mangili ve ark., 2015). Her yıl, dünya çapında yaklaşık 17 milyon tonun üzerinde eskimiş lastik hurdaya ayrılmaktadır (Wayal & Wagle, 2013; Nuzaimah ve ark., 2018). Ne yazık ki, tüm atık lastiklerin %1'inden çok daha azının doğal olarak bozulması, kauçuğun karmaşık çapraz bağlı yapısı olması nedeniyle yüzlerce yıl almaktadır (Adhikari ve ark., 2000; Gupta ve ark., 2012; Liu ve ark., 2020).

Ömrünü tamamlamış lastiklerin atılmasıyla ilgili iki kritik sorun vardır. Birincisi, israf açısından ekonomik kayıptır. Atık olarak ayrıldığında, hem bertaraf alanlarına nakliyeden kaynaklanan ek maliyetler oluşmasına, hem de arazinin farklı amaçlarla kullanımının kısıtlanarak tükenmesine neden olmaktadır. İkincisi, sudaki ve karadaki organizmalar için tehlike oluşturan, terk edilmiş atık lastiklerin neden olduğu çevre kirliliğidir. Atık lastikler depolama sahasında bertaraf edildiğinde, zehirli gazlar oluşur ve bu gazlar belirli basınç altında patlama riski taşırlar. Bu nedenle, atık lastik kauçuklarının geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılma girişimleri gerekli hale gelmektedir. Lastik geri dönüşümü aynı derecede bir hammadde kaynağını temsil eder ve atık lastikleri toplayan insanlara kazanç imkânı sunar, böylece ekonomik kalkınmayı destekler.

Mevcut durumda kauçuk lastik atıkları, geri dönüştürülüp zemin döşemelerinde, kaplamalarında kullanılıyor. Ancak kauçuk granüllerin bağlama aşamasındaki gerekli malzemeler maliyeti arttırmakta ve kauçuk içeriği nedeniyle çevresel açıdan da tehlike oluşturmaktadır. 25 Kasım 2006 Tarihinde 26357 Sayılı Resmî Gazete'de yayınlanarak yürürlüğe giren "Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği" ne göre geri kazanım ve bertaraf işlemlerinin, hava, su, toprak, bitki ve hayvanlar üzerinde tehlike yaratmadan, ses ve koku yoluyla çevreye herhangi bir olumsuz etkide bulunmadan ve doğal çevre ile koruma alanlarına zarar vermeden yapılması zorunludur. Bu yönetmeliğe bağlı olarak kenevir katkılı atık kauçuk lastiklerin üretimi hammadde kazanımı, çevre dostu ve sürdürülebilir dayanıklı ürünler üretimi ile ülke ekonomisine ve özellikle doğaya katkı sağlanması önemlidir.

2.1. Atık kauçuk lastiklerin geri dönüşümü

Ülkemizdeki lastiklerin karmaşık yapısı ve bileşimi, lastiklerin geri kazanım ve geri dönüşüm süreçlerine önemli kısıtlamalar getirmektedir. Lastiklerin %70-80 oranında kükürtle sertleşen kauçuk bileşeninin yanı sıra, polyester, naylon veya selülozdan yapılan elyaf ve çelik kordlar, lastikleri güçlendirmek için kullanılan temel bileşenlerdir. Bu nedenle, liflerin ve çelik bileşenlerin kauçuktan ayrılması, lastiklerin geri dönüşümü sırasındaki ilk zor adımdır (Ramarad ve ark., 2015). Bu ayrıştırma işlemleri tamamlandıktan sonra, atık lastiklerin geri dönüştürülmesinin bir sonraki aşaması ise farklı boyut ve şekillerde lastiğin parçalanarak öğütülmesidir (Şekil 1) (Manuel, 2001).



Şekil 1. Ömrünü tamamlanmış lastiklerin geri dönüşüm kademeleri (Antakya Belediyesi, 2014).

Üretilen lastikler eriyemez ve çözünemezdir, yeniden işlenmeleri de teknik olarak karmaşıktır (Zhang ve ark., 2009). Ömrünü tamamlamış lastikler aynı zamanda enerji kaynağıdır. Örneğin, %90 organik malzeme içeren atık lastikler, kömürden (18.6-27.9 MJ/kg) (18.6-27.9 MJ/kg) daha fazla ısıl değere (32.6 MJ/kg) sahiptirler (Fazli & Rodrigue, 2020). Atık lastiklerin yakılması, enerji üretmek veya

geri kazanmak için bu tüketim sonrası ürünün önemli bir miktarının ortadan kaldırılması bir yöntem olarak görülmektedir. Ancak bu yöntem, hava kirliliği ve küresel ısınma gibi önemli olumsuz çevresel etkilere neden olmaktadır (Mangili ve ark., 2014; Cazan ve ark., 2019).

Lastiklerin geri kazanılması, lastiklerin geri dönüşüm sürecine ilişkin bir başka karmaşık tekniktir (Dubkov ve ark., 2012; Dobrotă & Dobrotă, 2018). Kullanılmış lastiklerin geri kazanılması, vulkanize kauçuğun 3B bağlantılı, erimez ve çözünmez ağının, ham kauçuğun yumuşak, düşük modüllü, kolay işlenebilir ve vulkanize edilebilir malzeme kaplama özelliklerine dönüştürülmesi ve parçalanmasıdır (De Sousa, 2016). Lastiklerin geri dönüşümü, fiziksel geri kazanım ve kimyasal geri kazanım süreçleri olarak sınıflandırılabilir.

Hem kimyasal hem de fiziksel yaklaşımlar ikincil kirliliğe yol açabilir ve aşırı enerji tüketimini içerebilir (Li ve ark., 2011). Örneğin, kimyasal yöntem, yüksek reaksiyon sıcaklığı, karmaşık enstrümantasyon ve reaktör tesisleri ile kimyasalların kullanımını içerir. Tüm bu hususlar çevresel ve maliyet kaygılarını oluşturmaktadır (Choi ve ark., 2017). Vulkanize kauçuğun kükürt giderme işleminde mikroorganizmaların kullanılması (mikrobiyal kükürt giderme) başka bir alternatiftir, ancak yalnızca toz haline getirilmiş atık lastik lastiklerinin yüzeyindeki kükürt çapraz bağlarını kırar. Ayrıca yavaş bir süreçtir (Li ve ark., 2011; Yao ve ark., 2013).

Son on yılda, enerji tüketimini azaltmanın yanı sıra çevresel zorlukları ele alan basit lastik geri dönüşüm yollarından biri, kauçuk zemin lastiği gibi termoplastik polimerlere dahil etmektir (Satapathy ve ark., 2010; Fazli & Rodrigue, 2020). Bu tür termoplastik malzemeler işlenebilirlik özelliği ile birleştirilmiş kauçuğun esnekliğine sahip çok işlevli bir polimerik matris oluşturur (Fazli & Rodrigue, 2020).

2.2. Kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler; en az iki farklı malzemenin makro düzeyde birleştirilmesi ile istenilen özelliklerin elde edilebilmesi amacıyla, metal, plastik ve seramik malzemelerden sonra geliştirilen malzemelerdir. Kompozit malzemeler matris (anafaz) ve takviye fazı adı verilen bileşenlerden oluşur. Kompozit malzemeler genellikle anafaz malzemesinin ismi ile adlandırılmaktadır. Bu malzemeler genellikle metal, seramik veya polimer matrisli olarak sınıflandırılabilir.

Metal matrisli kompozitler, genellikle çelik ve alüminyum gibi monolitik metallere oranla avantajlar sağlamak için kullanılır. Bu avantajların bazıları, alüminyum ve titanyum gibi düşük yoğunluklu metalleri güçlendirerek daha yüksek özgül mukavemet, grafit gibi düşük termal genleşme katsayılarına sahip liflerle takviye ederek daha düşük termal genleşme katsayıları ve yüksek sıcaklıklarda mukavemet gibi özelliklerin korunması yer alır. Seramik matrisli kompozitler, karbon veya silisyum karbür gibi liflerle güçlendirilmiş alümina kalsiyum, alümina silikat gibi seramik bir matrise sahip olan kompozitlerdir. Bu kompozitlerin avantajları arasında yüksek mukavemet, sertlik, yüksek servis sıcaklığı limitleri, kimyasal eylemsizlik ve düşük yoğunluk sayılabilir. Polimer Matrisli Kompozitler uygulamalarında en çok kullanılan kompozit türüdür. Bu kompozitler gerilme mukavemeti, kırılma/çatlama dayanıklılığı, aşınma ve korozyon dirençleri yüksektir. Yine bu kompozitlerin en önemli dezavantajları termal dirençlerinin düşük ve termal genleşmelerinin yüksek olmasıdır (Chawla, 2012; Okçuer, 2021).

2.2.1. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan doğal lifler

Doğal lifler, bitki, hayvan veya mineraller gibi herhangi bir doğal kaynaktan elde edilen lifler olarak tanımlanabilir. Asbest, biyolojik olarak parçalanamayan ve enerjisi yoğun olan seramik ve metal lifleri mineral lifler arasında bulunur. İpek, saç, yün, kürk, tüy vb. lifleri ise hayvansal lifleri oluşturmaktadır. Kendilerine ait özelliklerini veren selüloz, lignin ve hemiselülozdan bitki lifleri oluşur. Kompozit polimerlerin amacına en uygun kullanılan bitki lifleri kenevir, kenaf, jüt ve ketendir (Dabhi, 2016). Uygulama alanlarında bakıldığında doğal liflerle takviye edilen kompozitler günümüzde çeşitlenmekte ve kullanımı artmaktadır, Çizelge 1'de bazılarının özellikleri verilmiştir (Mohammed ve ark., 2015).

Çizelge 1. Doğal liflerin özellikleri (Mohammed ve ark., 2015)

Fiber	Yoğunluk (g/cm ³)	Gerilme Dayanımı (MPa)	Young Modülü (Gpa)	Kopma uzaması (%)
Keten	1.4	88-1500	60-80	1.2-1.6
Kenevir	1.48	550-900	70	1.6
Jüt	1.46	400-800	10-30	1.8
Rami	1.5	500	44	2
Hindistan cevizi	1.25	220	6	15-25
Sisal	1.33	600-700	38	2-3
Pamuk	1.51	400	12	3-10
Kenaf(kabuk)	1.2	295	2.7	6-9
Kenaf(çekirdek)	0.21	-	-	-
Şeker kamışı	1.2	20-290	19.7-27.1	1.1
Ananas	1.5	170-1672	82	53
Muz	1.35	355	33.8	53

2.2.2. Endüstriyel kenevir

Kenevir, çeşitli iklim ve toprak koşullarında yetişen tek yıllık bir bitkidir. Hızlı büyüme oranı, yüksek miktarda biyokütle ve umut verici enerji oranları nedeniyle, potansiyel olarak değerli bir enerji ürünü olarak kabul edilir. Elyafı, yağı, tıbbi bileşikleri ve biyoenerji için hammadde olarak birçok endüstride potansiyele sahiptir (Marrot, 2022).

Kenevir ve keten lifleri gibi doğal bitki lifleri, şu anda sentetik liflerin yerini alacak kompozitlerde takviye edici maddeler olarak kullanım için yüksek araştırma ilgisi görmektedir (Müssig, 2010; Fuqua ve ark., 2012; Van Vuure ve ark., 2015). Endüstriyel kenevir olarak bilinen kenevir, dünyanın en eski ekili ve en yaygın kullanılan endüstriyel ürünlerinden biridir (Tahir ve ark., 2011). Kenevir ekimi ayrıca ekilebilir tarımda ürün rotasyonlarının çeşitlendirilmesine izin verir ve gübre ve herbisitler için düşük gereksinime sahiptir (Ranalli & Venturi, 2004; Amaducci ve ark., 2015). Ayrıca ve çevre dostu için oldukça uygun olan düşük girdili bir ürün olarak kabul edilir (Amaducci & Gusovius, 2010; Liu ve ark., 2017).

Kenevir gibi biyo-bazlı malzemelerin kullanımı ile ilgili çalışmalarda, malzemenin ömrü boyunca kendisinde depolanan ve fotosentez yoluyla tutulan karbon, genellikle negatif bir atmosferik CO₂ emisyonu olarak kabul edilir. Bu bağlamda, kenevir ve saman gibi hızlı büyüyen biyo-bazlı malzemeler, kompozit malzeme yapımında kullanıldığında önemli bir karbon yakalama ve depolama potansiyeline sahip olduğu belgelenmiştir (Pittau ve ark., 2018; Pittau ve ark., 2019; Scrucca ve ark., 2020). Bu kazanıma ek olarak, endüstriyel keneviri üretime dahil ederek arazilerin biyolojik çeşitliliğini artırmak, yeraltı sularındaki nitrat seviyelerini azaltmak, bitkilerde daha fazla karbon tutmak ve diğer mahsullerdeki zararlıları ve hastalıkları azaltmak gibi geniş kapsamlı faydalara sahiptir (Donfouet ve ark., 2017). Kenevir, benzer bir verimle (Finnan ve ark., 2013) üstün sera gazı azaltımına (sırasıyla kanola ve şeker pancarına göre %140 ve %540 daha fazla) sahip olduğundan ve ormansızlaşmayı azaltabildiğinden (Casas ve ark., 2005) benzer ürünlerle karşılaştırıldığında daha avantajlı olduğu söylenebilir. Kenevir ayrıca piroliz yoluyla işlenebilir ve diğer ürünler arasında biyo-kömür üretilebilir; biochar olarak karbonu tutabilir ve kirleticileri filtrelemek için kullanılabilir (Liu ve ark., 2017; Parvez ve ark., 2021).

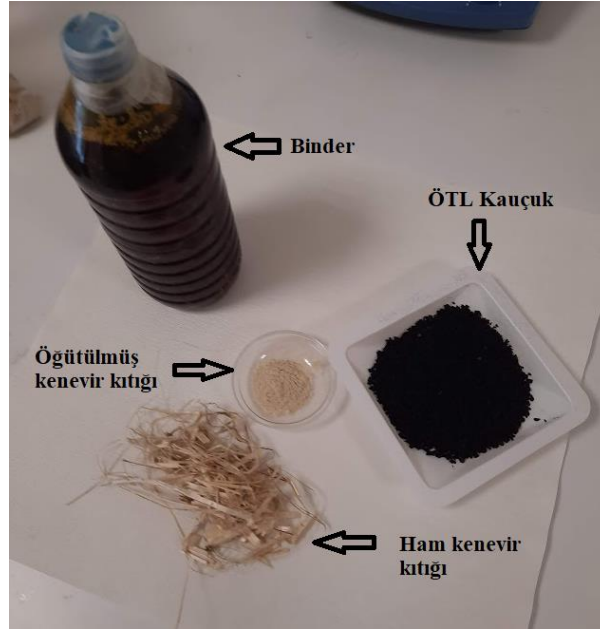
Genel olarak kenevir gibi doğal lifler, sertleşip polimerin deformasyonunu azaltarak ve elastik modülünü artırarak kompozitlerin mekanik performansını etkileme eğilimindedir (Moni Ribeiro Filho ve ark., 2019). Geri dönüştürülmüş kaynaklardan takviye kullanımı da sürdürülebilir kompozitler üretmek ve atılan malzemeleri yeniden kullanmak için alternatif bir yoldur.

3. Materyal ve Yöntem

3.1. Materyal

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan 2-3 mm boyutlarında granül kauçuk ve bağlayıcı olarak kullanılan binder MERİDAPARK park ekipmanları firmasından temin edilmiştir. Kenevir kırıkları Ondokuz Mayıs Üniversitesi (OMÜ) Kenevir Araştırma Enstitüsü tarafından sağlanmıştır. Üretimde kullanılan malzemeler Şekil 2’de sunulmaktadır.

Kenevir ve kauçuğu birleştirmek için kullanılan binder tek komponentli, solventsiz, poliüretan bazlı çok amaçlı bağlayıcı, yapıştırıcıdır. $1.09 \pm 0.01 \text{ g / cm}^3$ yoğunluğa sahip binder kauçuk zemin dökme/kaplama sistemlerinde kullanılan bağlayıcı bir ajandır.



Şekil 2. Kompozit zemin malzemesi için kullanılan malzemeler.

3.2. Yöntem

Çizelge 2. Kompozit üretiminde kullanılan kütlece ve hacimce malzeme yüzdeleri

Numune adı	Toplam kütle (gr)	Kenevir oranı	Kenevir kütle(gr)	Binder oranı	Binder hacmi (ml) (d= 1.1g/cm ³)	Kauçuk oranı	Kauçuk kütlesi(gr)
Ham kauçuk	20	0%	0	15%	2.72	85%	17
90 µm %10	20	10%	2	15%	2.72	75%	15
90 µm %20	20	20%	4	15%	2.72	65%	13
125 µm %10	20	10%	2	15%	2.72	75%	15
125 µm % 20	20	20%	4	15%	2.72	65%	13
250 µm % 10	20	10%	2	15%	2.72	75%	15
250 µm % 20	20	20%	4	15%	2.72	65%	13

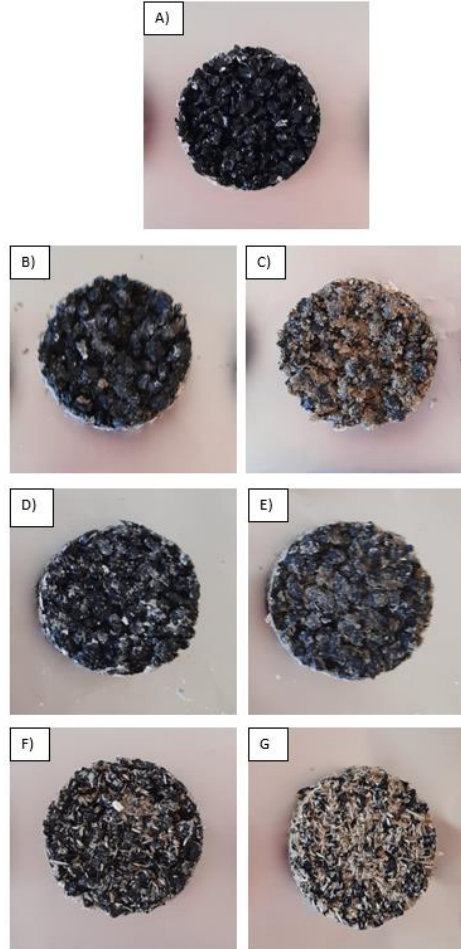
Kenevir katkılı kauçuk kompozit üretimi için Çizelge 2’de verilen kütle ve hacim oranları kullanılarak soğuk döküm olarak üretildi. Toplam malzeme kütlesi 20 gr olacak şekilde 90, 125 ve 250 µm parçacık boyutunda öğütülmüş kenevir kırıkları geri dönüşüm ürünü atık lastik kauçuklara 90, 125 ve 250 µm boyutlarında elek kullanılarak elde edilen kenevir kırıklarından %10 ve %20 oranlarında, üretici firmadan soğuk dökümde %20 binder kullanıldığı bilgisi alınarak maliyet açısından binder

oranını düşürmek için %15 oranında binder eklenerek numuneler hazırlanmıştır. Kontrol numunesi oluşturulmasında sadece atık lastiklerden oluşan granül ham kauçuk kullanılmıştır.

3.3 Kompozit karakterizasyonun belirlenmesi için gerekli analizler

3.3.1. Basınç testi

Numunelerin boyutları ASTM D 575 – 91 standardına göre $28.6 \pm 0,1$ mm çapında ve $12.5 \pm 0,5$ mm kalınlığında üretilmiştir. Numuneler oluşturulduktan sonra OMÜ KİTAM (Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi) INSTRON 5982 üniversal çekme-basma cihazında basınç testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Farklı tane boyutunda kenevir kütüğü eklenerek hazırlanan kauçuk numuneler A) Ham Kauçuk B) 90 µm %10 C) 90 µm %20 D) 125 µm %10 E) 125 µm %20 F) 250 µm %10 G) 250 µm %20.

3.3.2. Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FTIR) analizi

Testlerde kullanılan kauçuk FTIR analizi yapılarak fonksiyonel grupların absorpsiyon bandındaki değişiklikler belirlenmiştir. Bunun için oda sıcaklığında OMÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde yer alan Perkin Elmer Markalı cihazda, $4000-600 \text{ cm}^{-1}$ aralığında grafikler oluşturulmuştur.

3.3.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Kompozit numunelerin morfolojisini incelemek ve fazlar arasındaki arayüzey kalitesini gözlemlemek için taramalı elektron mikroskobu kullanıldı. SEM analizleri OMÜ KİTAM' da bulunan

JEOL markalı JSM-7001F model cihazda yapılmıştır. Örnekler elektriksel iletkenliğin sağlanması için Au-Pd ile kaplanmıştır. Kontrol numunesi ham kauçuk dahil toplam 7 numunenin 10x - 20x - 50x - 100x görüntüleri alınmıştır.

3.3.4. Düşen ağırlık darbe testi (drop weight impact test)

Düşen ağırlık darbe testi ile belirli bir yükseklikten kompozit malzeme üzerine tanımlanmış bir ağırlığın düşürülmesi yoluyla dayanımı belirlenmesi için İstanbul Teknik Üniversitesi İTÜpleks laboratuvarında yapılacak analiz için 54*88mm olarak numuneler üretilerek hizmet alımı öncesinde deneme çalışması yapılmıştır.

3.3.5. Termogravimetrik analiz (TGA)

Kompozit malzemenin sıcaklık artışı ile bünyesinde meydana gelen termal ve gravimetrik değişimleri belirlemek için 5 °C /dk sıcaklık oranı, 60 ml/dk akış oranı, 15 mg numune miktarı ve azot gazı kullanılarak OMÜ Kimya Mühendisliği Bölümü Shimadzu (Japan) marka DTG-60 model eş zamanlı TG/DTA/DTG analiz cihazı kullanılmıştır.

3.3.6 Su emme testi

Kompozit malzemenin su emme kapasitesini belirlemek ASTM D570 standardına göre hazırlanan numunelerin M1 ilk tartımı Radwag analitik terazi ile alındıktan sonra 24 saat saf su içerisinde bekletilmiştir. 24 saat sonra numuneler kuru bezle kurutularak M2 son tartım değerleri tartılarak alınmıştır. Denklem (1) de verilen formüle göre numunelerin su içeriği hesaplanmıştır.

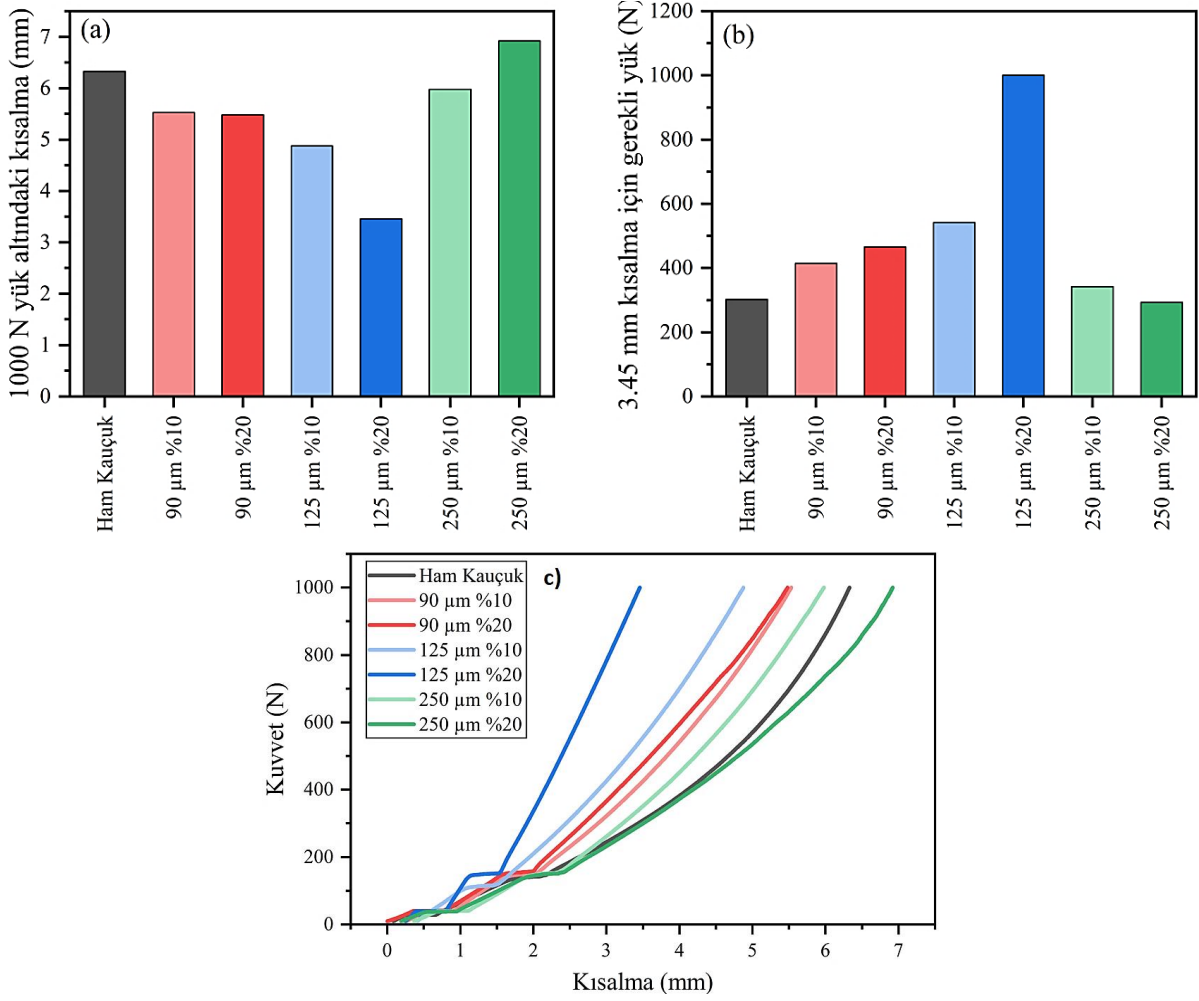
$$\% \text{ Su içeriği} = [(M2-M1)/M1] \times 100 \quad (M2 : \text{son tartım} ; M1: \text{ilk tartım}) \quad (1)$$

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Basınç testi sonuçları

Basınç testi bir kauçuk kompozitin statik yük altında ne kadar elastik davrandığını belirlemek için kullanılır. Kimyasal bağlar yeterince güçlüyse basınç testi sonuçları daha az kalıcı deformasyon gösterir (Kakrodi ve ark., 2013).

Şekil 4.a ve 4.c de tüm örneklerin 1000 N yük uygulanarak sıkıştırılarda gösterdikleri basınç dayanımı ve kısalma (mm) görülmektedir. Buna göre ham kauçuğa yakın dayanım gösteren numuneler ise 250 µm %20 ve 250 µm %10 olarak görülmektedir. Ancak 250 µm olan numunelerde sıkıştırma sonrasında parçalanma gözlemlendiği için (Şekil 5) ham kauçuğa en yakın kısalma 90 µm %10 ve 90 µm %20 kenevir ilave edilmiş numunelerde görülmektedir. Şekil 5.b de ise 3.45 mm kısalmaya karşılık gelen yük grafiği bulunmaktadır. Şekil 4.b de 1000 N yüke karşılık 3.45 mm kısalma 125 µm %20 kenevir eklenmiş numunede görülmektedir. Diğer numuneler aynı kısalma miktarı için daha düşük yük yeterlidir. El-Shekeil ve ark. (2024) nitril bütadien kauçuk ve hurma lifi takviyeli kompozitlerin mekanik performansının ve özellikleri incelemiş, daha yüksek fiber içeriğiyle kalınlıktaki azalma yüzdesinin arttığını, dolayısıyla kompozitlerinin sıkıştırma direncinin arttığını bildirmiştir. Çalışmamızda benzer olarak 250 µm kenevir eklenmiş numuneler yüke dayanım göstermiş ve kırılmış, 125 µm kenevir eklenen numuneler ise maksimum (1000 N) uygulanan yüke düşük dayanım göstermiştir. Benzer olarak Fernea ve ark. (2019), kenevir parçalarıyla güçlendirilmiş alçı kompozitin mekanik ve termal özelliklerini araştırmış ve sonuçlar, kenevir parça lifi yükü arttıkça kompozitlerin termal iletkenliğinin, bükülme ve basınç dayanımının azaldığını ortaya çıkarmıştır (Babu & Ratnam, 2021). Kakroodi ve ark. (2013) kenevir gibi doğal liflerin termoplastik bir matrise dahil edilmesinin darbe dayanımında önemli bir azalmaya yol açtığını bildirmiştir. Bu sonuçlara dayanarak optimum kenevir-kauçuk oranı ve parçacık boyutu belirlenmesi fiber takviyeli kompozitlerin basınç dayanımını arttıracakı düşünülmektedir.



Şekil 4. Basınç testi sonuç grafiği a) 1000 N yük altındaki kısalma kutu grafik b) 3.45 mm kısalma için gerekli yük (N) kutu grafik c) 1000 N yük altındaki kısalma çizgi grafik.



Şekil 5. 250 µm numunelerde 1000 N yük basınç sonrası deformasyon görünümü.

4.2. FTIR analiz sonuçları

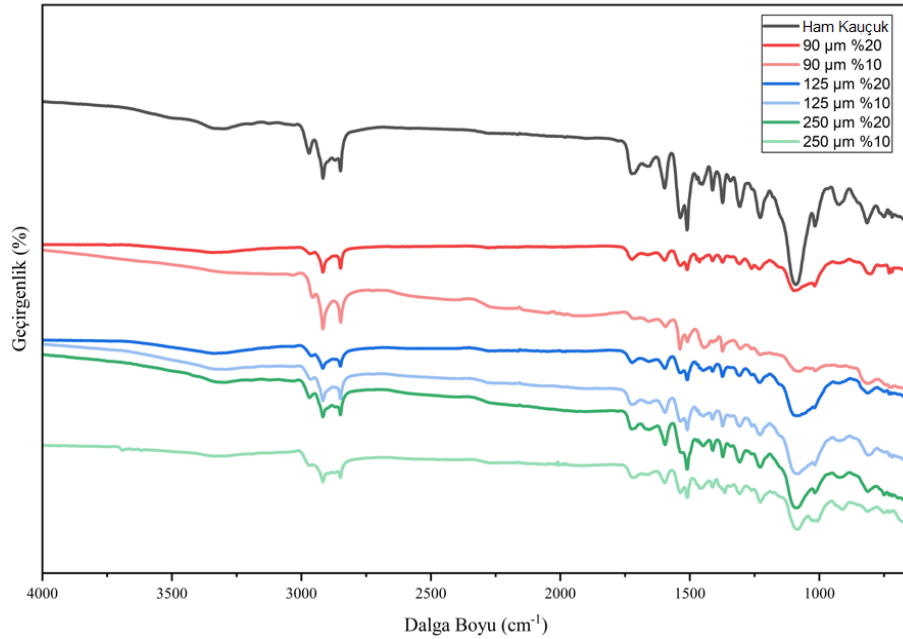
Malzemelerin tanımlanması ve doğrulanması, kullanılmış katkı malzemelerin tanınması için için FTIR analizleri KİTAM'dan hizmet alımı yapılarak tamamlanmıştır. Analizler 4000-650 cm^{-1} dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiş ve Şekil 6'da verilmektedir.

FTIR test sonuçları incelendiğinde ilk olarak 2850- 2900 cm^{-1} de arasında yer alan titreşim pikleri, C=CH, CH₂, CH₃ gruplarının asimetrik ve simetrik gerilmelerine karşılık gelir (Rolere ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2017). Kauçuklara kenevir eklenmeleri durumunda piklerin yaklaşık aynı dalga boyunda gözlenmiş olması içeriklerin bu bağ yapısında yüksek oranda değişiklik meydana getirmediğini göstermektedir.

1730 cm^{-1} 'deki titreşimler, hemiselülozun C-O titreşimine atfedilir (Smith, 1998; Lu & Oza, 2013a, Lu & Oza, 2013b).

1550 ve 1493 cm^{-1} 'deki titreşimler, aromatik lignin gruplarının varlığından kaynaklanmaktadır (Datta ve ark., 2016; Hahhighatnia ve ark., 2017).

1086 ve 1030 cm^{-1} , ligninden kaynaklanan aromatik CH gruplarının düzlem içi deformasyonuna atfedilmiştir (Stark ve ark., 2016). Bu pikin şiddetin ham kauçuğa göre azaldığı gözlenmektedir. Bunun sebebi kenevirdeki selüloz veya -O-H gibi fonksiyonel gruplara sahip diğer bileşikler ile karboksilat anyonu arasındaki H bağı etkileşimlerinden kaynaklandığı söylenebilir. 759 ve 699 cm^{-1} 'de yer alan titreşim tepe noktaları, sırasıyla aromatik halkadaki CH gruplarının deformasyonuna ve düzlem dışı bükülmesine karşılık gelir (Rolere ve ark., 2015). Diğer pik değerleri ise bağlayıcı olarak tanımladığımız binder kaynaklı piklerdir. Sonuç olarak FTIR spektrumunda kenevirin etkilerine rastlanmış ancak kauçuk içeriğinde çok büyük bir değişiklik gözlemlenmemiştir.



Şekil 6. FTIR spektrometresi analiz sonuçları.

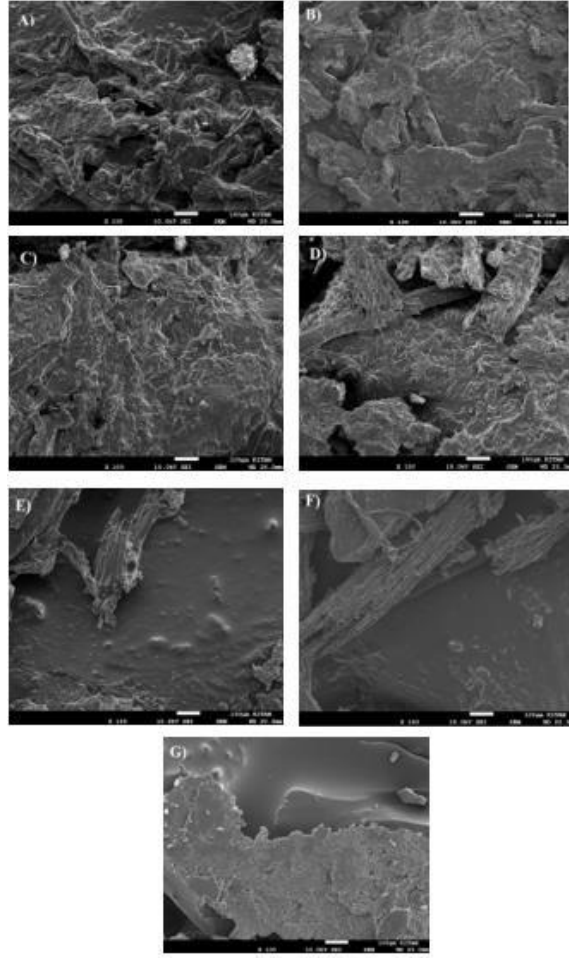
4.3. SEM analiz sonuçları

Kenevir takviyeli kauçuk numunelerin ve ham kauçuğun yüzey morfolojisini ve fazlar arasındaki arayüzey kalitesini incelemek için SEM ile elde edilen görüntüleri Şekil 7'de verilmektedir.

Kompozitlerde konsantrasyonun yanı sıra parçacık boyutu nihai karışım özelliklerini etkiler (Datta & Włoch, 2015; Halász ve ark., 2020). Fazli & Rodrigue (2020) yaklaşık 1 μm 'lik kauçuğun, matriste daha kolay dağıldığını; ancak böyle bir parçacık boyutunun kriyojenik teknikle bile üretilmesinin kolay olmadığını ifade etmiştir.

Şekil 7'de verilen SEM görüntülerine göre 90 μm %20 ve 125 μm %10 olarak hazırlanan örneklerin iyi arayüz teması ile kauçuk matrisini iyi oranda kapladığını görebiliyoruz. 250 μm parçacık boyutlu kenevir katkılı numunelerde ise yüzey ile tam bir birleşme, yapışma sağlanmadığı gözlemlenmektedir. Candau ve ark. (2021) termoplastikteki kauçuğun kütle oranı ağırlıkça %10-20'ye yaklaştığında kompozitin mekanik performansı kötüleştiğini bildirmiştir. Bu nedenle, kauçuğun matris içinde iyi bir dağılımını elde etmek ve iki faz arasındaki arayüzey yapışmasını geliştirmek için, kauçuk

ve matris elemanının parçacık boyutunu azaltmak, bağlayıcılar veya vulkanizasyon ajanları ile yüzey modifikasyonunu sağlamak gerekir (Li ve ark., 2020; Zedler ve ark., 2020).

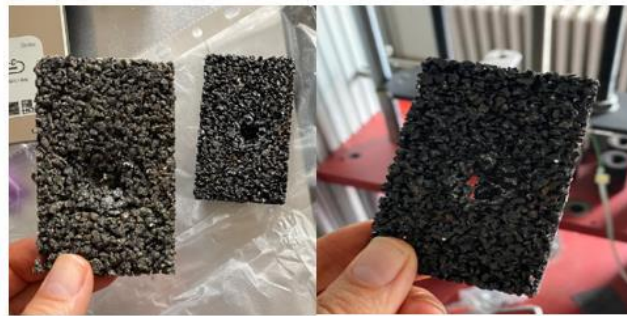


Şekil 7. A) 90 µm %10 B) 90 µm %20 C) 125 µm %10 D) 125 µm %20 E) 250 µm %10 F) 250 µm %20 G) Ham kauçuk SEM görüntüleri.

4.4. Düşen ağırlık darbe testi sonuçları

Düşen ağırlık darbe testi için İTÜpleks laboratuvarında deneme çalışması olarak 54*88mm olarak kenevir-kauçuk numuneleri oluşturularak analiz edilmiştir (Şekil 8).

Analiz sonuçlarına göre Şekil 8’de görüldüğü gibi cihaz tarafından 200 N yük ile gönderilen konik uçlu ağırlık numunenin delinmesine neden olmuştur ancak numune 200 N yüke dayanamadığı için cihaz tepkiyi titreşim olarak algılayıp sonuç vermemiştir. Bu nedenle düşen ağırlık darbe testi sonuçları verilememektedir.



Şekil 8. Düşen ağırlık darbe testi sonuçları.

Lee ve ark. (2001), sert ve esnek kompozitlerin enerji emme davranışını incelediler; bunun sonucu, enerjinin esnek kompozitler yerine sert kompozitler tarafından daha iyi emildiğini gösterdi. Ancak Gopinath ve ark. (2012) ve Wang ve ark. (2017), sert kompozitlerle karşılaştırıldığında daha büyük deformasyona sahip esnek kompozitlerde enerji soğurma yeteneğinin daha iyi olduğunu kanıtladı. Wang ve ark. (2017), polimer matrisli kompozitlerin darbesine karşı direncin kullanılan matris tipine bağlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Arikian & Sayman (2015) PMC'lerin gerekli darbe tepkisini elde etmek için hem matris hem de takviyenin uygun şekilde seçilmesi önemlidir.

Darbe testi sonucunda oluşan kırılmaya benzer olarak Kakroodi ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada Maleatlı polietilen (MAPE) /kenevir matrisli kompozit darbe test sonucuna yönelik MAPE matrisi test koşulları altında (oda sıcaklığı) kırılmazken, kenevir eklenmesi görünür bir kırılma meydana getirdiğini bildirdi. Bununla birlikte, kenevir içeriğinin artmasıyla yani %10-60 kenevir eklendiğinde 369.2 J/m'den 127.5 J/m'ye darbe mukavemetinde önemli düşüşler gözlemlendiği bildirilmiştir. Ayrıca Katz ve ark. (2008), Caminero ve ark. (2018), Mahesh ve ark. (2019) kompozitte kullanılan takviye ve yapısı, kompozit tabakanın kalınlığı ve istifleme sırası gibi çeşitli faktörler, kompozitlerin farklı darbe tepkilerinin elde edilmesinden sorumlu olduğunu belirtmiştir.

4.5. Termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları

Termogravimetrik analiz, numunelerin sıcaklık arttıkça fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri ve sıcaklıkla uçucu organik salınımını belirlemek için yapılmıştır. Ham kauçukta ilk termal bozunma 28.62 °C sıcaklıkta gerçekleşirken, kenevir eklenmiş diğer numunelerde %20 oranında 250 µm kenevir eklenen numune haricinde tüm numunelerde bozunma 30°C nin üzerinde gerçekleşmiştir. Kenevir eklenmesi termal stabiliteyi düşürmekle birlikte sıcaklıkla kütle kaybı ve en az uçucu madde salınımı 90 µm %20 kenevirli numunede gerçekleşmiştir (Çizelge 3). Fiber takviyeli kompozitlerin termal stabiliteyi düşürmesine ilişkin sonuçlar Lee ve ark. (2013); Okçuer (2021) tarafından sunulmuştur.

Çizelge 3. TGA sonuçları

Numune	Başlangıç °C	Bitiş °C	Kütle kaybı (%)
Ham kauçuk	28.62	201.20	-2.154%
90 µm %10	33.64	201.20	-2.617%
90 µm %20	32.94	201.20	-2.139%
125 µm %10	28.53	201.20	-2.916%
125 µm %20	38.19	201.20	-3.664%
250 µm %10	32.71	201.20	-2.435%
250 µm %20	28.35	201.20	-3.694%

4.6. Su emme testi sonuçları

24 saat saf su içerisinde bekletilen numuneler kurularak tartılmıştır. Çizelge 4'te verilen sonuçlara göre en düşük su içeriği ham kauçuktan sonra 90 µm %10 kenevir katkı içeren numunede görülmektedir. En yüksek içerik ise kütlece ve boyut olarak fazla olan 250 µm %20 kenevir katkı içeren numunede görülmektedir.

Doğal elyafli kompozitlerin su emme özellikleri, elyafın doğal özellikleri, elyaf yüklemesi ve yönelimi, plastik türleri (matrisin viskozitesi), elyaf-matris etkileşimi, kullanılan katkı maddesi, maruz kalan alan gibi iç faktörler ve yüzeyler, boşluk içeriği, lümen boyutu ve ıslatma ortamının nemi ve sıcaklığı ve yüzey koruması gibi dış faktörlerden etkilenir (Jawaid & Abdul Khalil, 2011; Jawaid ve ark., 2011; Dittrich ve ark., 2014; Ahmad Saidi ve ark., 2018; Ramlee ve ark., 2019). Su emme kapasitesini etkili bir şekilde en aza indirmek için, fiber üzerinde yüzey işlemi, bağdaştırıcı veya birleştirme maddesi gibi katkı maddelerinin dahil edilmesi ve nanopartiküllerin dahil edilmesi dahil olmak üzere modifikasyon yöntemlerinin ileriye dönük kullanımı gibi önemli çabalar sarf edilmektedir (Chen ve ark., 2015; Martín del Campo ve ark., 2020). Hidrofilik olan kenevir liflerinin eklenmesi, kompozit malzemeler tarafından tutulabilen su içeriğini büyük ölçüde artırır bu nedenle kenevir gibi

doğal elyaf malzemelerle oluşturulacak kompozitlerde hem mekanik hem fiziksel özellikleri açısından optimum matris oranının bulunması önemlidir.

Çizelge 4. Su emme testi sonuçları

Numune	İlk Tartım (M1)(mg)	Son Tartım (M2)(mg)	% Su içeriği
Ham kauçuk	4451.6	4835	8.61
90 µm %10	4788	5254.1	9.73
90 µm %20	4433	5240.3	18.21
125 µm %10	4705.5	5182.4	10.13
125 µm %20	4663	5530.6	18.61
250 µm %10	4697	5196.8	10.64
250 µm %20	4789	6130.4	28.01

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada kompozit üretiminde kenevir katkısı kullanılarak atık lastiklerin geri dönüşümünde yeşil yapı malzemesi üretimi hedeflenmiştir.

–Kenevir kıtık ve ömrünü tamamlamış lastik atıklar kullanılarak oluşturulan kompozit malzeme analiz sonuçlarına göre basınç testinde 1000 N yük altında ham kauçuk 6 mm lik kısalma gösterirken, 90 µm %10 kenevir ilave edilmiş kompozit 5.46 mm kısalma göstererek daha yüksek dayanım göstermiştir.

–FTIR sonuçlarına göre kauçuğa kenevir ilavesi kauçuktaki fonksiyonel grupların yapısını değiştirmemiştir.

–SEM görüntüleme sonuçlarına göre 90 ve 125 µm parçacık boyutlu numunelerin arayüz teması ve kauçuğu kaplama potansiyeli uygun görünürken 250 µm boyutlu numunelerde iyi bağlanma olmadığı görülmektedir.

–Düşen ağırlık darbe testine göre deneme amaçlı yapılan teste %10 oranında 125 µm kenevir eklenerek hazırlanan deneme numunesi 200 N yüke dayanamadığı için cihaz tepkiyi titreşim olarak algılayıp sonuç vermemiştir. Bu nedenle diğer numuneler için analiz tekrar edilmemiştir.

–TGA sonuçlarına göre sıcaklıkla termal bozunma ham kauçuk dışındaki numunelerde 30 °C nin üzerinde başlamıştır ve uçucu organik madde salınımı 90 µm %20 numunesinde -2.139% olarak ham kauçuğun (-2.154) da altındadır.

–Su emme testi sonuçları ise lifli yapıda olması nedeniyle kenevir katkılı numunelerin % su içeriği ham kauçuğa (%8.61) göre fazladır, ancak 90 µm %10 kenevir eklenmiş numune % 9.73 su içeriği ile % 8.61 olan ham kauçuğa en yakın değere sahiptir.

Sonuç olarak çalışmada elde edilen kompozit örnekleri ham kauçuğa benzer ve üstün özellikler göstermektedir. En iyi sonuçlar 90 µm kenevir eklenen numunelerde elde edilmiştir. Ancak bu çalışmada en önemlisi hem atık lastiklerin geri dönüştürülmesi, hemde bitkisel bir ürün olan kenevirin dahil edilerek yeşil yapı malzemesi üretimi ile karbon salınımını azaltan çevre dostu kompozit oluşturularak alternatiflerine referans olacak bir ürün üretilmesidir.

Teşekkür

Bu çalışma PYO.MUH.1908.21.003 proje numarası ile Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir.

Kaynakça

Adhikari, B., De, D., & Maiti, S. (2000). Reclamation and recycling of waste rubber. *Progress in Polymer Science*, 25, 909-948. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00020-4)

- Ahmad Saidi, M. A., Ahmad, M., Arjmandi, A. Hassan, R., & Rahmat, A. (2018). The effect of titanate coupling agent on water absorption and mechanical properties of rice husk filled poly (vinyl Chloride) composites. *Woodhead Publishing*, 197-210. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102160-6.00010-X>
- Amaducci, S., & Gusovius, H. J. (2010). Hemp–cultivation, extraction and processing. In: Müsig, J. (Ed.), *Industrial Applications of Natural Fibres* (pp. 109-134). John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK,
- Amaducci, S., Scordia, D., Liu, F. H., Zhang, Q., Guo, H., Testa, G., & Cosentino, S. L. (2015). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Industrial Crops and Products*, 68, 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.041>
- Antakya Belediyesi. (2014). Ömrünü tamamlamış lastiklerin toplanması. Erişim tarihi: 23.02.2024 <https://www.antakya.bel.tr/NotFound.aspx?aspxerrorpath=/icerik/102/145/omrunutamamlamis-lastiklerin-toplanmasi.aspx>
- Arikan, V., & Sayman, O. (2015). Comparative study on repeated impact response of E glass fiber reinforced polypropylene & epoxy matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 83,1-6. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.051>
- Babu, K. S., & Ratnam, C. (2021). Mechanical and thermophysical behavior of hemp fiber reinforced gypsum composites. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2245-2249. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.363>
- Caminero, M. A., García-Moreno, I., & Rodríguez, G. P. (2018). Experimental study of the influence of thickness and ply-stacking sequence on the compression after impact strength of carbon fibre reinforced epoxy laminates. *Polymer Testing*, 66, 360-370. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.02.009>
- Candau, N., Oguz, O., Le' on Albiter, N., Forster, G., & MasPOCH, M. L. (2021). Poly (lactic acid)/ground tire rubber blends using peroxide vulcanization. *Polymers (Basel)*, 13, 1496, <https://doi.org/10.3390/polym13091496>
- Casas, X. A., & Pons, J. R. I. (2005). Environmental analysis of the energy use of hemp-analysis of the comparative life cycle: diesel oil vs. Hemp-diesel. *International Journal of Agricultural Resources Governance Ecology*, 4(2),133–9. <https://doi.org/10.1504/IJARGE.2005.007195>
- Cazan, C., Cosnita, M., & Isac, L. (2019). The influence of temperature on the performance of rubber-PET-HDPE waste -based composites with different inorganic fillers. *Journal of Clean. Production*, 208, 1030-1040. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.045>
- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: Science and engineering*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74365-3>
- Chen, R. S., Salleh, M., Ab Ghani, M., Ahmad, S., & Gan, S. (2015). Biocomposites based on rice husk flour and recycled polymer blend: effects of interfacial modification and high fibre loading. *BioResources*, 10(4), 6872-6885. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.6872-6885>
- Choi, G. G., Oh, S. J., & Kim, J. S. (2017). Clean pyrolysis oil from a continuous two-stage pyrolysis of scrap tires using in-situ and ex-situ desulfurization. *Energy*, 141, 2234-2241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.015>
- Dabhi, A. S. (2016). *Biodegradable natural fiber composites: fabrication and characterization of hemp fiber with PLA powder composites*. (MSc.) Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, U.S.A.
- Datta, J., & Włoch, M. (2015). Morphology and properties of recycled polyethylene/ground tyre rubber/thermoplastic poly (esterurethane) blends. *Macromolecular Research*, 23, 1117-1125. <https://doi.org/10.1007/s13233-015-3155-5>
- Datta, J., Parcheta, P., & Surówka, J. (2016). Softwood-lignin/natural rubber composites containing novel plasticizing agent: preparation and characterization. *Industrial Crops and Products*, 95, 675-685. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.036>
- Deeraj, B. D. S., Joseph, K., Jayan, J. S., & Saritha, A. (2021). Dynamic mechanical performance of natural fiber reinforced composites: a brief review. *Applied Science and Engineering Progress*, 14(4), 614-623. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2021.06.003>
- De Sousa, F. D. B. (2016). Vulcanization of natural rubber: past, present and future perspectives. (pp. 47–88.) In: Hamilton, J. L. (Ed.), *Natural rubber: Properties, behavior and applications*. Nova Science Publishers: New York.

- Dhakal, H. N., Zhang, Z. Y., & Richardson, M. O. W. (2007). Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*, 67(7-8), 1674-1683. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.019>
- Dittrich, B., Wartig, K. A., Mülhaupt, R., & Schartel, B. (2014). Flame-retardancy properties of intumescent ammonium poly (phosphate) and mineral filler magnesium hydroxide in combination with graphene. *Polymers*, 6, 2875-2895. <https://doi.org/10.3390/polym6112875>
- Dobrotă, D., & Dobrotă, G. (2018). An innovative method in the regeneration of waste rubber and the sustainable development. *Journal of Clean. Production*, 172, 3591-3599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.022>
- Donfouet, H. P. P., Barczak, A., Detang-Dessendre, C., & Maigne, E. (2017). Crop production and crop diversity in France: a spatial analysis. *Ecological Economics*; 134, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.11.016>
- Dubkov, K. A., Semikolenov, S. V., Ivanov, D. P., Babushkin, D. E., Panov, G. I., & Parmon, V. N. (2012). Reclamation of waste tyre rubber with nitrous oxide. *Polymer Degradation and Stability*, 97, 1123-1130. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.04.006>
- El-Shekeil, Y. A., AL-Oqla, F. M. Refaey, H. A., Bendoukha, S., & Barhoumi, N. (2024). Investigating the mechanical performance and characteristics of nitrile butadiene rubber date palm fiber reinforced composites for sustainable bio-based materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.092>
- Fazli, A., & Rodrigue, D. (2020). Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers. *Materials*, 13, 782. <https://doi.org/10.3390/ma13030782>
- Fernea, R., Manea, D.L., Tamas-Gavrea, D.R., & Rosca, I.C. (2019). Hemp-clay building materials-an investigation on acoustic, thermal and mechanical properties. *Procedia Manufacturing*, 32, 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.205>
- Finnan, J., & Styles D. (2013). Hemp: a more sustainable annual energy crop for climate and energy policy. *Energy Policy*, 58, 152-62. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.046>
- Fuqua, M. A., Huo, S., & Ulven, C. A. (2012). Natural fiber reinforced composites. *Polymer Reviews*, 52, 259-320. <https://doi.org/10.1080/15583724.2012.705409>
- Gopinath, G., Zheng, J. Q., & R. C. (2012). Effect of matrix on ballistic performance of soft body armor. *Composite Structures*, 94, 2690-2696. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.03.038>
- Gupta, V. K., Ganjali, M. R., Nayak, A., Bhushan, B., & Agarwal, S. (2012). Enhanced heavy metals removal and recovery by mesoporous adsorbent prepared from waste rubber tire. *Chemical Engineering Journal*, 197, 330-342. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.104>
- Haghighatnia, T., Abbasian, A., & Morshedian, J. (2017). Hemp fiber reinforced thermoplastic polyurethane composite: An investigation in mechanical properties. *Industrial Crops and Products*, 108, 853-863. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.020>
- Halász, I.Z., Kocsis, D., Simon, D. A., Kohari, A., & Barany, T. (2020). Development of polypropylene-based thermoplastic elastomers with crumb rubber by dynamic vulcanization: a potential route for rubber recycling. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 64, 248-254. <https://doi.org/10.3311/PPch.13962>
- Jawaid, M., Abdul Khalil, H.P.S., Khanam, P.N., & Bakar, A. A. (2011). Hybrid composites made from oil palm empty fruit bunches/jute fibres: water absorption, thickness swelling and density behaviours. *Journal Polymers Environment*, 19, 106-109. <https://doi.org/10.1007/s10924-010-0203-2>
- Jawaid, M., & Abdul Khalil, H. P. S. (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: a review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>
- Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: an overview. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2883- 2892. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>
- Kakroodi, A. D., Kazemi, Y., & Rodrigue, D. (2013). Mechanical, rheological, morphological and water absorption properties of maleated polyethylene/hemp composites: Effect of ground tire rubber addition. *Composites Part B: Engineering*, 51, 337-344. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.032>

- Karger-Kocsis, J., Meszaros, L., & Barany, T. (2013). Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. *Journal of Material Science*, 48, 1-38. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6564-2>
- Katz, S., Grossman, E., Gouzman, I., Murat, M., Wiesel, E. & Wagner, HD. (2008). Response of composite materials to hypervelocity impact. *International Journal Impact Engineering*, 35, 1606-1611. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.07.032>
- Kumar, G. S., Rathan, A., Bandhu, D., Reddy, B. M., Rao, H. R., Swami, S., Saxena, K.K., Eldin, S.M., & Prashanth, N. N. A. (2023). Mechanical and thermal characterization of coir/hemp/polyester hybrid composite for lightweight applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 8242-8253. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.144>
- Lee, B. L., Walsh, T. F., Won, S. T., Patts, H. M., Song, J. W., & Mayer, A. H. (2001). Penetration failure mechanisms of armor-grade fiber composites under impact. *Journal of Composite Material*, 35, 1605-1633. <https://doi.org/10.1106/YRBH-JGT9-U6PT-L555>
- Lee, J. M., Mohd Ishak, Z. A., Mat Taib, R., Law, T. T., & Ahmad Thirmezir, M. Z. (2013). Mechanical, thermal and water absorption properties of kenaf-fiber-based polypropylene and poly (butylene succinate) composites. *Journal of Polymers and Environment*, 21, 293-302. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0516-4>
- Li, S., Tian, H., Wu, H., Ning, N., Tian, M., & Zhang, L. (2020). Coupling effect of molecular weight and crosslinking kinetics on the formation of rubber nanoparticles and their agglomerates in EPDM/PP TPVs during dynamic vulcanization. *Soft Matter*, 16, 2185-2198. <https://doi.org/10.1039/c9sm02059d>
- Li, Y., Zhao, S., & Wang, Y. (2011). Microbial desulfurization of ground tire rubber by thiobacillus ferrooxidans. *Polymer Degradation and Stability*, 96, 1662-1668. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.06.011>
- Liu, S., Ge, L., Gao, S., Zhuang, L., Zhu, Z., & Wang, H. (2017). Activated carbon derived from biowaste hemp hurd and retted hemp hurd for CO₂ adsorption. *Composites Communications*, 5, 27-30. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2017.06.002>
- Liu, H.L., Wang, X.P. & Jia, D.M. (2020). Recycling of waste rubber powder by mechanochemical modification. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118716. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118716>
- Lu, N., & Oza, S. (2013a). A comparative study of the mechanical properties of hemp fiber with virgin and recycled high density polyethylene matrix. *Composites Part B: Engineering*, 45, 1651-1656. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.076>
- Lu, N., & Oza, S. (2013b). Thermal stability and thermo-mechanical properties of hemp-high density polyethylene composites: effect of two different chemical modifications. *Composites Part B: Engineering*, 44, 484-490. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.03.024>
- Mahesh, V., Joladarashi, S., & Kulkarni, S. (2019). Investigation on effect of using rubber as core material in sandwich composite plate subjected to low velocity normal and oblique impact loading. *Sci Iran Trans Mech Eng*, 6, 897-907. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.5538.1331>
- Mangili, I., Oliveri, M., Anzano, M., Collina, E., Demetrio, P., & Lasagni, Marina. (2014). Full factorial experimental design to study the devulcanization of ground tire rubber in supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.06.001>
- Mangili, I., Lasagni, M., Anzano, M., Collina, E., Tatangelo, V., Franzetti, A., Caracino, P., & Isayev, A. I. (2015). Mechanical and rheological properties of natural rubber compounds containing devulcanized ground tire rubber from several methods. *Polymer Degradation and Stability*, 121, 369-377. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.10.004>
- Manuel, H. J. (2001). Standards for rubber granulates and powders. *KGK-Kautschuk und Gummi Kunststoffe*, 54, 101-105.
- Marrot, L., Meile, K., Zouari, M., DeVallance, D., Sandak, A., & Herrera R. (2022). Characterization of the compounds released in the gaseous waste stream during the slow pyrolysis of hemp (*Cannabis sativa* L.). *Molecules*, 27(9), 2794. <https://doi.org/10.3390/molecules27092794>
- Martín del Campo, A., Robledo-Ortiz, J.R., Arellano, M., Jasso-Gastinel, C. F., Silva-Jara, J. M., López-Naranjo, E. J., & Perez Fonseca, A. A. (2020). Glycidyl methacrylate as compatibilizer of poly (lactic acid)/nanoclay/agave fiber hybrid biocomposites: effect on the physical and

- mechanical properties. *Revista Mexicana de Ingenieria Quimica*, 19, 455-469. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Mat627>
- Mohammed, L., Ansari, M. N., Pua, G., Jawaid, M., & Islam, M. S. (2015). A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International Journal of Polymer Science*, 2015, 243947. <https://doi.org/10.1155/2015/243947>
- Moni Ribeiro Filho, S. L., Oliveira, P. R., Panzera, T. H., & Scarpa, F. (2019). Impact of hybrid composites based on rubber tyres particles and sugarcane bagasse fibres. *Composites Part B: Engineering*, 159, 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.054>
- Müssig, J. (2010). *Industrial Applications of Natural Fibres*. John Wiley & Sons, Ltd: Chichester, UK.
- Müssig, J., Amaducci, S., Bourmaud, A., Beaugrand, J., & Shah, D.U. (2020). Transdisciplinary top-down review of hemp fibre composites: from an advanced product design to crop variety selection. *Composites Part C: Open Access*, 2, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100010>
- Müssig, J., & Christian, S. (2010). *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. John Wiley & Sons.
- Mwaikambo, L. Y., Tucker, N., & Clark, A. J. (2007). Mechanical properties of hemp-fibre-reinforced euphorbia composites. *Macromolecular Materials Engineering*, 292, 993-1000. <https://doi.org/10.1002/mame.200700092>
- Myhre, M., & MacKillop, D. A. (2002). Rubber recycling. *Rubber Chemistry and Technology*, 75(3), 429-474. <https://doi.org/10.5254/1.3547678>
- Nuzaimah, M., Sapuan, S. M., Nadlene, R., & Jawaid, M. (2018). Recycling of waste rubber as fillers: A review. *IOP Conf. Ser. Materials Science Engineering*, 368, 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/368/1/012016>
- Okçuer, T. H. (2021). *Endüstriyel kenevirden kompozit malzeme geliştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, Türkiye.
- Parvez, A. M., Lewis, J. D., & Afzal, M. T. (2021). Potential of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) for bioenergy production in Canada: status, challenges and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110784. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110784>
- Pittau, F., Krause, F., Lumia, G., & Habert, G. (2018). Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. *Building and Environment*, 129, 117-129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.006>
- Pittau, F., Lumia, G., Heeren, N., Iannaccone, G., & Habert, G. (2019). Retrofit as a carbon sink: the carbon storage potentials of the EU housing stock. *Journal of Clean Production*, 214, 365-76. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.304>
- Ramarad, S., Khalid, M., Ratnam, C.T., Chuah, A.L., & Rashmi, W. (2015). Waste tire rubber in polymer blends: a review on the evolution, properties and future. *Progress Materials Science*, 72, 100-140. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.02.004>
- Ramlee, N. A., Jawaid, M., Zainudin, E. S., & Yamani, S. A. K. (2019). Tensile, physical, and morphological properties of oil palm empty fruit bunch/sugarcane bagasse fibre reinforced phenolic hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(4), 3466-3474. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.016>
- Ranalli, P., & Venturi, G. (2004). Hemp as a raw material for industrial applications. *Euphytica*, 140, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s10681-004-4749-8>
- Rolere, S., Liengprayoon, S., Vaysse, L., Sainte-Beuve, J., & Bonfils, F. (2015). Investigating natural rubber composition with Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy: A rapid and non-destructive method to determine both protein and lipid contents simultaneously. *Polymer Testing*, 43, 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.02.011>
- Rouison, D., Sain, M., & Couturier, M. (2006). Resin transfer molding of hemp fiber composites: optimization of the process and mechanical properties of the materials. *Compos Sci Technol*; 66(7e8):895-906. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.07.040>
- Sair, S., Oushabi, A., Kammouni, A., Tanane, O., Abboud, Y., & El Bouari, A. (2018). Mechanical and thermal conductivity properties of hemp fiber reinforced polyurethane composites. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.02.001>

- Satapathy, S., Nag, A., & Nando, G. B. (2010). Thermoplastic elastomers from waste polyethylene and reclaim rubber blends and their composites with fly ash. *Process Safety and Environmental Protection*, 88, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2009.12.001>
- Scrucca, F., Ingrao, C., Maalouf, C., Moussa, T., Polidori, G., Messineo, A., Arcidiacono C., & Asdrubali, F. (2020). Energy and carbon footprint assessment of production of hemp hurds for application in buildings. *Environmental Impact Assessment Review*, 84, 106417. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106417>
- Smith, B. (1998). *Infrared spectral interpretation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203750841>
- Stark, N. M., Yelle, D. J., & Agarwal, U. P. (2016). Techniques for characterizing lignin. In: Faruk, O., Sain, M. (Eds.), *Lignin in Polymer Composites* (pp. 49-66). Elsevier, Vancouver, Canada.
- Tahir, P. M., Ahmed, A. B., Azry, S. O. A. S., & Ahmed, Z. (2011). Retting process of some bast plant fibres and its effect on fibre quality: a review. *BioResources*, 6, 5260-5281.
- Tucci, F., Larrea-Wachtendorff, D., Ferrari, G., & Carlone, P. (2022). Pulling force analysis in injection pultrusion of glass/epoxy composites. *Materials and Manufacturing Processes*, 37(15), 1715-1726. <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2049296>
- Van Vuure, A. W., Baets, J., Wouters, K., & Hendrickx, K. (2015). Compressive properties of natural fibre composites. *Materials Letters*, 149, 138-140. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.01.158>
- Wang, H., Hazell, P. J., Shankar, K., Morozov, E. V., & Escobedo, J. P. (2017). Impact behaviour of Dyneema fabric-reinforced composites with different resin matrices. *Polymer Testing*, 61, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.04.026>
- Wayal, A. S., & Wagle, M. D. (2013). Use of waste plastic and waste rubber in aggregate and bitumen for road materials. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(7), 301-306.
- Yao, C., Zhao, S., Wang, Y., Wang, B., Wei, M., & Hu, M. (2013). Microbial desulfurization of waste latex rubber with *Alicyclobacillus sp.* *Polymer Degradation and Stability*, 98, 1724-1730. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.06.002>
- Zedler, Ł., Kowalkowska-Zedler, D., Colom, X., Canavate, J., Saeb, M.R., & Formela, K. (2020). Reactive sintering of ground tire rubber (GTR) modified by a trans- polyoctenamer rubber and curing additives. *Polymers*, 12(12), 3018. <https://doi.org/10.3390/polym12123018>
- Zhang, S. L., Xin, Z. X., Zhang, Z. X., & Kim, J. K. (2009). Characterization of the properties of thermoplastic elastomers containing waste rubber tire powder. *Waste Management*, 29, 1480-1485. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.004>
- Zhang, J., Gao, J., Chen, Y., Hao, X., & Jin, X. (2017). Characterization, preparation, and reaction mechanism of hemp stem based activated carbon. *Results in physics*, 7, 1628-1633. <https://doi.org/10.1016/J.RINP.2017.04.02838>



Research Article

Investigation of Delamination in the Drilling of PLA Specimens with Different Lattice Structures

Ender EMİR^{*1}, Burak ÖZDEMİR², Erkan BAHÇE³, Gözde ERENER³

¹Istiklal University, Elbistan Vocational School, 4600, Kahramanmaraş, Türkiye

²Malatya Turgut Ozal University, Hekimhan MES Vocational School, 44200, Malatya, Türkiye

³Inonu University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering, 44200, Malatya, Türkiye

Ender EMİR, ORCID No: 0000-0003-4972-5064, Burak ÖZDEMİR, ORCID No: 0000-0002-5870-0398

Erkan BAHÇE, ORCID No: 0000-0001-5389-5571, Gözde ERENER, ORCID No: 0000-0002-4164-6380

*Corresponding author e-mail: ender.emir@istiklal.edu.tr

Article Info

Received: 07.12.2023

Accepted: 02.05.2024

Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1401574](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1401574)

Keywords

Additive manufacturing,
Delamination,
Drilling,
Lattice structure,
PLA

Abstract: Aim of this study examines the impact of processing parameters and lattice structures on delamination during the drilling of cylinder PLA (Polylactic acid) parts. The parts were designed with four different lattice structures (gyroid, I-WP, nevoius, and diamond) and produced using a 3D printer. A 5 mm HSS drill was used to drill from the center point. After drilling, images of the entrance and exit holes were captured using a digital microscope. The delamination, burr, and circularity around the hole were analyzed. The results showed that the Gyroid and I-WP lattice structures had the lowest delamination at the entrance and exit holes. No burr was observed at the entrance of the specimens. The Nevoius lattice structure exhibited the lowest burr value at the hole exit and entrance, as well as the lowest exit circularity deviation. Among the samples, the highest delamination was observed at the hole entrance in I-WP (0.5601), while the lowest delamination was observed in Gyroid (0.5423). At the hole exit, the highest delamination was observed in Gyroid (0.6229), and the lowest delamination was observed in I-WP (0.5426).

Farklı Kafes Yapılarına Sahip PLA Numunelerin Delinmesinde Delaminasyonun İncelenmesi

Makale Bilgileri

Geliş: 07.12.2023

Kabul: 02.05.2024

Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1401574](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1401574)

Anahtar Kelimeler

Delaminasyon,
Delik delme,
Eklemeli imalat,
Kafes yapıları,
PLA

Öz: Bu çalışmanın amacı, kafes yapıların delinmesinde işleme parametrelerinin ve farklı kafes yapılarının delaminasyon üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda dört farklı (gyroid, I-WP, nevoius ve elmas) kafes yapısında tasarlanan silindirik PLA (Polilaktik asit) parçalar 3D yazıcıda üretilmiş ve 5 mm HSS matkap ile merkez noktadan delinmiştir. Delme işleminden sonra dijital mikroskop ile giriş ve çıkış delik görüntüleri alınmış ve delik çevresinde delaminasyon, çapak ve dairesellik analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre deliğin girişinde en düşük delaminasyon Gyroid ve çıkışında I-WP kafes yapısında ölçülmüştür. Numunelerin delik girişinde çapak oluşmamıştır. Delik çıkışında çapak, giriş ve çıkış dairesellik sapması açısından en düşük değere sahip numunenin Nevoius kafes yapısı olduğu görülmektedir. Delik girişinde en yüksek delaminasyon I-WP'de (0.5601), en düşük delaminasyon ise Gyroid'de (0.5423) gözlemlenmiştir. Delik çıkışında en yüksek delaminasyon Gyroid (0.6229) numunesinde, en düşük delaminasyon ise I-WP (0.5426) numunesinde gözlemlenmiştir.

1. Introduction

PLA is a thermoplastic raw material with biodegradable and environmentally friendly properties (Tümer & Erbil, 2021). PLA is widely used in orthopedic implants, tissue engineering, textiles, automotive (Üner & Koçak, 2012; Yelten et al., 2022). In particular, PLA produces 3D models using the fused deposition modeling (FDM) additive manufacturing technique (Baraheni et al., 2021). However, additional joining processes, such as hole drilling and riveting, are required in PLA production. Depending on the machining parameters in drilling, the cutting forces negatively affect the surface and hole quality. Especially in the hole drilling process, delamination is one of the frequently encountered problems. The resulting delamination affects the tolerance in the joints after the drilling process (Domingo et al., 2015). In addition, due to the low thermal conductivity of PLA, which has a relatively low melting temperature, the heat generated during drilling remains on the surface and these areas melt and deform easily under heat (Boy, 2022). Decreased hole quality and clogging of the drill helix channels can result from the use of PLA, which is a brittle material that tends to crack during the drilling process. To avoid potential issues, it is imperative to optimize machining parameters such as cutting speed, speed, and feed rate. Studies have been carried out to optimize the drilling process of PLA and similar thermoplastic materials, as evidenced by the literature. Table 1 displays the studies on delamination and hole quality during the drilling of different polymer-based materials.

Table 1. Literature studies

Material	Machining type	Machining parameters		Result	Reference
		n (r/min)	f (mm/min)		
polypropylene	Drilling	4750	2500	A higher spindle and increased feed rate lead to higher roughness.	(Dhokia et al., 2008)
		5562.5	3125		
		6375	3750		
		7187.5	4375		
		8000	5000		
polyethylene	Drilling	Vc (m/min)	f (mm/rev)	Less deformation and fewer burrs occur at high feed rate and low cutting speed.	(Altan & Altan, 2014)
		30	0.006		
		40	0.0125		
polyamide polyether ether ketone polytetrafluoroethylene	Drilling	n (rpm)	f (mm/min)	Maximum delamination factor occurred at 7000 rpm and 400 mm/min feed rate; minimum delamination occurred at 6000 rpm and 300 mm/min feed rate.	(Domingo et al., 2015)
		6000	300		
		7000	400		
		8000	500		
carbon/polyimide carbon/polyether ether ketone	Drilling	Vc (m/min)	f (mm/rev)	Higher drilling forces resulted in more significant delamination and excessive tool wear.	(Xu et al., 2020)
		15	0.02		
		35	0.04		
		55	0.06		
		75	0.08		

Table 1. Literature studies (continued)

Material	Machining type	Machining parameters		Result	Reference
		Vc (mm/min)	f (mm/min)		
PLA	Drilling	165	1000	The best hole quality occurred at a feed rate of 1200 mm/min and a spindle speed of 600 rpm.	(Dezaki et al., 2020)
polyether ether ketone	Drilling	Vc (m/min)	f (mm/rev)	The lowest delamination was observed at a cutting speed of 120 m/min and a feed rate of 0.1 mm/rev. The highest delamination occurred at a cutting speed of 40 m/min and a feed rate of 0.2 mm/rev.	(Boy, 2022)
		40	0.1		
		80	0.15		
		120	0.2		

When the literature was examined, it was seen that there are a limited number of studies on drilling on PLA. The majority of studies have focused on the impact of feed rate and rotational speed parameters when drilling PLA plates. However, there is a gap in the literature regarding the drilling of lattice-structured specimens. Unlike the literature, the delamination that occurs when drilling different lattice structures produced with the additive manufacturing (AM) technique instead of flat PLA plates was examined. Lattice structures produced by AM are gaining popularity in various industrial fields, including biomedical, aviation, space, and defense industries. As the usage of lattice structures increases, post-production assembly operations require final machining. The most commonly used process for creating holes is hole drilling. However, during drilling operations, delamination can occur, which negatively affects the quality and durability of the assembly. Therefore, it is necessary to investigate the formation of delamination during the hole drilling process after producing lattice structures. In this study, PLA samples with four different lattice structures were produced using a 3D printer, and a drilling process was applied. Delamination, burrs, and circularity deviations were measured by taking images from the entrance and exit of the holes. The obtained results are discussed.

2. Material and Methods

2.1. Material

In this study, PLA was used as the production material. PLA was preferred because it has the characteristics of being easy to print and durable, which are widely used in 3D printers. The thermal and mechanical properties of PLA material are given in Table 2.

Table 2. Thermal and mechanical properties of PLA (Corneillie & Smet, 2015)

Properties	Value
Modulus of elasticity (MPa)	3500-4150
Tensile strength (MPa)	50-70
Elongation (%)	4-7
Melting point (°C)	150-170
Deformation temperature (°C)	55
Glass transition temperature (°C)	55-60

2.2. Design and production of lattice structures

Cylinder specimens with a height of 30 mm and a diameter of 20 mm were used in the experiments. The internal structure of the specimens was designed in four different lattice structures: gyroid, I-WP, nevoius and diamond. The lattice structures were designed using MSLattice software and CAD models were created (Figure 1). G codes of the designed models were created and production was carried out with the Ultimaker Extend 3 3D printer (Figure 2). Finally, drilling test specimens were obtained (Figure 3).

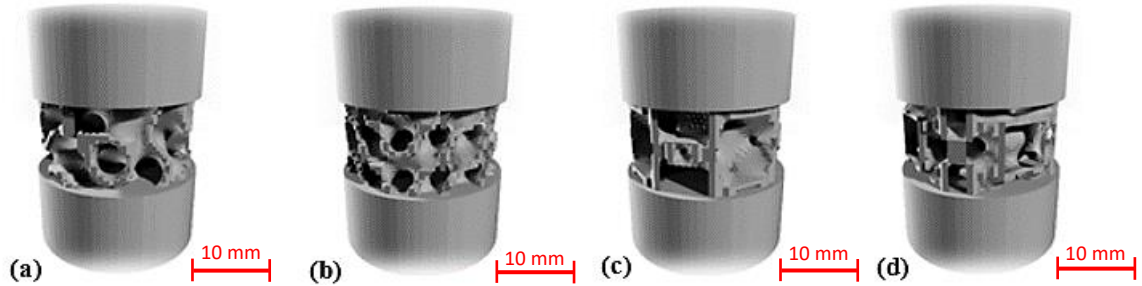


Figure 1. CAD models of lattice structures; (a) gyroid, (b) I-WP, (c) nevoius, (d) diamond.

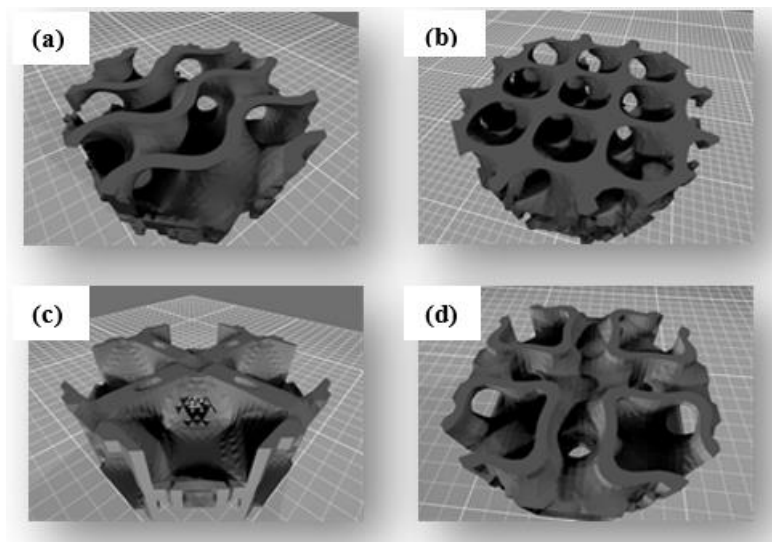


Figure 2. Lattice structure images of the samples; (a) gyroid, (b) I-WP, (c) nevoius, (d) diamond.

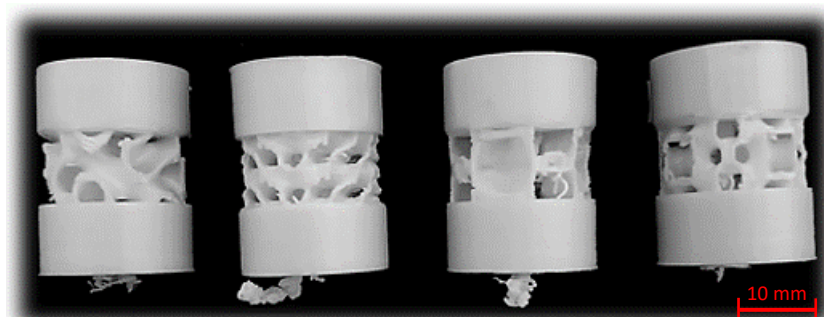


Figure 3. Drilling test specimens.

2.3. Drilling process

The drilling process was carried out using a 5 mm diameter HSS drill bit with a feed rate of 0.1 mm/rev and a speed of 4500 rpm. Drilling parameters were chosen similar to those in studies on

drilling PLA materials in the literature. The drilling process was carried out in Brother Speedio S500X1 brand (Türkiye/Malatya) CNC vertical machining center. Microscope images were taken from the drilled specimens and the effect of the lattice structure design on the hole quality was analyzed. The schematic representation of the drilling process is given in Figure 4.

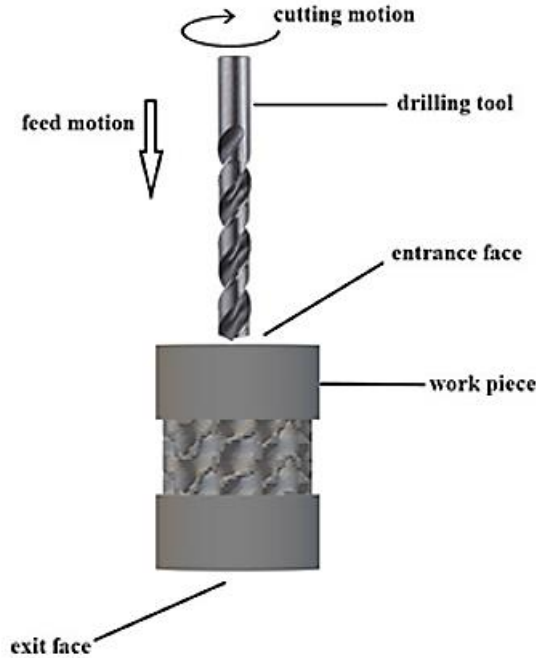


Figure 4. Schematic representation of the drilling process.

2.4. Calculation of the delamination factor

Delamination is calculated by the ratio of the rupture and deformation area the tool creates as it enters and exits the material. In this study, the delamination factor (F_d) was calculated by the ratio of (A_{del}) to the hole area (A_0) (Figure 5) (Equation 1) (Ozdemir et al., 2023). Hole images were taken with a Euromax Stereo Microscope.

$$F_d = \frac{A_{del}}{A_0} \quad (1)$$

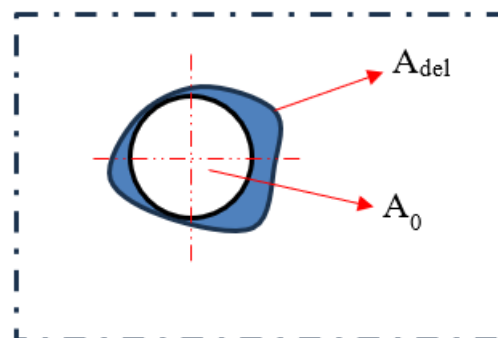


Figure 5. Delamination and hole area.

2.5. Calculation of the burr height measurement

The burr height resulting from the drilling process was measured using images taken from the Dino-Lite digital microscope. Measurements were taken at the entrance and exit of the hole and

averaged over the profile images of the part from four directions (see Figure 6) (Bahçe & Özdemir, 2021).

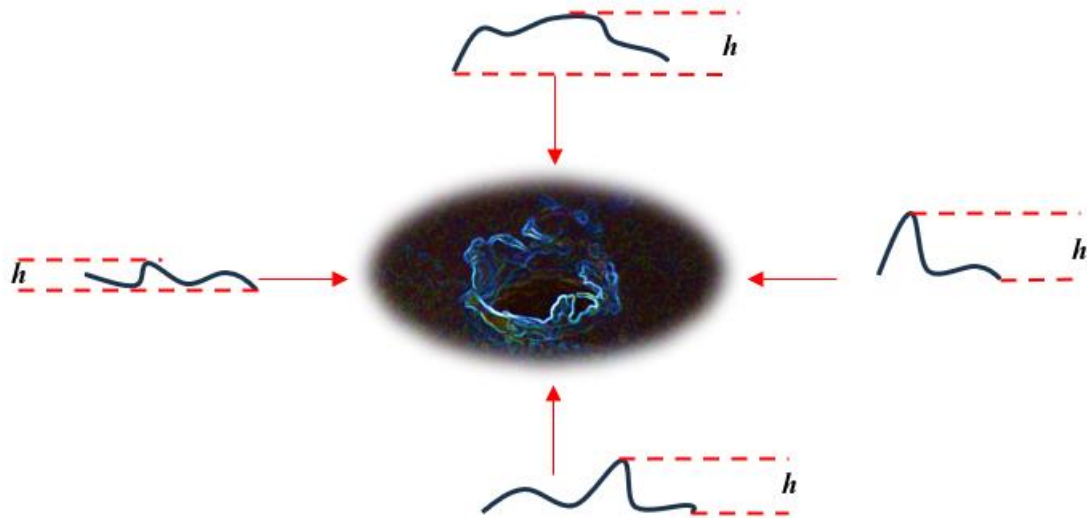


Figure 6. Burr height measurement.

2.6. Calculation of the hole circularity change

In the drilling process, heat is released due to the drill contacting the part at high speed. For this reason, parts made of PLA material may be subjected to distortion and melting due to excessive heat (Figure 7). This situation affects the circularity of the holes (Sato et al., 2017). Images were taken with a Dino-Lite digital microscope to measure the circularity at the entrance and exit of the holes. The transverse (D_w) and longitudinal (D_h) diameters of the holes were measured, and the sum of the ratio of the absolute difference between the required diameter (D_0) and the diameter was calculated as the circularity deviation (D_{def}) (Equation 2).

$$D_{def} = \frac{|D_w - D_0|}{D_0} + \frac{|D_h - D_0|}{D_0} \quad (2)$$

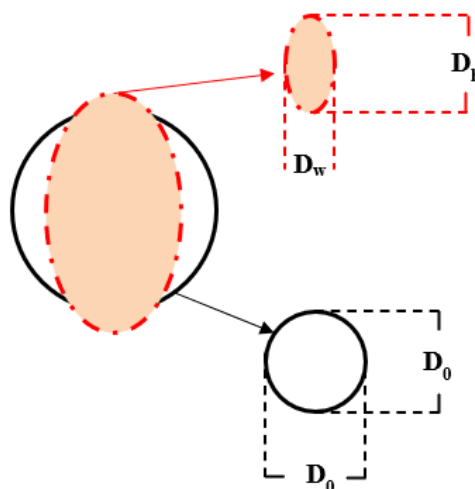


Figure 7. Hole circularity change.

3. Results and Discussion

The study analyzed the effects of lattice structure design on hole quality by performing drilling on specimens with four different designs: gyroid, I-WP, nevoius, and diamond. Delamination and burr heights around the hole were measured, and the circularity at the entrance and exit of the hole was calculated. The results are presented in Table 3.

Table 3. Experiment measurement results

Delamination		
Lattice structure	Entrance	Exit
Gyroid	0.5423	0.6229
I-WP	0.5601	0.5426
Nevoius	0.5578	0.5453
Dimond	0.5433	0.5765
Burr		
Lattice structure	Entrance	Exit
Gyroid	0	2.934
I-WP	0	0.154
Nevoius	0	0
Dimond	0	1.821
Circularity		
Lattice structure	Entrance	Exit
Gyroid	0.1923	0.1453
I-WP	0.2094	0.2521
Nevoius	0.1838	0.1068
Dimond	0.2051	0.2308

*Units mm.

3.1. Effect of lattice structure design on delamination

When the test specimens are analyzed, it is seen that the entrance and exit delamination values show different courses (Table 3). Entrance delamination was least in the Gyroid (0.5423) and most in the I-WP (0.5601) structure (Figure 8).

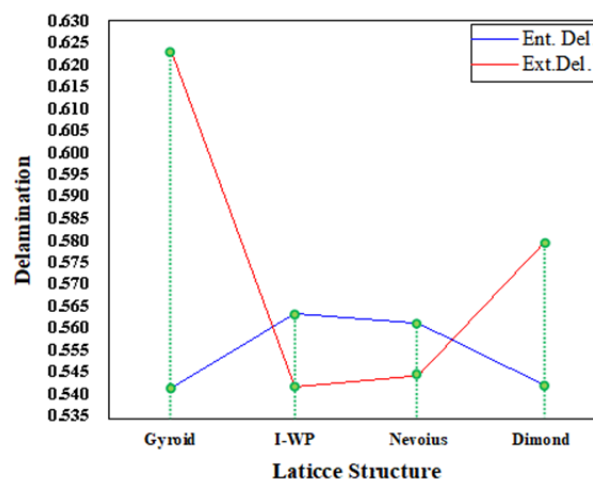


Figure 8. Hole entrance and exit delamination variation.

The Gyroid, nevoius, diamond lattice structures, and hole entrance exhibit slight delamination. In the I-WP lattice structure, the delamination area spreads over a wider region (see

Figure 9). The delamination at the hole entrance, caused by the initial impact of the drill against the part without cutting, is primarily due to the material absorbing the thrust force (Madhan Kumar & Jayakumar, 2022). Although all specimens were soft due to their plasticity, it can be concluded that the I-WP lattice structure behaves more rigidly and causes entry delamination. Deformations were independent of the central hole body, and burr extensions were not considered when calculating the delamination.

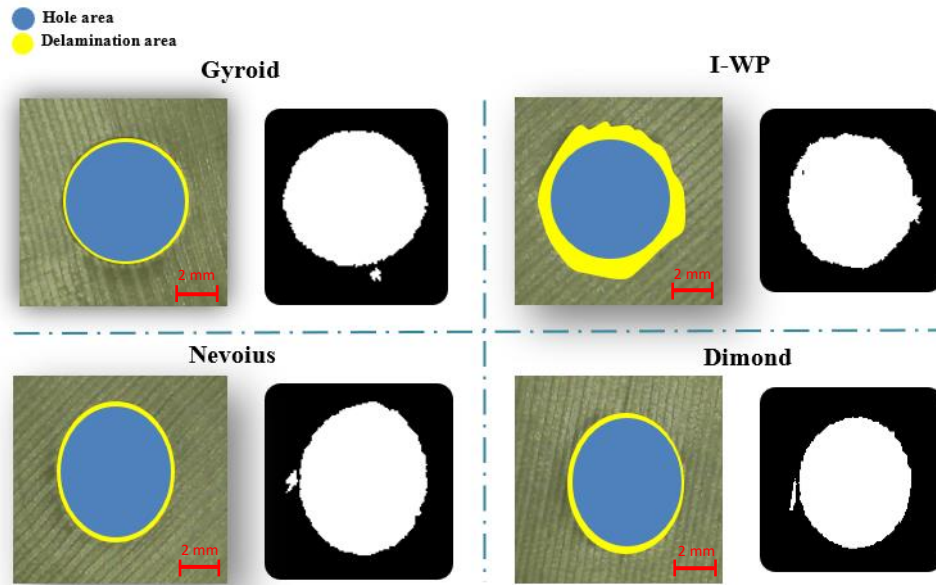


Figure 9. Hole entry delamination regions.

The delamination observed at the hole exit regions of the specimens is higher than at the entrance. The lattice structure with the highest delamination at the hole exit was Gyroid (0.6229), while the lowest was I-WP (0.5426). Figure 10 displays the delamination zones at the hole exit. Delamination at the hole exit is typically caused by chip accumulation, temperature, and sudden force changes that reduce the drill's cutting ability. Deformation occurs around the hole as a result of the drill breaking off the chip without cutting (Usta et al., 2022).

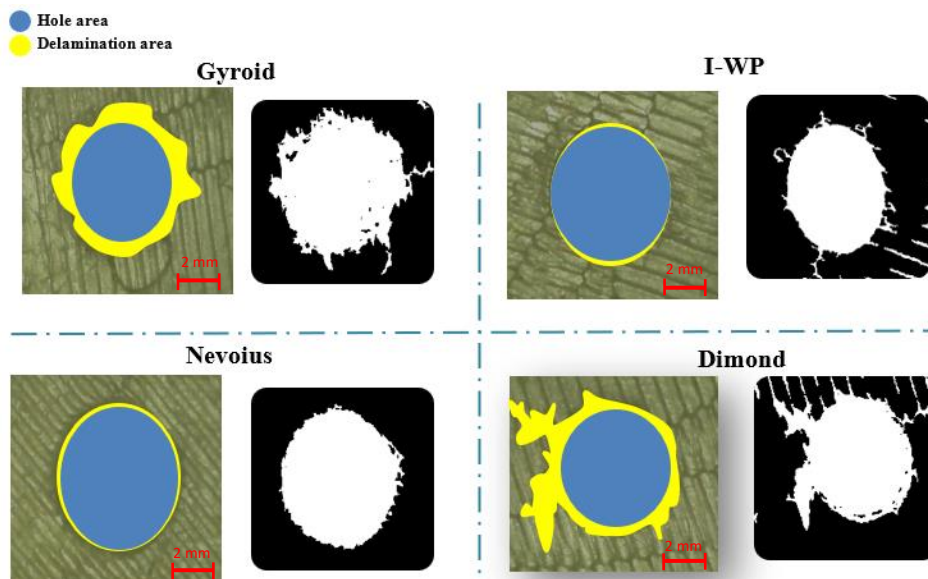


Figure 10. Hole exit delamination regions.

3.2. Effect of lattice structure design on burr size

The formation of burrs in the drilling process occurs as a result of the machining parameters (feed, speed) combined with the material properties of the workpiece and affecting the chip removal ability (Altan & Altan, 2014; Bahçe & Özdemir, 2019). In Figure 11, no burrs were observed at the entrance of the holes in all specimens. Additionally, the Nevoius lattice structure specimen showed no burrs at the exit of the holes. When considering the low delamination at the entrance and exit of this lattice structure, it is evident that the chip removal process is of higher quality than the other samples.

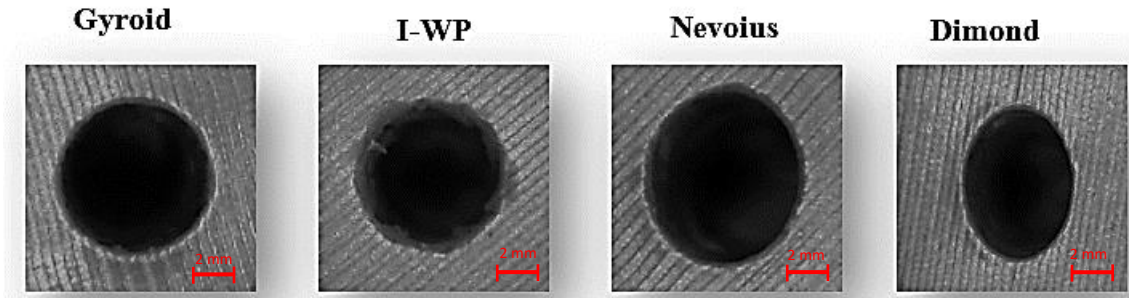


Figure 11. View of the hole entrance.

In the other samples, the exit burr height was 2.934, 1.821, and 0.154 mm for Gyroid, diamond, and I-WP, respectively. Transient burr formation is observed in a gyroid lattice structure, and uniform burr formation is observed in a diamond lattice structure (Figure 12) (Bahçe & Özdemir, 2021). In general, the highest delamination and burr formation is seen in the Gyroid sample, which shows that this material is more flexible than the others and the burr accumulation in front of the tool is higher.

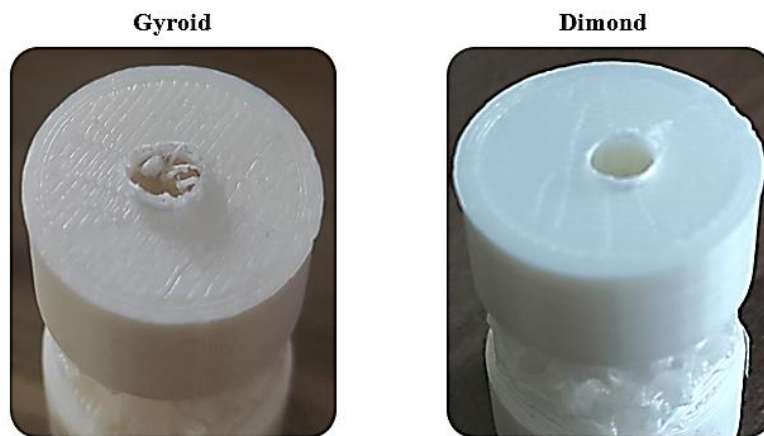


Figure 12. Images of burrs at the exit of the hole.

3.3. Effect of lattice structure design on circularity error

PLA-type elastic materials are prone to deformation under the influence of temperature and force (Anbuechziyan & Vignesh, 2023). For this reason, geometrical accuracy deteriorates according to the conditions of the machining processes. Especially at high temperatures, melting, shrinkage and distortion are frequently observed. This situation gave similar results in the experiments, and it is seen that the circularity is distorted both at the entrance and exit of all samples (Figure 13). The holes are flattened or expanded based on their diameter as well as their circularity value.

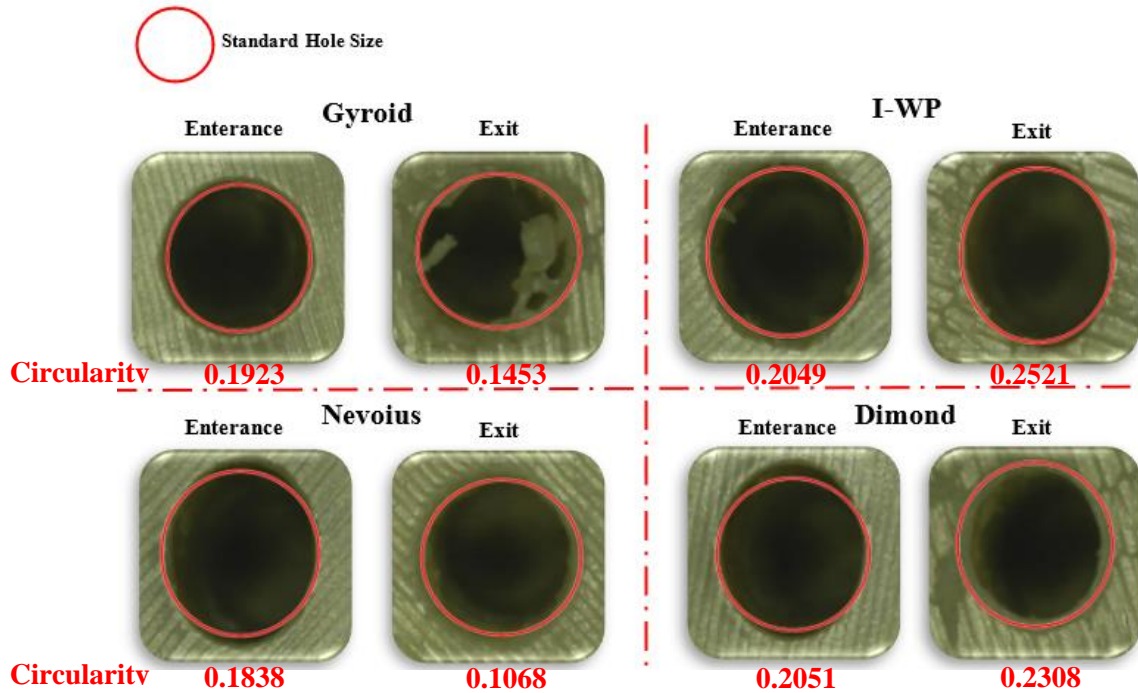


Figure 13. Difference between the standard hole and realized hole.

Figure 14 shows a higher circularity deviation in the entrance and exit holes of the I-WP lattice structure compared to other lattice structures. Particularly at the exit, the hole cross-section has narrowed transversely and lengthened longitudinally (see Figure 13). Secondly, it is seen that the circularity is high in the diamond lattice structure. Although the entrance hole is narrowed in width and elongated in length, the diameter of the exit hole is smaller than expected. The Nevoius lattice structure exhibits a slightly lower circularity deviation compared to the others. At the exit hole, the deviation occurred in the form of a length reduction.

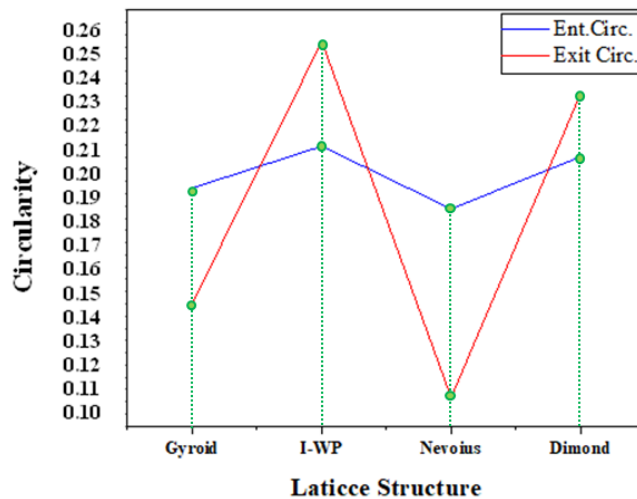


Figure 14. Hole entrance and exit circularity change.

4. Conclusion

PLA samples with four different lattice structures produced by additive manufacturing method were drilled using a 5 mm diameter HSS drill bit with 0.1 mm/rev feed rate and 4500 rpm.

Delamination, burr and circularity measurements were made from each sample. As a result of the analysis of the data obtained, the following results were obtained;

- At the entrance of the hole, the delamination was highest in I-WP (0.5601) and lowest in Gyroid (0.5423). At the hole exit, the Gyroid sample exhibited the highest delamination (0.6229), while the I-WP sample exhibited the lowest (0.5426).
- No burrs were observed at the entrance of any of the samples. Additionally, no burrs were observed at the exit of the hole in the Nevoius lattice structure. The exit burr height was 2.934 mm, 1.821 mm, and 0.154 mm in Gyroid, Diamond, and I-WP, respectively. Among the various lattice structures, the Gyroid lattice structure exhibits the highest values for both delamination and burr height.
- Circularity deviation was observed in all specimens. specimens, with the I-WP lattice structure showing the highest deviation at the entrance and exit of the hole.
- All factors considered, the holes drilled in the specimens using the Nevoius lattice structure are better quality than the others.

References

- Altan, M., & Altan, E. (2014). Investigation of burr formation and surface roughness in drilling engineering plastics. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36(2), 347-354. <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0089-8>
- Anbucchezhiyan, G., & Vignesh, M. (2023). Implication of machining characteristics of pla/bronze intermixture synthesized by additive manufacturing. *Materials Letters*, 351, 135065. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135065>
- Bahçe, E., & Özdemir, B. (2019). Investigation of the burr formation during the drilling of free-form surfaces in Al 7075 Alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4198-4208. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.028>
- Bahçe, E., & Özdemir, B. (2021). Burr measurement method based on burr surface area. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 8(4), 1287-1296. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00228-0>
- Baraheni, M., Shabgard, M. R., & Amini, S. (2021). Evaluating the hole quality produced by vibratory drilling: Additive manufactured PLA+. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(3-4), 785-794. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07750-8>
- Boy, M. (2022). PEEK-CF30 termoplastik malzemenin delinmesinde delme parametrelerinin etkileri: İtme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(3), 570-580. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1104700>
- Corneillie, S., & Smet, M. (2015). PLA architectures: The role of branching. *Polymer Chemistry*, 6(6), 850-867. <https://doi.org/10.1039/C4PY01572J>
- Dezaki, M. L., Ariffin, M. K. a. M., & Ismail, M. I. S. (2020). Effects of CNC machining on surface roughness in fused deposition modelling (FDM) products. *Materials*, 13(11), 2608. <https://doi.org/10.3390/ma13112608>
- Dhokia, V. G., Kumar, S., Vichare, P., Newman, S. T., & Allen, R. D. (2008). Surface roughness prediction model for CNC machining of polypropylene. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(2), 137-157. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM884>
- Domingo, R., Marín, M., de Agustina, B., & Calvo, R. (2015). Delamination analysis of polymeric materials during the drilling process. *Procedia Engineering*, 132, 448-455. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.518>
- Madhan Kumar, A., & Jayakumar, K. (2022). Mechanical and drilling characterization of biodegradable PLA particulate green composites. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 45(5), 437-452. <https://doi.org/10.1080/02533839.2022.2061602>
- Özdemir, B., Kilickap, E., Bahçe, E., Yardımeden, A., & Emir, E. (2024). Optimization of parameters for drilling composite materials with freeform surfaces. *Materials and Manufacturing Processes*, 39(1), 55-68. <https://doi.org/10.1080/10426914.2023.2187826>
- Sato, M., Fukuma, A., Yamamoto, K., & Matsuno, T. (2017). Roundness in drilling of Low-Rigidity

- workpiece. *Key Engineering Materials*, 749, 46-51.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.749.46>
- Tümer, E. D., & Erbil, H. Y. (2021). Extrusion-based 3D printing applications of PLA composites: A review. *Coatings*, 11(4), 390. <https://doi.org/10.3390/coatings11040390>
- Usta, F., Türkmen, H. S., & Scarpa, F. (2022). High-velocity impact resistance of doubly curved sandwich panels with re-entrant honeycomb and foam core. *International Journal of Impact Engineering*, 165, 104230. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104230>
- Üner, I., & Koçak, E. D. (2013). Poli (laktik asit)'in kullanım alanları ve NANO lif üretimdeki uygulamaları. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(22), 79-88.
- Xu, J., Huang, X., Davim, J. P., Ji, M., & Chen, M. (2020). On the machining behavior of carbon fiber reinforced polyimide and PEEK thermoplastic composites. *Polymer Composites*, 41(9), 3649-3663. <https://doi.org/10.1002/pc.25663>
- Yelten, A., Öztürk, M. H., & Yılmaz, S. (2022). 3-dimensional printing of PLA scaffolds for medical applications. *Turkish Journal of Engineering*, 6(4), 262-267.
<https://doi.org/10.31127/tuje.958192>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Kars Mazlum Ağa Hamamı Onarımı Hakkında Bir İnceleme

Şahabettin ÖZTÜRK*

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 65080, Van, Türkiye
Şahabettin ÖZTÜRK, ORCID No:0000-0001-6979-3342

*Sorumlu yazar e-posta: sahozturk13@gmail.com

Makale Bilgileri

Geliş: 26.02.2024
Kabul: 14.06.2024
Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1443001

Anahtar Kelimeler

Kars,
Mazlum Ağa Hamamı,
Kubbe,
Restorasyon,
Soğukluk bölümü

Öz: Kars şehrinde mimari yapılaşma ilk olarak tarihi Kars Kalesi'nin güney eteklerinde oluşmuş, sonraki tarihi süreçte güney ve doğuya doğru gelişerek devam etmiştir. Ortaçağ'da bölgede kültür ve sanat merkezi olan Kars, Anadolu'nun doğuya ve Kafkaslara açılan öncü kapılarından biri haline gelmiştir. İslam ve Hristiyan mimari yapıların yer aldığı kentte, başta dini yapılar olmak üzere askeri ve sivil mimari kentin oluşumunda önemli rol oynamıştır. Kentteki su yapılarından olan hamamlar Kars'ın içerisinde geçen Kars Çayı'nın her iki yakasında düzenli bir şekilde sıralanmıştır. Bu yapılardan biri olan Mazlum Ağa Hamamı, XVIII. yüzyıl Osmanlı dönemi hamam mimari üslubunda inşa edilmiştir. Hamam, Kars Merkez Kaleiçi Mahallesi'nde doğu batı istikametinde zemine kurulmuştur. Hamamın kuzeyinde Kars Çayı, güneyinde yol, doğu ve batısı ise komşu parselleri ile çevrelenmiştir. Mazlum Ağa Hamamı, koruma ve kültür turizmine kazandırmak amacıyla 2017 yılında Kars Valiliği öncülüğünde yapılmıştır. Kültür Turizm ve Altyapı Hizmet Götürme Birliği Başkanlığı koordinesinde 'Tarihi Dokunun Korunması Projesi' kapsamında onarıma yönelik uygulama rölöve, restitüsyon ve restorasyon projeleri hazırlanmıştır. 2017 yılında başlatılan onarım çalışmaları restorasyon çalışmalarına üç etap halinde 2021 yılı sonunda tamamlanmıştır.

Mazlum Ağa Hamamı, proje-onarım uygulama ve kullanımı araştırması, betimsel ve uygulama modele dayalı olarak yapılmıştır. Betimsel ve araştırma model yöntemiyle yapıya ait tarihsel belge ve fotoğrafların tespiti yapılarak; ayrıca mevcut fotoğrafları çekilerek elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

An Examination of the Restoration of Kars Mazlum Ağa Hammam

Article Info

Received: 26.02.2024
Accepted: 14.06.2024
Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1443001

Keywords

Cold room,
Dome,
Kars,
Mazlum Ağa Hammam,
Restoration

Abstract: Architectural development in the city of Kars had been formed in the southern feet of Kars Castle and then continued developing towards the south and east. Military and civic architecture, particularly religious architecture, played an essential part in forming the city where Islamic and Christian architectural buildings have been located. Among the water hydraulic structures in the town, hammams were aligned along each side of the Kars Stream, passing through the city of Kars. Mazlum Ağa Hammam, one of these buildings, was built in XVIII th century Ottoman hammam architectural order. Hammam was found in the east-west direction ground in Kars Central Kaleiçi Quarter. The hammam is surrounded by Kars Stream from the north, a road from the south, and neighboring plots from the east and west. To bring Mazlum Ağa Hammam to the conservation and cultural tourism, intended for renovation in the scope of the "Historical Fabric Conservation Project," an application survey, restitution, and restoration project have been prepared by the coordination of Cultural Tourism and Substructure Services Providing Department, under the leadership of Kars Governorship in the year of 2017. Renovation and restoration work started in

2017 will continue under three stages, and the last stage will be completed at the end of 2021. The study on the project, restoration, and utilization of the Mazlum Ağa Bathhouse has been conducted based on a descriptive and application model. Through the descriptive and research model method, historical documents and photographs related to the structure were identified, and findings were evaluated by taking and analyzing current photographs.

1. Giriş

Kars İli; Doğu Anadolu Bölgesi'nin kuzeydoğusunda Erzurum-Kars bölümünün, Kars yöresi dâhilinde yer almaktadır. Kars İli; kuzeyde Ardahan, doğuda Ermenistan'ın Shirak yönetim bölümü, güneydoğuda Iğdır, güneyde Ağrı, batıda ise Erzurum illeri idari alanları arasında bulunmaktadır. Kars İli idari olarak, Merkez, Sarıkamış, Selim, Kağızman, Digor, Arpaçay, Akyaka, Susuz olmak sekiz ilçeden ve bu ilçeler dâhilindeki 383 köyden oluşmaktadır (Şekil 1).

İl yaklaşık olarak 9939 km² yüzölçümüne sahiptir. İl alanı; kuzeyde Akbaba, Kısır Dağı ile Çıldır Gölü, kuzeybatıda Allahuekber Dağları, güneyde ise Iğdır Ovası, Aras Nehri ve sıra şeklindeki Aras Güneyi Dağları, arasında yer almaktadır (Demir, 2013) (Şekil 1).



Şekil 1. Kars ili ve çevresi haritası (www.mapsgoogle.com).

Kars bölgesinde yapılan bilimsel araştırmalarda imar faaliyetleri yörede avcı-toplayıcı Paleolitik dönem olan yeryüzündeki en eski kültürlerden biridir. Daha sonraki dönemlerde Kars, Urartular, Kimmer, İskit, Medler, Persler, Sasaniler, Roma, Bizanslılar, Araplar, Selçukluların, Osmanlılar, Ruslar gibi birçok uygarlığın egemenliği altında kalmıştır (Belli, 2007).

1064 yılından sonra Kars'ta başlayan imar ve şehircilik faaliyetleri Osmanlı döneminde de yoğun olarak devam etmiştir. Kars'ta bulunan kale, kentin öneminden dolayı 1534'te Osmanlı idaresine katıldıktan sonra esaslı onarım geçirmiş ve kale çevresinde imar çalışmaları yapılmıştır. Böylece Sultan III. Murad'ın serdar tayin ettiği Lala Mustafa Paşa, 29 Temmuz 1579 günü Kars Kalesi'nin onarım ve imarı faaliyetlerini tamamlamıştır (Şekil 2, 3).

Kars Kalesi'nin dışında kalan alanda da imar çalışmaları devam ederek şehir dokusu, XVI. yüzyılın son çeyreğinde Osmanlı kentine dönüşmüştür. Kalenin dış çevresi 3.500 m uzunluğunda olup günümüz Taşbaşı, Orta-kapı ve Yusuf Paşa Mahallelerinin içerisindeki bölüm surlarla çevrilmiştir. Kentin güvenliğini sağlama amacıyla kalenin etrafına geniş ve derin bir müdafaa hendeği yapılmıştır (Uluçam, 1992). Kars Çayı'nın bir kolu şehir merkezindeki dış kaleden geçirilmek suretiyle hem

kentin su ihtiyacını sağlamış, hem de kalenin etrafındaki hendeğin içerisini su doldurulabilecek hale getirmiştir (Sevgen, 1959).

Lala Mustafa Paşa döneminde gerçekleştirilen imar faaliyeti sonucunda yaklaşık 150 yıl boyunca harabe halindeki olan Kars Kalesi ve çevresi kısa bir sürede altı sancaktan oluşan bir eyalet merkezi haline gelmiştir. Ancak, Kars ilinin sınır şehri olması nedeniyle refah dönemi fazla uzun sürmemiş; 1604 yılında yeni bir Safavi istilasıyla, başta kubbeli camiler olmak üzere kalenin büyük bir bölümü yıkılmıştır (Şekil 4).



Şekil 2, 3. Sultan III Murad Kars Şehinşahname ve Nusretname minyatürleri.



Şekil 4. Kars kale ve şehir vaziyet planı-1579 (Akçayöz ve Öztürkkan, 2010).

1645'te Sultan IV. Murad tarafından Kars şehrinde yeniden imar çalışmaları başlatılmış ancak 1674 depremi, 1744'te Kars Çayı taşkını ve 40 yıl süren Rus işgali ile Ermenilerin şehri ateşe vermesi sonucu kent birkaç yapı dışında enkaz yığını haline gelmiştir (Uluçam, 1992). Kars, XIX. yüzyıl boyunca yeniden saldırı ve işgallere sahne olmuştur.

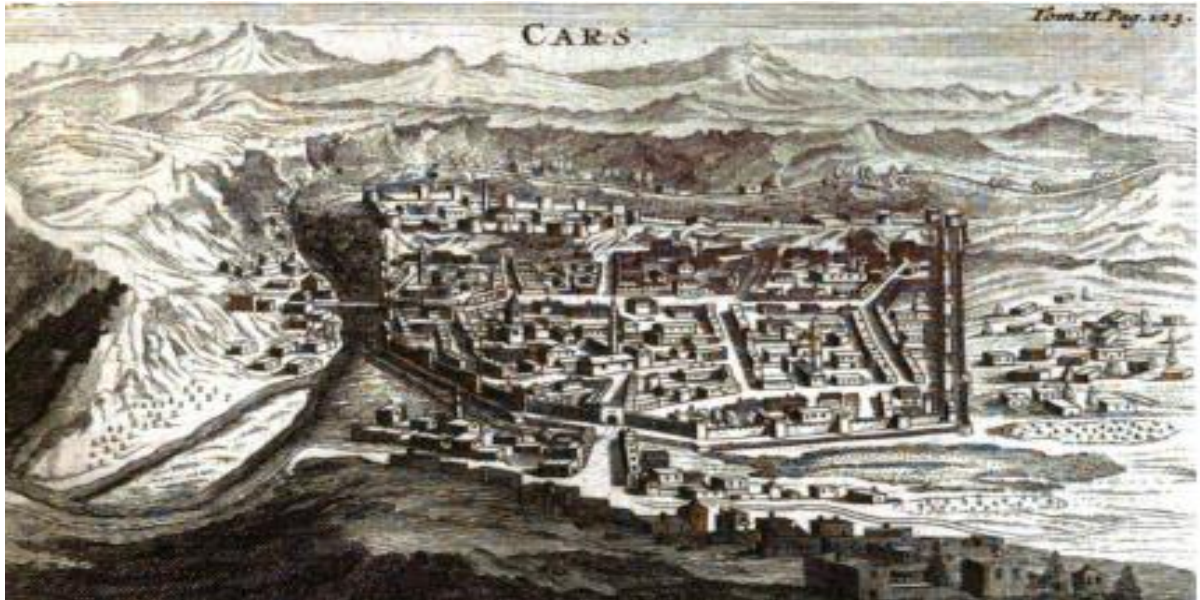
1807-28 ve 1855'de Rusların saldırılarına maruz kalan Kars kenti, 1856 antlaşmasıyla Osmanlı İmparatorluğuna bırakılmıştır. 1877-78 (93 Harbi) Osmanlı-Rus savaşı sonucundan 1878

Berlin Kongresi ile Kars kenti 40 yıl süreyle Rus işgalinde kalmıştır. İşgal sırasında Kars Kalesi'nin eteklerindeki eski kent, olduğu gibi kendi kaderine terk edilmiştir. Kars Çayı'nın kuzeyinde geniş caddeler, yeni Rus-Baltık mimari yapılarından oluşan bir garnizon kent kurulmuştur (Kars Valiliği, Cumhuriyetimizin 75. Yılında Kars, 1999). Böylece Kars şehri eski ve yeni olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır.

Eski Kars yerleşimi tarihi Kars Kalesi'nin güneyinde yeni bir garnizon kent olarak kurulmuş, günümüz Kaleiçi Mahallesi ise kentin merkezi haline gelmiştir (Şekil 4, 5). Tarihi Kars Kalesi'nin eteklerinden geçen ve şehri adeta ikiye ayıran Kars Çayı'nın kenarında, su yapılarının içerisinde önemli bir yeri olan üç adet hamam inşa edilmiştir (Şekil 6). Bunlar; Mazlum Ağa (Oğlu), Topçuoğlu ve İlbeyioğlu Hamamlarıdır.



Şekil 5. 1900 yılları Kars Çayı ve hamamları genel görünüşü (Akçayöz ve Öztürkkan, 2010).



Şekil 6. XVII. yüzyıl Kars ili genel görünüş gravürü (Akçayöz ve Öztürkkan, 2010).

Bu araştırmada, tarihi ve tescilli olan Mazlum Ağa Hamamı'nın inşa edildiği dönemden günümüze kadar geçen süreç ve onarım aşamaları ve sonrasının tespit ve ortaya çıkan sonuçların mimarlık disiplini içerisinde değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Araştırmadan çıkarılacak sonuçların Kars İli üzerine yapılacak diğer araştırma, planlama ve çalışmalara ışık tutacağı öngörülmektedir

2. Hamam Mimarisi

Türk toplumunun inancından kaynaklanan temizlik anlayışı, yaşam felsefesi, gelenek ve göreneği ile bütünleşerek, tek ve çift “Türk Hamamı” ismiyle evrensel bir kimlik kazanmıştır. Bu anlayış, XVI. yüzyılda Mimar Sinan’ın dehası ile bütünleşip, klasik hamam plan tipi ile ideal forma ulaşmıştır. Selçuklu ve Osmanlı döneminde inşa edilen hamamlar farklı araştırmacılar tarafından mimari planları çeşitli şekillerde gruplandırılmıştır.

Hamamlar kullanım şekillerine göre özel ve genel hamamlar olarak sınıflandırıldığı gibi, erkekler ve kadınlar için ayrı kısımların yapılıp yapılmamasına göre de tek ve çift hamamlar olarak adlandırılmıştır. Tek hamamlar erkekler için yapılmış olup, günün belli saatlerinde kadınların kullanımına tahsis edilir. Çifte hamamlar ise, biri erkeklere diğeri kadınlara ait olmak üzere birbirine bitişik olarak inşa edilen iki hamamdan oluşur. Çifte hamamlarda genellikle erkekler kısmı kadınlar kısmından büyük tutulmuş, bunların giriş kapıları bir meydana veya ana yola açılırken kadınlar kısmının giriş kapıları ise mahremiyet düşüncesiyle tali yola açılmıştır. Çok az örnekte giriş kapılarının aynı sokağa açıldığı görülür.

Türk hamamlarının mimari kompozisyonları ve bu kompozisyonları içerisinde mekânların nasıl düzenlendiğine dair değişik dönemlere ait örnek hamam planları çeşitli yerli ve yabancı bilim insanları tarafından değerlendirilmiştir. Anadolu Türk-İslam hamamları soyunmalık (cemekan), soğukluk, ılıklik, sıcaklık ve külhan bölümlerinde oluşmaktadır (Glück, 1927; Klinghardt, 1927; Esad, 1928; Aru, 1949; Diez & Aslanapa, 1955; Önge, 1988; Ülgen, 1988; Öztürk, 2002).

Araştırmacı bilim insanı Semavi Eyice tarafından yapılan tipolojide hamamlar, sıcaklık ve halvet kısımlarının planlamasına göre altı tipe ayrılmıştır. Bunlar; haçvari dört eyvanlı ve köşe hücreli tip, yıldızvari ve sıcaklıklı tip, kare planlı sıcaklığın çevresine halvet hücreli tip, çok kubbeli sıcaklıklı tip, ortası kubbeli enine sıcaklıklı ve çift halvetli tip ve soğukluk-sıcaklık ve halvet eş odaları şeklinde olan tip olarak değerlendirmiştir (Eyice, 1960; Eyice, 1997).

Araştırma konusu olan Kars Mazlum Ağa Hamamı, plan ve mimari özellikleri dikkate alındığında yaklaşık kare planlı, tek eyvanlı, karşılıklı dörder toplam sekiz hücreli mekândan oluşmaktadır. Hamam daha çok bulunduğu arsanın topoğrafik yapısına ve Kars Çayı’nın akış güzergâhına bağlı mevcut arazinin zorunlu koşullarına uygun olarak planlanarak zemine yerleştirilmiştir (Şekil 7, 8).



Şekil 7, 8. Mazlum Ağa Hamamı genel görüşleri (Öztürk, 2019).

3. Materyal ve Yöntem

Mazlum Ağa Hamamı, proje-onarım uygulama çalışmaları ve kullanımı araştırması, betimsel ve uygulama modele dayalı olarak yapılmıştır. Betimsel ve araştırma model yöntemiyle yapıya ait tarihsel belge ve fotoğrafların tespiti yapılarak; ayrıca mevcut fotoğrafları çekilerek elde edilen bulgular özellikle restitüsyon projesinde değerlendirilmiştir.

Mazlum Ağa Hamamı’nın onarımı Kars Valiliği İl Özel İdare Sekreterliği, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi ve Erciyes Üniversitesi’nin ortak çalışmasının sonucunda mimari ve statik projeleri

hazırlanan ve uygulaması yapılan ortak bir çalışmadır. Onarım aşamasında özellikle yapının iç mekân duvar satırlarındaki çimento esaslı sıva harçlarının rasıalanması, muhdes zemin kaplamasının kaldırılması ile yeniden ortaya çıkan mimari özgün verilerin yeniden revize edilen projelere aktarılması yapılmıştır.

Kars Mazlum Ağa Hamamı'nın onarımı işıveren Kars Valiliği İl Özel İdare Sekreterliği ile yüklenici firma arasındaki yapıım sözleşmesi kapsamında proje müellifliğinin mesleki denetiminde yapılarak tamamlanmıştır. Onarım çalışmasının başlangıcından yapının kullanım aşamasına kadar geçen tüm aşamaların görsel, betimsel ve kayıt verilerinin arşivlenmesi proje müellifi tarafından hazırlanmıştır.

4. Bulgular

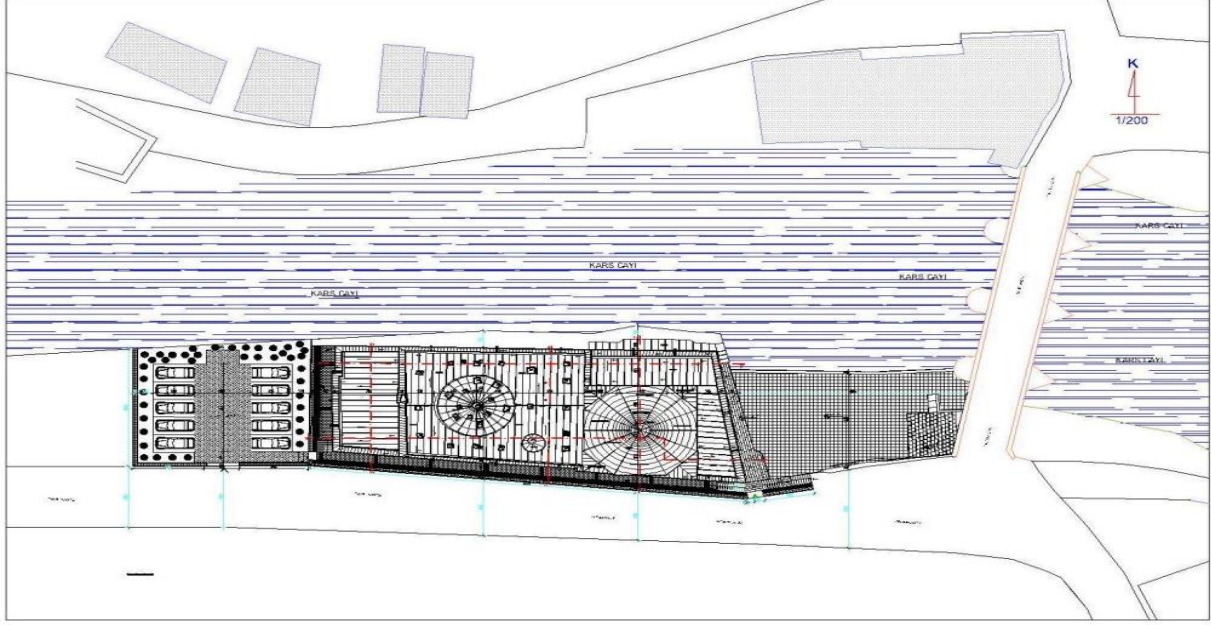
4.1. Mazlum Ağa Hamamı konumu

Mazlum Ağa Hamamı, Kars ili Merkez ilçesi Sukapı Mahallesi'nde Kentsel Sit Alanı içerisinde mülkiyeti hazineye ait 659 Ada, 3 Parselde yer almaktadır. Hamam, Kars ili şehir merkezi içerisinde geçen Kars Çayı'nın hemen güney yakasında, zemine doğu batı istikametinde kurulmuştur (Şekil 9).



Şekil 9. Mazlum Ağa Hamamı uydu görünüşü (Google Earth-2024).

Hamam doğu-batı doğrultusunda engebeli bir alan üzerinde planlanmıştır. Hamamın kuzeyinde Kars Çayı, doğusunda tarihi Kars Taş Köprüsü, güneyinde şehir içi yolu, batısında ise düz bir alanda düzenlenen 10 adet otopark yer almaktadır. Mazlum Ağa Hamamı'nın güney ve batı bölümü toprak kaymalarına karşı 2020 yılında istinat duvarı ile tahkim edilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Mazlum Ağa Hamamı vaziyet planı (Öztürk, 2019).

4.2. Tarihçesi

Mazlum Ağa Hamamı, XVIII. yüzyılda Osmanlı döneminde Kars Çayı'nın güney kıyısında inşa edilmiş önemli su yapısı örneklerindedir. Mazlum Ağa Hamamı'na ait herhangi bir yazılı kitabe bulunmamaktadır. Mazlum Ağa Hamamı'nın plan ve mimari özellikleri bölgedeki diğer hamam yapıları ile karşılaştırıldığında, XVIII. yüzyıl Osmanlı dönemi hamam mimari üslubunda inşa edildiği düşünülmektedir (Öztürk, 2021). Kars Çayı'nın güney kıyısında zemine kurulan dikdörtgen planlı Mazlum Ağa Hamamı, Erzurum Kültür ve Tabiat Varlıklarının Koruma Kurulu tarafından 12.09,1991 tarih ve 338 sayılı kararı ile tescil edilmiştir.

Namık Kemal (1840-88), Rus şair ve edebiyatçısı Aleksandr Sergeyeviç Puşkin (1799-1838) ve filozof Georgi Gürciyev (1866-1949) gibi önemli şair ve yazarların Mazlum Ağa Hamamı'nı ziyaret ettiği ve yıkandığı bilinmektedir. 1970 yılına kadar aktif olarak kullanılan hamam bu tarihten 2017 yılına kadar kendi kaderine terk edilmiştir (Öztürk, 2021).

Mazlum Ağa Hamamı'nın rölöve, restitüsyon ve restorasyon koruma projeleri Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Mimarlık bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. (Mimar-Sanat Tarihçisi) Şahabettin Öztürk tarafından, statik ve yapısal analiz projeleri ise Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. (İnşaat Müh.) Fatih Altun tarafından 2017 yılında hazırlanarak, Kars Kültür Varlıklarının Koruma Kurulu tarafından onaylanmıştır (Öztürk, 2018).

Mazlum Ağa Hamamı'nın esaslı onarım çalışmaları, Kars Valiliği Özel İdaresi Genel Sekreterliği tarafından 2017-21 yılları arasında yapılarak tamamlanmıştır. Günümüzde tarihi Mazlum Ağa Hamamı, sosyal, kültürel ve turistik faaliyetler için kullanılmaktadır (Şekil 10, 11).



Şekil 11. Mazlum Ağa Hamamı genel görünüşü (Öztürk, 2019).

4.3. Yapının incelenmesi

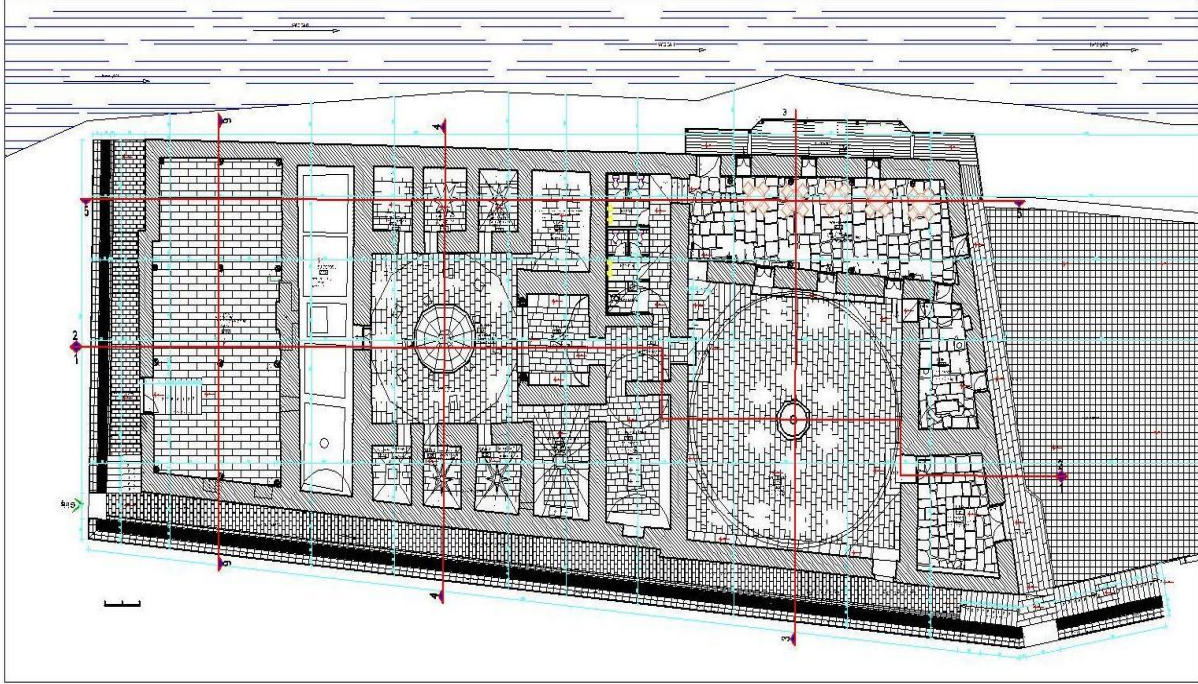
4.3.1. Plan

Mazlum Ağa Hamamı, 18.60x49.60 m ölçülerinde dikdörtgen planlı olarak doğu-batı istikametinde zemine kurulmuştur. Hamamın güneydeki yol seviyesinden 18 adet yonu taş yapılı merdiven basamağı yardımıyla zemin kotuna inilir. Hamamın güneydeki giriş kapısı ile soğukluk bölümüne girilir. Güney yol kotundan doğuya doğru ise 12 adet merdiven basamak yardımıyla inerek, doğu avlusuna girilir. Avlu bölümünden yer alan farklı genişlikteki üç ayrı kapı ile hamama giriş sağlanır (Şekil 11, 12).



Şekil 12. Mazlum Ağa Hamamı genel görüşleri (Öztürk, 2019).

Giriş avlusunun kuzeyindeki 1.09 m genişliğindeki tek kanatlı ahşap kapı yardımıyla soyunmalık bölümüne girilir. Ortadaki 0.97 m genişliğindeki tek kanatlı ahşap kapı ile 2.85x6.06 m ölçülerindeki orta giriş mekâna girilir. Mekânın doğu duvarında bir niş, kuzey duvarında bir kapı, kuzeybatı köşesindeki bir kapı yardımıyla soğukluk bölümüne üç basamak ile inilir (Şekil 13). Hamamın doğu beden duvarının güneyinde yer alan 1.57 m genişliğindeki çift kanatlı ahşap kapı yardımıyla 4.40x5.70 m ölçülerindeki üzeri ahşap kirişler ile örtülü giriş bölümüne girilir. Bu mekânın kuzeybatı köşesindeki 1.29 m genişliğindeki tek kanatlı kapı yardımıyla 12.20x12.20 m ölçülerindeki kare planlı soğukluk bölümüne girilmektedir.



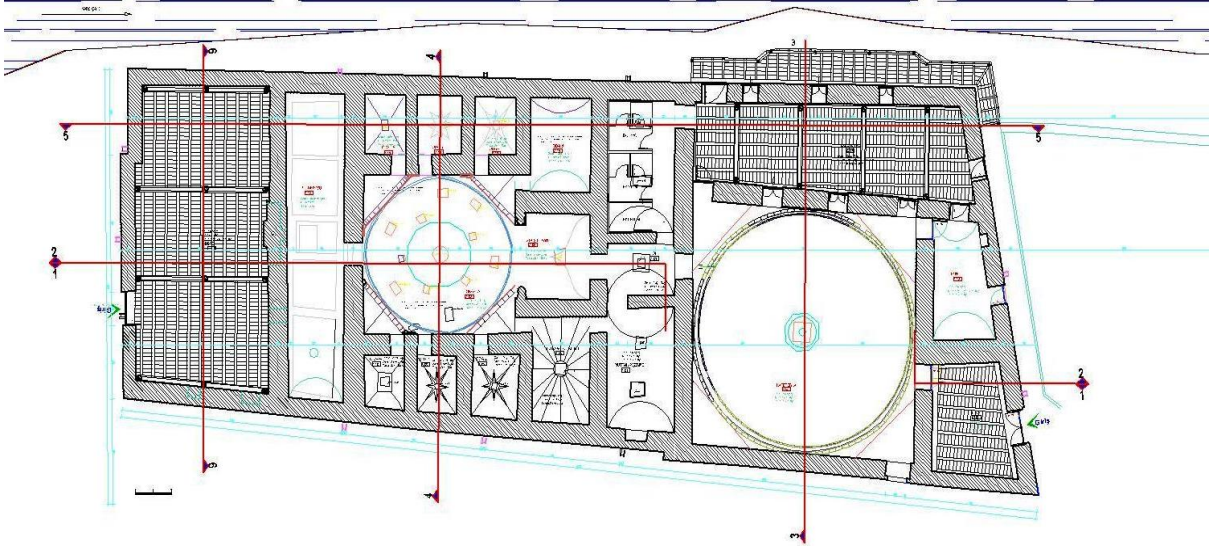
Şekil 13. Mazlum Ağa Hamamı planı (Öztürk, 2019).

Kubbenin merkezinde 2.20x2.20 m ölçülerinde sekizgen formundaki aydınlık feneri yer almaktadır. Sekizgen kubbe kasağında düzenli aralıklarla altı adet yuvarlak kemerli pencere yerleştirilmiştir. Giriş mekânı ile soğukluk bölümü arasındaki 0.45 m kot farkı üç adet basamak ile aşağıya inilerek düzenlenmiştir. Soğukluk mekânının ortasında ortamı serinletmek amacıyla 1.82x1.82 m ölçülerinde sekizgen formlu fiskiyeli bir süs havuzu yer almaktadır (Şekil 13).

Soğukluk bölümünün kuzey ve güney duvarlarına paralel inşa edilmiş 0.37 m genişliğinde ve 0.40 m yüksekliğinde oturma sekileri yer almaktadır. Soğukluk bölümünün güneydoğu köşesinde yer alan 1.10 m genişliğindeki tek kanatlı ahşap kapı ile giriş avlusuna girilmektedir. Soğukluk mekânının kuzey duvarında üç adet benzer mimari özellikte, 1.09 m genişlikte pencere bulunmakta ve kuzeybatı köşesindeki tek kanatlı ahşap kapı yardımıyla soyunmalık bölümüne girilmektedir. Soyunmalık ve soğukluk bölümü arasındaki 0.45 m kot üç basamak ile aşılmaktadır (Şekil 13, 14).

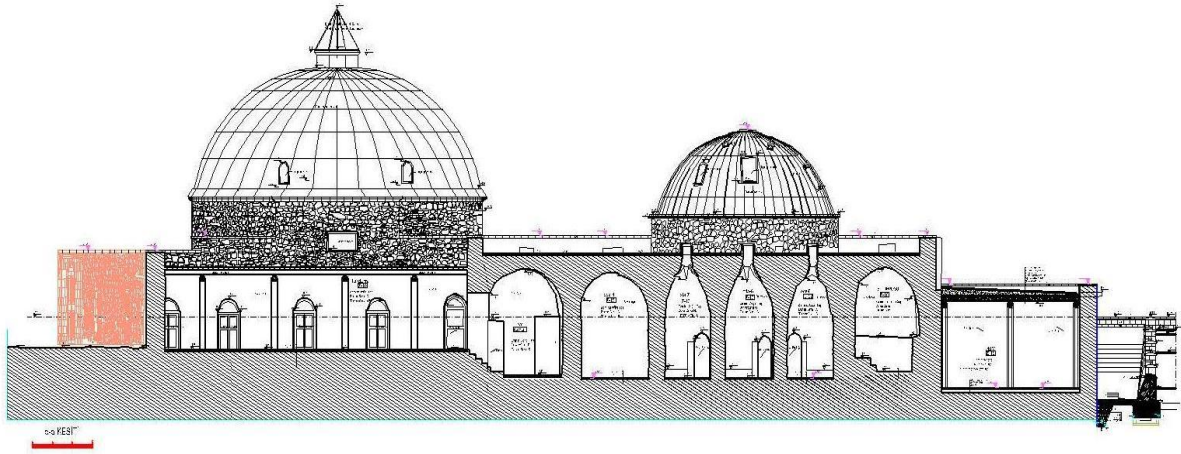
Soyunmalık bölümü, yaklaşık 4.50x15.00 m ölçülerinde üzeri düzenli sıralanmış ahşap kirişler ile örtülüdür. Bu mekânın kuzey ve güney duvarlarına bitişik köşeleri pahalandırılmış yaklaşık 0.30 m çapında karşılıklı dörder ahşap sütun yer almaktadır. Mekânın kuzeybatı köşesindeki karşılıklı iki kapıdan kuzeydeki kapı ile dışarıdaki “L” formundaki üzeri sundurmalı teras bölümüne, batıdaki kapı ile de daha düşük kotta olan temizlik bölümüne giriş sağlanır.

Yapının güneydoğu köşesindeki bir kapı yardımıyla diğer bir iç mekâna giriş, doğu duvarındaki bir kapı ile de giriş avlusuna çıkış sağlanır. Soyunmalık bölümünün kuzey beden duvarında üç adet benzer mimari özellikte yaklaşık 0.85 m genişlikte pencere bulunur (Şekil 13, 14).



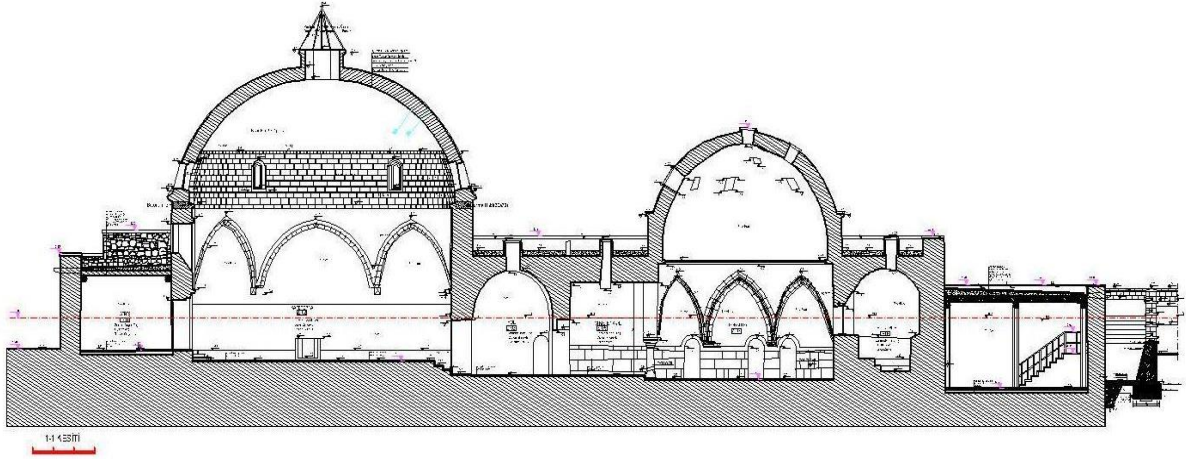
Şekil 14. Mazlum Ağa Hamamı tavan planı (Öztürk, 2019).

Soğukluk bölümünün batı duvarının ortasında 1.30 m genişliğindeki kapı ile 2.55x3.67 m ölçülerindeki üzeri beşik tonoz örtülü ara mekânına girilir. Bu mekânın kuzeydoğusunda yer alan bir kapı ile 3.70x6.57 m ölçülerindeki üzeri beşik tonoz örtülü temizlik mekânına girilir. Temizlik bölümü üç ayrı bölümden oluşmaktadır. Ara mekânın güneybatı köşesindeki bir kapı yardımıyla 3.68x6.12 m ölçülerinde kuzey güney yönünde gelişen ve üzeri beşik tonoz örtülü tıraş bölümüne girilir. Bu bölümünün güney duvarının ortasında 0.53 m derinliğinde bir niş yer almaktadır. Ara mekânın batı duvarının ortasındaki 1.30 m genişliğindeki kapı yardımıyla sıcaklık bölümüne girilir (Şekil 14,15).



Şekil 15. Mazlum Ağa Hamamı boy kesiti (Öztürk, 2019).

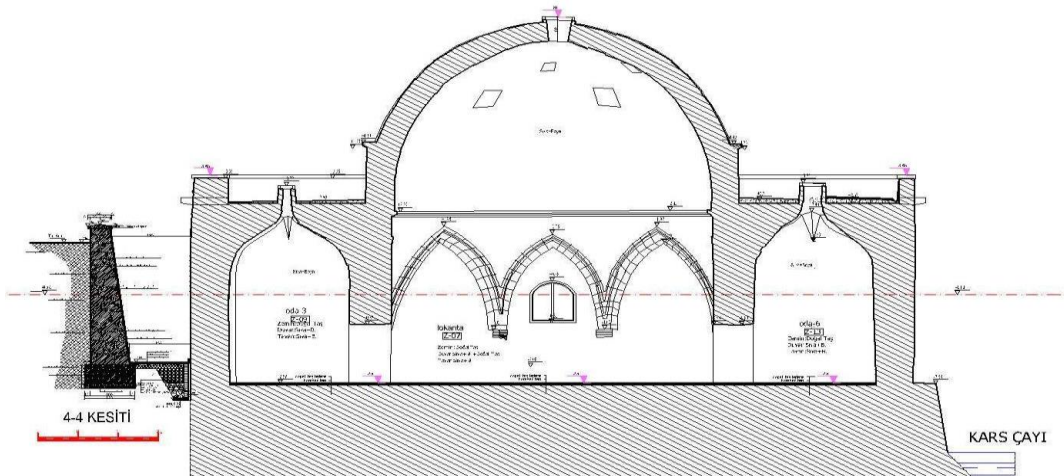
Sıcaklık bölümü, 8.03x8.40 m ölçülerinde yaklaşık kare formunda üzeri köşelerde tromp geçişli bir kubbe ile örtülüdür. Kubbenin altında yuvarlık formunda bir göbek taşı yerleştirilmiştir. Sıcaklık bölümünün doğusunda yer alan kuzey ve güney yuvarlak sütunlu kemer girişli üzeri kaş kemerli tonoz örtülü 3.49x4.31 m ölçülerindeki giriş eyvanı yer almaktadır. Eyvanın kuzey ve güneyinde 0.56 m genişliğinde ve zeminden 0.40 m yüksekliğinde oturma sekileri karşılıklı olarak yer almaktadır. Sıcaklık bölümü kuzey ve güneyinde karşılıklı benzer mimari ölçü ve özelliklerde dörder toplam sekiz halvetten oluşmaktadır. Örtü sistemi farklı olan halvetlerin beşik tonoz, tekne tonoz, yıldız tonozlarla örtülüdür (Şekil 13,16).



Şekil 16. Mazlum Ağa Hamam boy kesiti (Öztürk, 2019).

Sıcaklık bölümünün batı duvarının ortasında yer alan 1.13 m genişliğindeki açıklık ile su deposu bölümüne girilmektedir. Su deposu bölümü 3.25x15.32 m ölçülerindedir ve beş farklı bölümden oluşmaktadır. Su deposunun altı külhan bölümünü oluşturmaktadır.

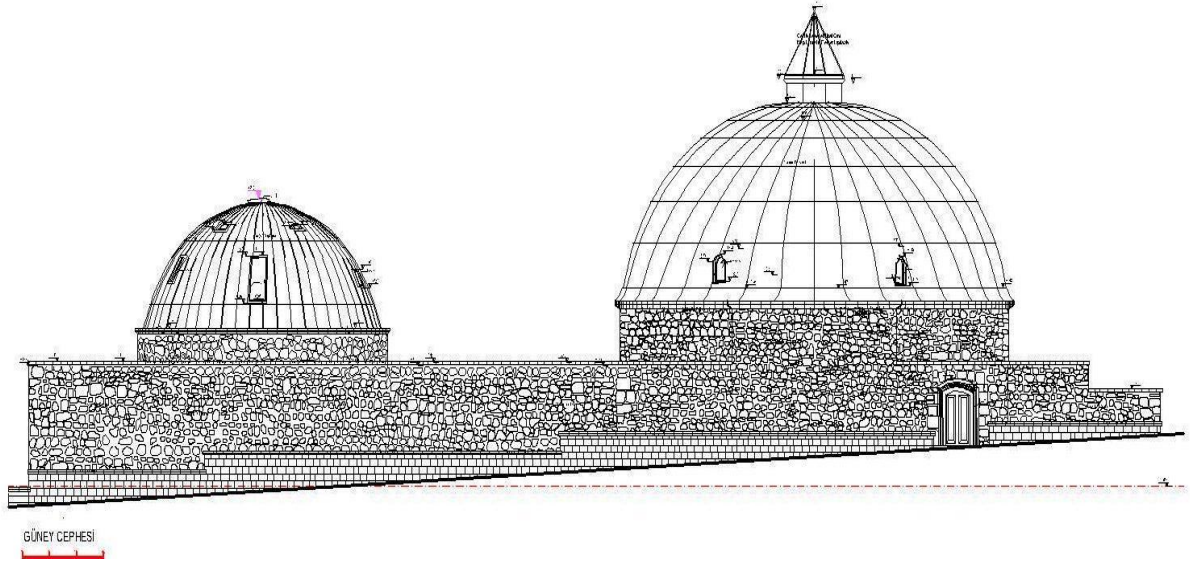
Hamamın batı beden duvarının kuzeyi tek kademeli olarak içe doğru planlanmıştır. Batı beden duvarının güneyinde yer alan 1.70 m genişliğindeki tek kanatlı kapı yardımıyla depo bölümüne giriş sağlanır. Giriş kapısı ile depo zemin kotu arasındaki 1.50 m düşey kot farkı sekiz adet merdiven basamağı ile aşılmaktadır. Depo bölümü, 7.40x15.00 m ölçülerinde dikdörtgen formundadır. İç mekânın doğu, batı duvarlarında yatay bir aks boyunca dörder, toplam 12 adet köşeleri pahlandırılmış 0.30 m çapında karşılıklı sütunlar üzerinde ahşap kirişler bulunmaktadır (Şekil 13, 17).



Şekil 17. Mazlum Ağa Hamam en kesiti (Öztürk, 2019).

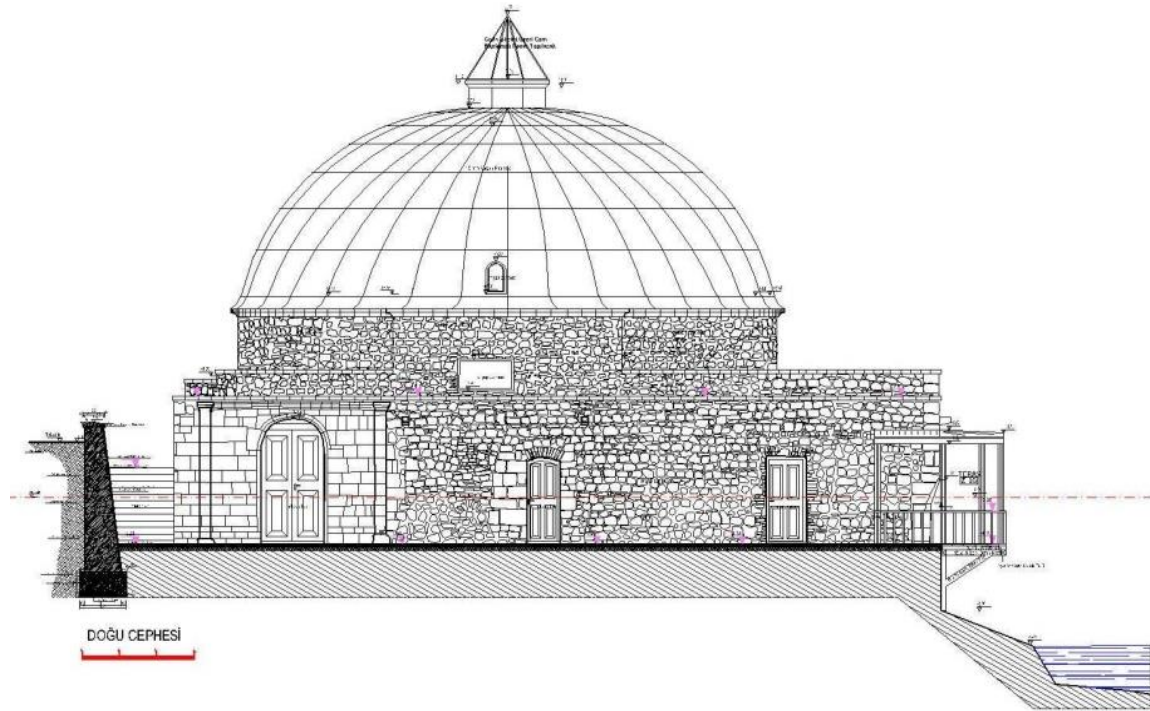
4.3.2. Cepheler

Mazlum Ağa Hamamı'nın güney cephesi, 50.13 m uzunluğunda, arazinin topoğrafik yapısına uygun olarak şekillenmiştir. Cephede soğukluk bölümüne giriş sağlayan yuvarlak basık kemerli giriş kapısı dışında herhangi bir açıklık yer almamaktadır. Cephedeki koruyucu istinat duvarı üç kademeli olarak batıya doğru eğilidir. Beden duvarları zemin kotundan yukarıya doğru yükselerek 0.05 m dışa taşıntılı düz bir saçak ile örtü sitemine geçiş yapmaktadır. Cephedeki soğukluk ve sıcaklık bölümündeki kubbe, kasnak ve fener cephenin hareketlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Şekil 18).



Şekil 18. Mazlum Ağa Hamam güney cephesi (Öztürk, 2019).

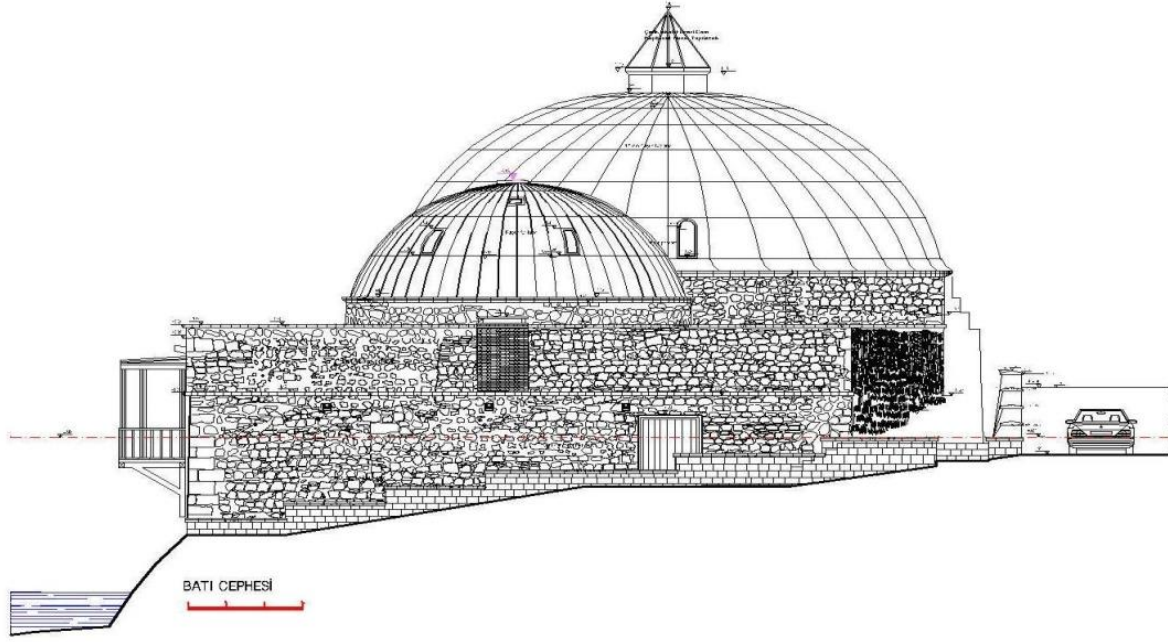
Hamamın doğu cephesi zemin kotundan 3.90 m yükselerek 0.05 m dışa taşıntılı düz bir saçak yardımıyla örtü sitemine geçiş yapmaktadır. Soğukluk bölümüne giriş sağlayan yuvarlak basık kemerli üç giriş kapısı kuzeydeki teras sundurma bölümü, güneydeki merdiven, istinat duvarı, soğukluk bölümündeki kubbe, kasnak ve fener bu cepheyi hareketlendirilmiştir (Şekil 19).



Şekil 19. Mazlum Ağa Hamam doğu cephesi (Öztürk, 2019).

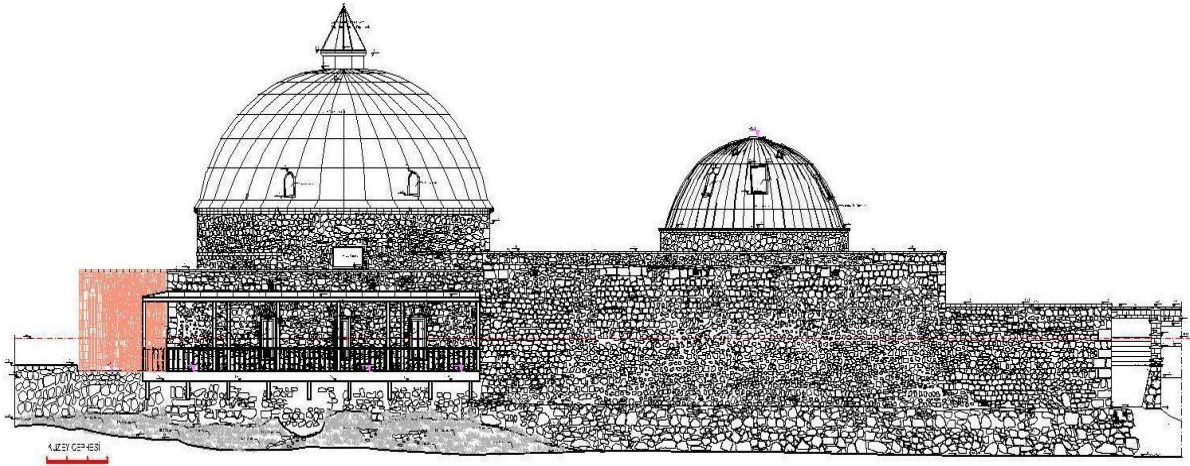
Hamamın doğu cephesi, 22.57 m uzunluğundadır. Cephenin güneydeki yol kotu ile kuzeydeki Kars Çayı arasındaki yaklaşık 4.23 m'lik kot farkı vardır. Cephe yüksekliği 4.23 m olup dışa taşıntılı düz saçak yardımıyla düz dama geçilir. Depo bölümünün cephe yüksekliği sıcaklık ve soğukluk bölümlerine oranla daha düşük inşa edilmiştir (Şekil 19).

Batı cephedeki depo bölümüne giriş kapısı, kuzeydeki teras sundurma bölümü, güneydeki merdiven, beş kademeli istinat duvarı, sıcaklık-soğukluk bölümlerindeki kubbe, kasnak, depo bölümünün külhan bacası ve fener cepheyi hareketlenmiştir (Şekil 20).



Şekil 20. Mazlum Ağa Hamam batı cephesi (Öztürk, 2019).

Mazlum Ağa Hamamı'nın kuzey cephesi 50.10 m uzunluğundaki arazinin topoğrafik yapısına uygun olarak şekillenmiştir. Cephe beden duvarları zemin kotundan farklı üç kot kadar yükselerek 0.05 m dışa taşıntılı düz bir saçak yardımıyla örtü sitemine geçiş yapmaktadır. Cephe üzerindeki soğukluk ve sıcaklık bölümlerindeki kubbe, kasnak, fener bölümleri ve konsol mimari elamanlar üzerinde inşa edilen sundurmali ahşap teras cephenin hareketlenmesinde rol oynamaktadır (Şekil 21).

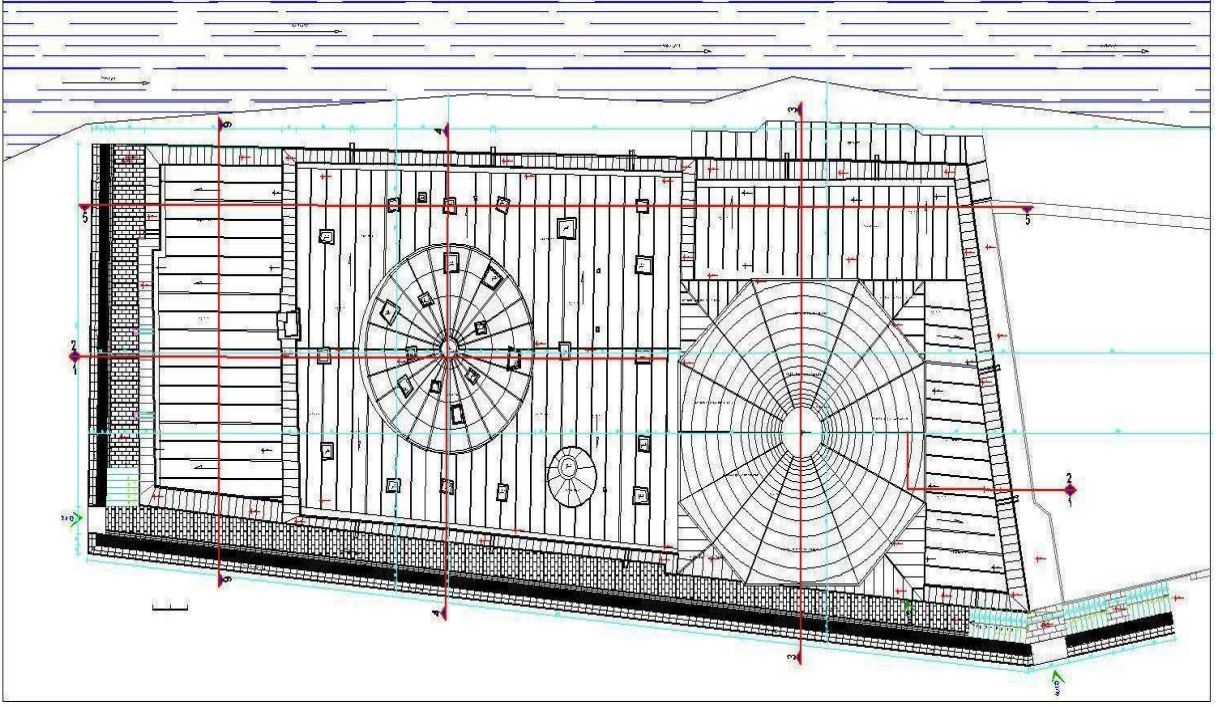


Şekil 21. Mazlum Ağa Hamam kuzey cephesi (Öztürk, 2019).

4.3.3. Örtü planı

Mazlum Ağa Hamamı'nın örtü sistemi genel olarak 19.00x49.50 m ölçülerinde üç ayrı bölümden oluşmaktadır. Soğukluk, sıcaklık bölümlerinin üzeri kubbe, depo bölümünü üzeri ise düz dam kurşun kaplamalı olarak inşa edilmiştir (Şekil 22).

Örtü sistemindeki beden duvarlarının üzeri 0.50 m genişlikte 0.50 m yükseklikteki yonu taş harpuştalı olarak inşa edilmiştir. Duvarlara batıda üç, kuzeyde beş, doğuda iki, güneyde üç olmak üzere toplam 10 adet yonu taştan yekpare olarak imal edilmiş çötenler yerleştirilmiştir (Şekil 22).

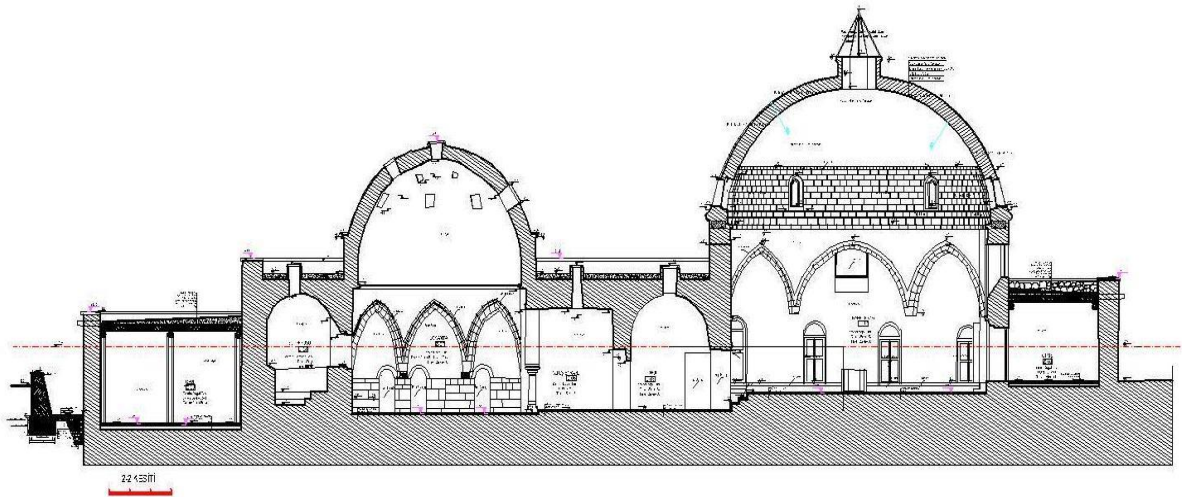


Şekil 22. Mazlum Ağa Hamam örtü planı (Öztürk, 2019).

Soğukluk bölümü üzerindeki yer alan kubbe aydınlatma feneri ile sonuçlanmaktadır. Kubbe ve kasnak üzerinde altı adet penceresi yerleştirilmiştir. Sıcaklık bölümü kubbe ve düz dam üzerinde toplamda 33 adet farklı büyüklüklerde kare ve dikdörtgen formunda aydınlatma pencereleri yer almaktadır. Depo bölümünü üzeri kurşun kaplamalı olup eğim batı yönünde düzenlenmiştir (Şekil 22, 23).

4.3.4. Süsleme

Mazlum Ağa Hamamı, oldukça yalın bir yapıda inşa edilmiş, iç mekânda ve dış mimari yüzeylerde süsleme unsuru kullanılmamıştır.

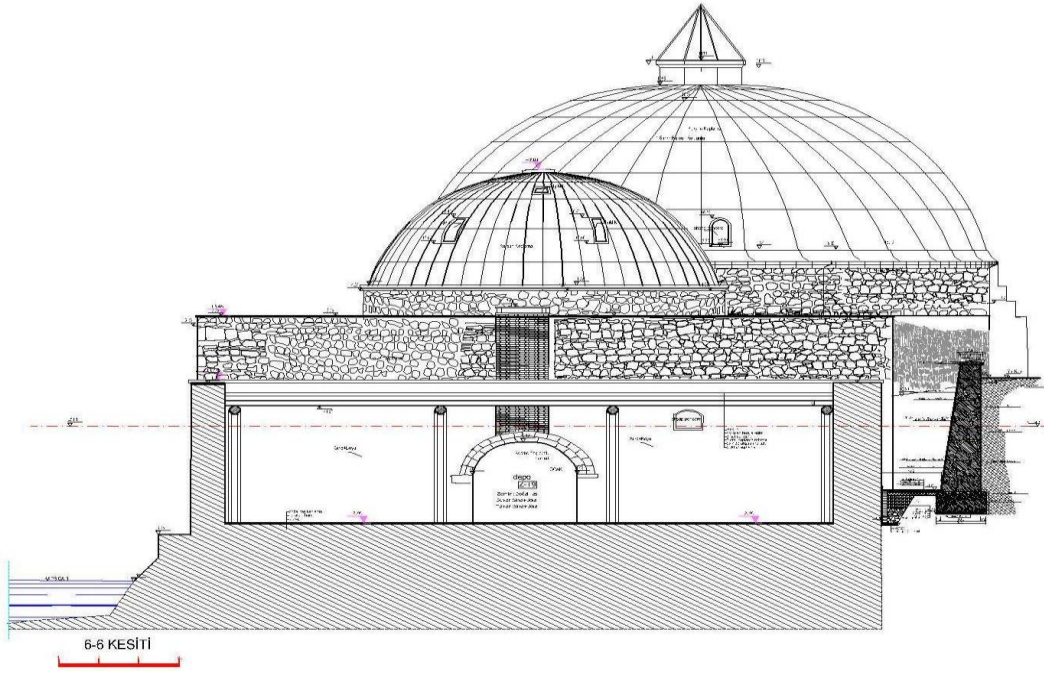


Şekil 23. Mazlum Ağa Hamamı boy kesiti (Öztürk, 2019).

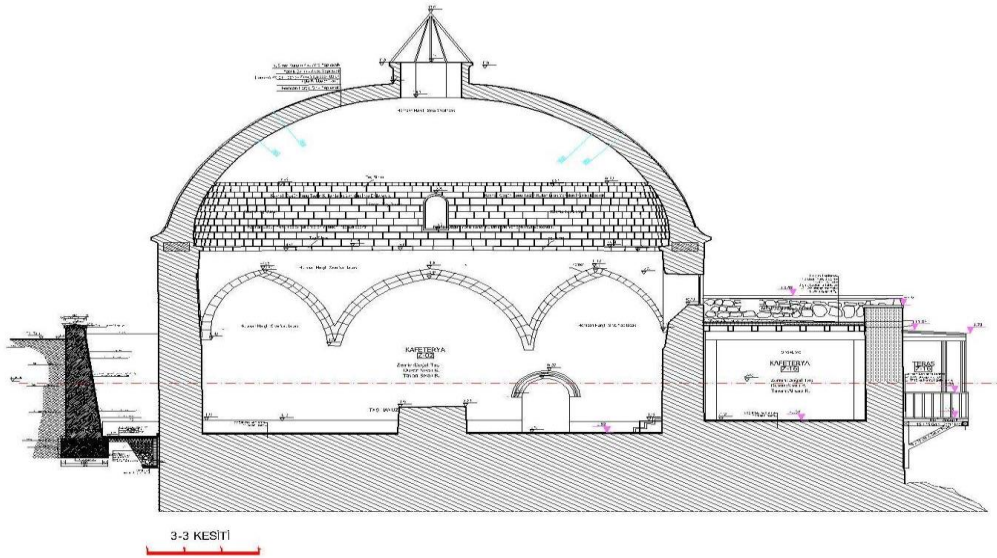
5. Yapım Tekniği ve Malzeme

Mazlum Ağa Hamamı, inşa edildiği XVIII. yüzyıldan günümüze kadar bazı onarımları yapılarak ulaşmıştır. Hamamı oluşturan beden ve iç ara duvar kalınlıkları değişmekle birlikte ortalama duvar kalınlığı 1.00 m'dir. Yapının beden duvarları her iki yandan yaklaşık 0.30 m kalınlığında küfeki yonu taş ve kaba sıralı yonu taş malzemeli; duvar örgüsü moloz taş dolgu yığma duvar tekniği ile inşa edilmiştir.

Duvarlar dolgu yığma tekniğinde inşa edilmiş, yapıdaki açıklıklar, düz, yuvarlak kemer, tonoz ve kubbe ile geçilmiştir. Yapıda bağlayıcı malzeme olarak kireç harcı kullanılmıştır. Yapının sıcaklık bölümü dışındaki tüm mekânlarının iç ve dış satırları sıvasızdır. Hamamın sıcaklık bölümünde kullanılan kireç sıva harcı içerisine katkı olarak odun külü ve pekmez sırası ilave edilmiştir. Hamamda ana yapım malzemesi olarak moloz taş, yonu taş, yardımcı malzeme olarak tuğla, ahşap, kurşun kaplama, metal kullanılmıştır (Şekil 24, 25).



Şekil 24. Mazlum Ağa Hamamı en kesiti (Öztürk, 2019).



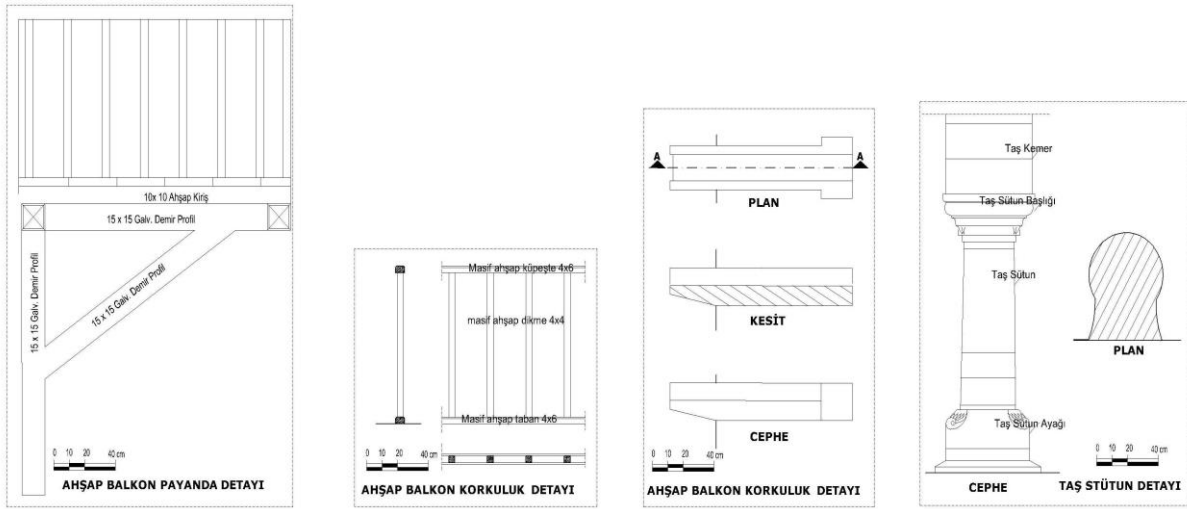
Şekil 25. Mazlum Ağa Hamamı en kesiti (Öztürk, 2019).

5.1. Moloz taş

Hamamın ana yapım malzemesini oluşturan moloz taş, başta yapının beden duvarları olmak üzere, zemin döşemesinde, kubbe ve tonoz yapımında, koruyucu istinat duvar inşasında kullanılmıştır. Hamam onarımında kullanılan moloz taş özgün yapım malzemesi olup istinat koruma duvarında kullanılan moloz taş ise yenidir.

5.2. Yonu taş

Hamamın kapı, pencere, kemer ve sövelerinde, zemin kaplamasında, saçak ve istinat duvar harpuştasında, çörtenderde, kubbe-kasnak, oturma sekilerinde, merdiven basamak, kemer, tonoz ve pandantif yapımında yonu taş kullanılmıştır. Yapıda kullanılan yonu taş özgün yapıda olup, harpuşta, zemin kaplaması, merdiven basamak ve çörtenderde kullanılan yonu taş ise günümüz yapı malzemesidir.



Şekil 26. Mazlum Ağa Hamamı teras ve taş sütun detayları (Öztürk, 2019).

5.3. Tuğla

Hamamın kubbe ve baca yapımında kullanılmıştır. Yapının onarımında kullanılan harman tuğlası özgündür.

5.4. Ahşap malzeme

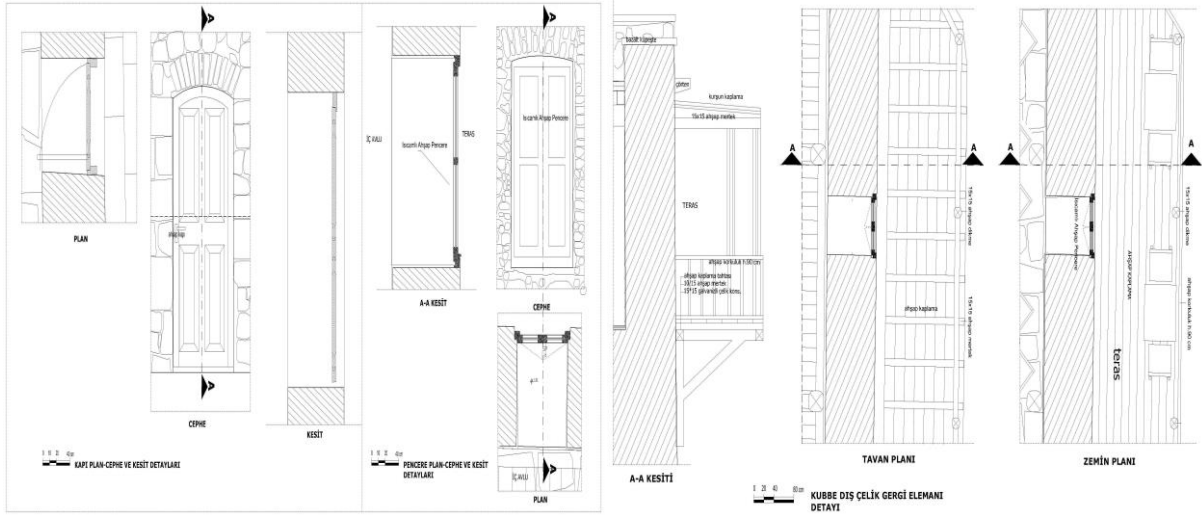
Yapının tüm kapı pencere doğramalarında kanat, kayıt, kasa teras yapımında, soyunmalık, giriş ve depo mekânlarının örtü kaplamasındaki dikme, kiriş ve tavan kaplamasında ahşap malzeme kullanılmıştır (Şekil 26, 27). Hamamın onarımında kullanılan ahşap malzeme, örtü sistemi hariç diğer tüm bölümlerde kullanılan ahşap günümüz yapı malzemesidir.

5.5. Kurşun malzeme

Yapının teras sundurma kaplamasında, kubbe ve düz dam kaplamasında 1,5 mm kalınlığında kurşun malzeme kullanılmıştır. Hamam onarımında kullanılan kurşun kaplama özgün olmayıp günümüz yapı malzemesidir.

5.6. Metal malzeme

Mazlum Ağa Hamamı'nın tüm kapı, pencere kasa, kayıt ve kanatlarının aksesuarlarında, sundurma teras, merdiven ferforjelerinde, istinat koruma duvarı yapımında donatı olarak metal malzeme kullanılmıştır. Kubbe kasnak yapımında kenet olarak ve aydınlatma fener imalatında metal malzeme kullanılmıştır. Hamam onarımında kullanılan metal malzeme özgün olmayıp günümüz yapı malzemesidir.



Şekil 27. Mazlum Ağa Hamamı kapı, pencere detayları (Öztürk, 2019).

6. Mazlum Ağa Hamamı Onarım Çalışmaları

Mazlum Ağa Hamamı'nın onarım çalışmaları, Kars Valiliği İl Özel İdare Sekreterliği'nin teknik elemanları, mesleki denetimi mimari proje müellifi ve ilgili yüklenici firmanın teknik elemanlarının eş güdümlü işbirliği kapsamında 2017-19 yılları arasında yapılarak tamamlanmıştır.

Yüklenici firma, Mazlum Ağa Hamamı'nın koruma raporu içeriğinde yer alan gerekli can, mal güvenliğini ve diğer zaruri önlemleri alarak çalışmaya başlamıştır. Onarımın ilk aşamasında, yapının iç ve dış bölümlerinde sonradan inşa edilen muhdes ekler kaldırılmıştır. Yapı onarım çalışmalarında görev alan işçi ve kalifiye usta elamanlar, konusunda uzman ve daha önce onarım çalışmalarında görev yapan kişilerden oluşmaktadır.

Hamamın dış beden, iç bölme duvarlarında ve kubbe bölümünde güvenli çalışma yapabilmek amacıyla ahşap iskele kurulmuştur. Yapıyı oluşturan mekânları beden duvar satırları yakın dönemlerde çimento katkılı harçlar ve muhdes kısımlar uzman elemanların denetiminde raspalanarak yapılmıştır. İç mekân kaplamasında yer yer kullanılan beton ve kara mozaik bölümleri itina ile sökülüp hafriyatı çalışma alanı dışına taşınmıştır (Şekil 28, 29).



Şekil 28, 29. Mazlum Ağa Hamamı onarım süreci (Öztürk, 2019).

Hamamın soğukluk, ılıkılık ve sıcaklık bölümlerini oluşturan duvarları temizliği ve derz dolgu onarımları yapılmıştır. Sıcaklık bölümünün kubbesi ve diğer mekanların yapısal sorunları enjeksiyon ve kısmi tamamlama gibi bazı onarım yöntemleri ile alanında uzman olan çalışanlar tarafından giderilmiştir. Soğukluk bölümündeki sekizgen formlu kubbe kasağının ve kubbenin çatlaklar,

yarıklar, yapısal deformasyonlar nedeniyle statik olarak ayakta durmasının mümkün olmadığı, statik konusunda uzman bilim insanları tarafından tespit edilmiştir (Şekil 30, 31).



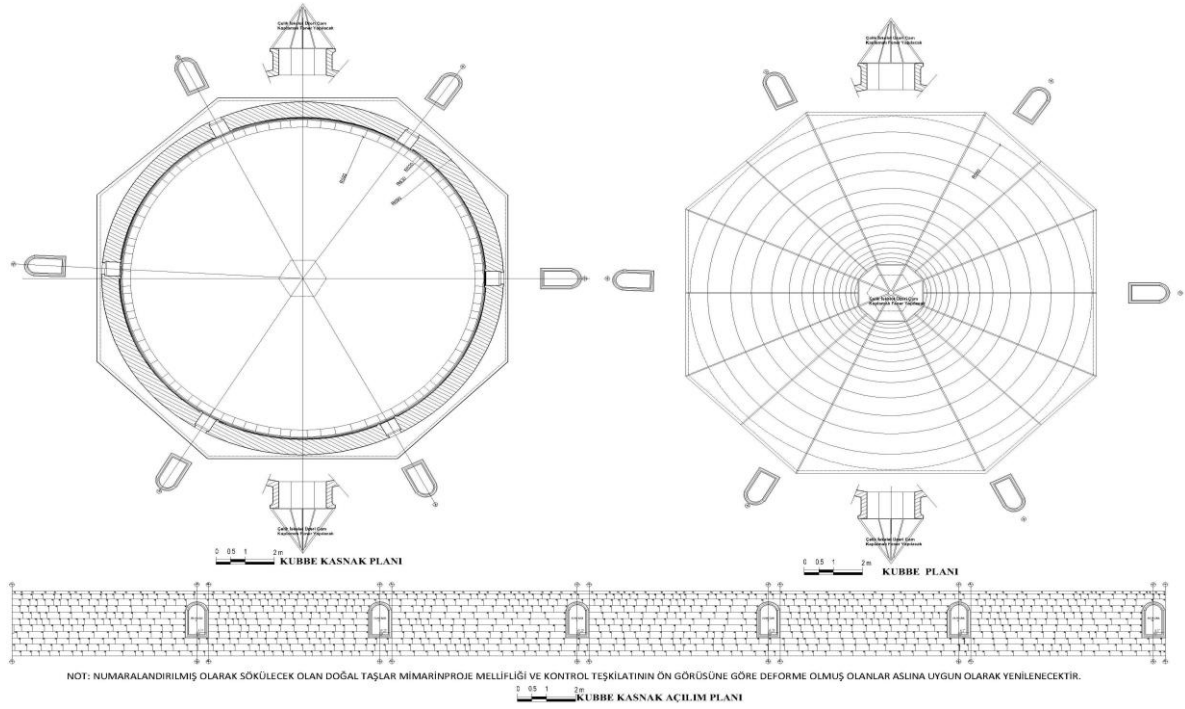
Şekil 30, 31. Mazlum Ağa Hamamı kubbe kasnak görüşleri (Öztürk, 2019).

Bu kapsamda kubbe kasnağı ve altı adet pencerenin yonu taşlarının, yatayda rakamsal; düşeyde ise alfabetik olarak numaralandırılıp belgelendirmeleri, görsel olarak fotoğraf ve video çekimlerinin yanı sıra 1/10 ölçeğinde rölöve ile belgeleme çalışmaları özenle hazırlanmıştır. Tüm bu belgeleme ve rölöve çalışmaları yapıldıktan sonra, kubbe merkezinden itibaren sekizgen formundaki kasnak mobil vinç yardımıyla alt kotuna kadar numaralandırılan taş dizilimi dikkate alınarak özenle sökülmüş ve düz bir zeminde istiflenmiştir (Şekil 32, 33).



Şekil 32, 33. Mazlum Ağa Hamamı Kubbe kasnak ve pencere görüşleri (Öztürk, 2019).

Kubbe kasnağının oturduğu zeminde gerekli düzenlemeler yapılarak sekizgen kasnak içten dairesel, dıştan ise sekizgen formunda özgün yonu taşlar yeniden kullanılarak inşa edilmiştir. Daha önce hazırlanan statik ve mimari projedeki numaralara uygun metal kenet takviyeli, moloz dolgu duvar yapım tekniğinde kasnak ve altı adet benzer mimari özellikte yuvarlak kemerli pencereler karşılıklı olarak yeniden inşa edilmiştir (Şekil 34, 35).



Şekil 34, 35. Mazlum Ağa Hamamı kubbe kasnak plan-kesit ve açılım detayı (Öztürk, 2019).

Kubbenin yeniden inşası statik projesi ve yapısal analiz verileri kullanılarak çağdaş ve özgün malzeme birlikte kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla kubbenin iç kısmında toplamda 12 adet taşıyıcı dikme bulunmakta ve dikmeler yaklaşık 1.50 m aralıklarla dağılıp pencerelere denk gelmeyecek bir konumda sıralanarak kasnak taş duvara herhangi bir zarar vermeyecek biçimde yerleştirilmiştir. Kasnak taş duvar ile kubbenin birleştiği yerde 0.15x0.30 m ölçülerinde yuvalar açılarak kauçuk üzerinde 0.02 m kalınlığındaki bağlantı elemanları ile taşıyıcı dikmelere kaynak uygulaması yapılmıştır. (Şekil 36, 37).



Şekil 36, 37. Mazlum Ağa Hamamı kubbe kasnak metal kenet görüntüleri (Öztürk, 2019).

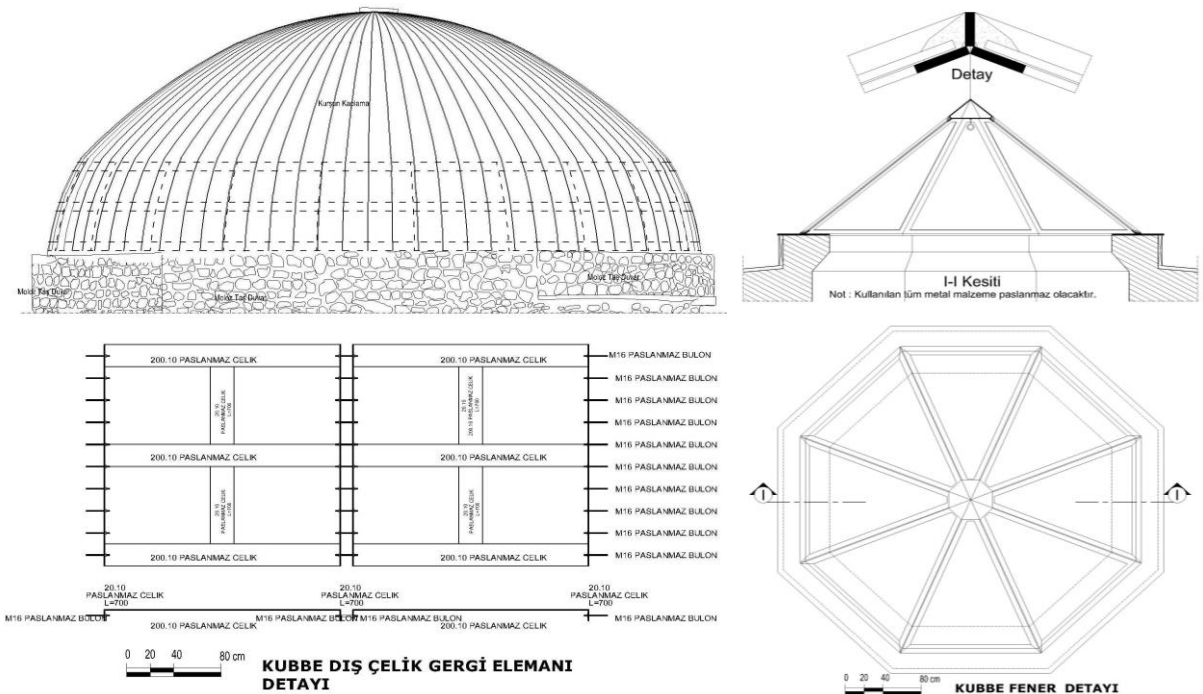
İkinci aşamada yatay metal taşıyıcılar 0.60 m aralıklarla sıralanmıştır. Üçüncü aşamada 0.04 m kalınlığında 0.04x0.04 m boşluklu çelik hasırlar aşağıya doğru kaydırılıp kubbenin iç bölümü tamamlanmıştır (Şekil 38, 39). Kubbe dış yüzeyindeki düşey taşıyıcıların paralelinde 1.50 m

yükseğinde dikey taşıyıcılar 0.70 m aralıkla üç sıra halinde yatay taşıyıcı ile çevrelenmiş, iç kasnak ile dış kasnak metal blonlar ile birbirine sabitlenerek, blonların uçları duvar içerisine yerleştirilmiş ve dış kubbe çalışması tamamlanmıştır.



Şekil 38, 39. Mazlum Ağa Hamamı kubbe onarım görünüşleri (Öztürk, 2019).

Son aşamada kubbe çelik hasırlarla çevrelenerek tamamlanmıştır. Kubbe üst çemberinin üzerine sekizgen formunda metal strüktürlü şeffaf damperli cam ile aydınlık feneri hazırlanmış; bu eleman da projedeki detaya uygun olarak inşa edilmiştir (Şekil 40, 41). Mazlum Ağa Hamamı'nın güney bölümünde yer alan kente ulaşım yolunda özellikle yüksek tonajlı araçların geçişi sırasında ortaya çıkan titreşim ve basınç, yapının statik durumunun olumsuz bir şekilde etkilenmesine neden olmaktadır.



Şekil 40, 41. Mazlum Ağa Hamamı kubbe ve fener statik güçlendirme plan-kesit ve cephe detayları (Öztürk, 2019).

İstinat duvarının tabanı betonarme ampatmalı yapıda 0.65x1.25 m ölçülerinde betonarme kiriş üzerine 3.95 m yükseklikte, zeminde 1.00 m, üst kotta ise 0.50 m kalınlığında şevli bir konumda inşa edilmiştir. İstinat duvarının muhtelif bölümlerine zemin sularının dışarıya tahliyesi amacıyla çok sayıda, 0.10 m çapında barbakanlar yerleştirilmiştir.

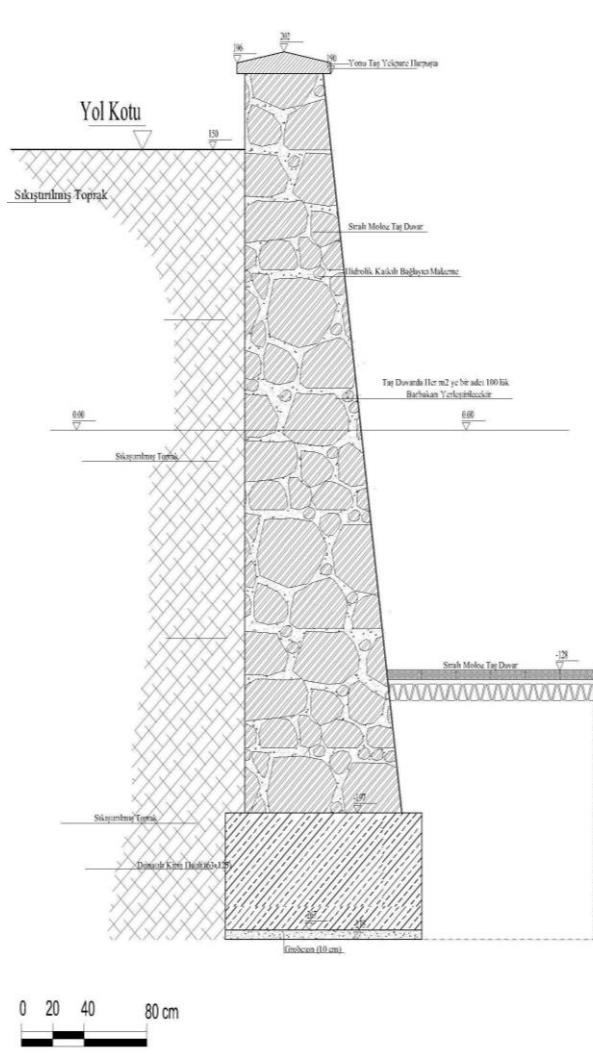
İstinat duvarı moloz taş dolgu yapı tekniğinde derzli olarak inşa edilmiştir. İstinat duvarının üzeri her iki yönden 0.05 m dışa taşınılı yonu taştan yapılmış harpuşa ile örtülüdür (Şekil 44, 45). Hem istinat duvarının alt kısmında hem de hamamın güney beden duvarının alt kotunda taban sularının tahliye etmek amacıyla yuvarlak kesitli drenaj boruları düzenli olarak yerleştirilmiştir (Şekil 41, 42).



Şekil 42, 43. Mazlum Ağa Hamamı kapalı drenaj görünüşleri (Öztürk, 2019).

Hamamın batı ve güneyinde yeniden inşa edilen yer altı kapalı drenaj sistemi, istinat duvarı sistemi ile bağlantılı olarak yapının kuzeyinde daha düşük kot olan Kars Çayı'na drene edilmiştir. Böylece yapıyı zeminde olumsuz etkileyen taban suları ile örtü sisteminde çörlenlerden akan kar ve yağmur sularının tahliyesi sağlanmıştır (Şekil 42, 43). Mazlum Ağa Hamamı'nın batı ve güneyindeki koruyucu istinat duvarları ve zemin yonu taş kaplamasının eğimi kuzeydeki Kars Çayı'na yönelik olarak yeniden inşa edilmiştir. Yapının batısında 10 araçlık otopark ve çevre düzenlenmesi yapılmıştır. Otopark ile yapı arasında yaya ilişkisini sağlamak amacıyla batı çevre duvarından bir kapı yerleştirilmiştir (Şekil 46, 47).

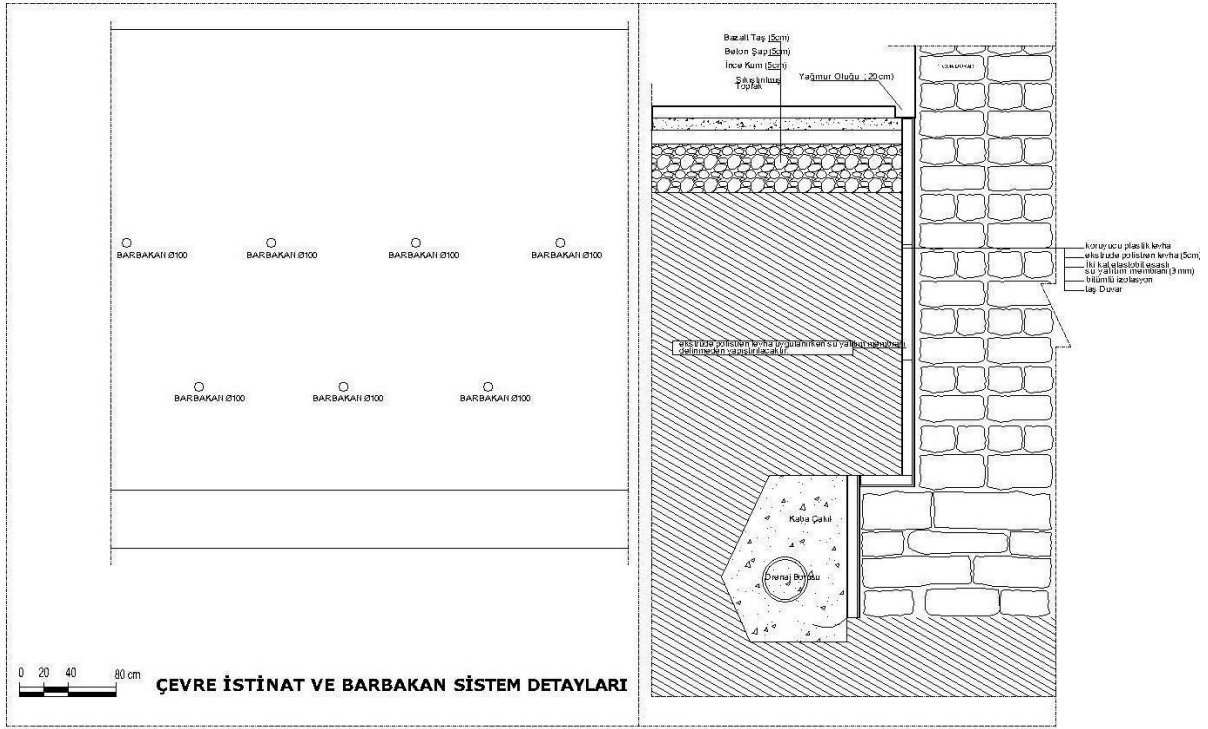
Mazlum Ağa Hamamı'nın onarımlarında ortaya çıkan özgün beden taş duvarları, pencere, niş yuvaları ve duvar derz dolgusu restorasyon projesindeki ölçü ve ilkelere bağlı kalınarak onarılmıştır. Yapının kubbe, taşıyıcı ve örtü sisteminin raspa, temizlik bakım ve onarımı yapılmıştır. Hamamın tüm kapı, pencere ahşap kanat ve kasa doğramaları ile teras elemanları yeniden imal edilmiş, pencere ve kapı metal korkuluk ve diğer aksesuarların bakım, onarım ve yeniden imalatları yapılmıştır (Şekil 27). İskele kurulan yapının tüm cephelerinin yüzey ve derz temizliği yapılmış, daha sonra tüm cephelerin bakım, onarım ve derz dolguları düzenli bir şekilde yapılarak tamamlanmıştır.



Şekil 44, 45. Mazlum Ağa Hamamı çevre güney istinat duvarı kesit detayı ve onarım görünüşü (Öztürk, 2019).

Hamamın düz dam ve kubbe örtü sisteminin farklı dönemlerde beton ve ahşap uygulamaları ile özgün yapısı tamamıyla deforme olmuştur. Aslına uygun olmayan tüm uygulamalar düzenli bir şekilde söküldükten sonra onarım projesindeki malzeme katmanlarının uygulaması yapılarak su sızmalarını önlemek üzere iki katlı izolasyon membranı kullanılmıştır. Mazlum Ağa Hamamı'nın elektrik ve mekanik tesisat sistemi, yeniden onaylı hazırlanan tesisat projesine uygun armatürleri uzman teknik elemanlar denetiminde yapılmıştır.

Onarımda kullanılan harç numunesi analiz karışım oranları :
% 28-30 oranında sönmüş ve bekletilmiş kaymak kireç malzeme
% 25-27 oranında taş tozu malzeme
% 40-43 oranında temiz su ile yıkanmış ince dere kumu



Şekil 46, 47. Mazlum Ağa Hamamı çevre duvarı kesit detayı (Öztürk, 2019).

7. Mekân Kullanımı

Mazlum Ağa Hamamı'nın onarım çalışmaları 2021 yılında tamamlanmasına rağmen, ilgili kurumlar tarafından henüz kullanıma yönelik bir işlev belirlenmemiştir. Yerli ve yabancı birçok turist tarafından ziyaret edilen hamam Kars Valiliği ve İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü tarafından daha çok sosyal ve kültürel amaçlı faaliyetlerde kullanılmaktadır (Şekil 48, 49).



Şekil 48, 49. Mazlum Ağa Hamamı kuzeydoğu genel görünüşleri (Öztürk, 2019).

8. Sonuç

Kars ili, Anadolu'nun kuzey ve doğuya açılan önemli kadim kentlerinden biridir. Yerleşim, tarih boyunca jeopolitik ve stratejik konumundan dolayı sürekli dış baskıların olumsuz etkisine maruz kalmıştır. Yapılan savaşlar sonucunda kentin kültürel ve sosyal yapısında önemli bir yere sahip olan mimari eserler yıkılmıştır. İnşa edilen dönemin siyasi, ekonomik ve kültürel izlerini taşıyan bu eserler adeta dönemin uygarlığının birer nişanı gibidir.

Cumhuriyet döneminde Rus-Baltık mimarisi etkisi ile tarihi Kars Kalesi'nin güney eteklerinde ve kenti doğu-batı istikametinde ikiye ayıran Kars Çayı'nın güneyindeki geniş bir alanda garnizon kent, ızgara plan tipinde kurulmuştur. Bu kent, içerisinde homojen bir yapıya sahip olmayan dini, askeri ve çoğunlukla sivil mimari yapı örnekleri ile donatılmıştır. Eski kent dokusunu oluşturan özgün kent mimarisi 2000'li yılların başına kadar kendi kaderi ile baş başa bırakılmıştır. Son yıllarda başta Kültür ve Turizm Bakanlığı olmak üzere, Kars Valiliği, Kars Belediyesi, Vakıflar Erzurum Bölge Müdürlüğü, Erzurum Karayolları Bölge Müdürlüğü vb. kurum ve kuruluşlar tarafından tarihi kalenin güneyindeki eski doku özelinde Kars Çayı'nın her iki yakasındaki korumaya yönelik başlatılan mimari onarım projelerin büyük bir bölümü tamamlanmıştır.

Bu kapsamda Kars Valiliği, İl Özel İdaresi tarafından onarım çalışmaları başlatılan yapılardan biri de Mazlum Ağa Hamamı'dır. Osmanlı dönemi XVII. yüzyıl hamam mimari özelliğinde inşa edilen Mazlum Ağa Hamamı, plan ve mimari özellikleri dikkate alındığında yaklaşık kare planlı, tek eyvanlı, karşılıklı dörder ve toplam sekiz hücreli mekândan oluşmaktadır. Yaklaşık bir asır boyunca kullanılmayan ve kendi kaderine terk edilen Mazlum Ağa Hamamı'nın taşıyıcı örtü sisteminde ve beden duvarlarında ciddi yapısal sorunlar oluşmuştur. Ayrıca doğanın olumsuz etkileri ve define arayıcılarının kazı çalışmaları ile yapı oldukça tahrip olmuştur. XVII. yüzyıl mimari mirasının korunması ve günümüzde kullanılarak geleceğe aktarılması amacıyla Kars Valiliği tarafından yapılan çalışmalar oldukça önemlidir. Hamamdaki onarım ve koruma çalışmaları 2017-21 yılları arasında Kars Valiliği İl Özel İdaresi tarafından tamamlanmıştır. Onarımı tamamlanan Mazlum Ağa Hamamı'nın yeniden hamam olarak kullanılması yapının su iletim altyapı sisteminin tamamıyla tahrip olması nedeniyle mümkün değildir. Ayrıca hamamın kuzeyinde ve doğusunda iki tarihi hamam yer almaktadır. Bu hamamların altyapı sistemlerinin sağlam olması yapının hamam olarak kullanılmasına daha uygundur.

Mazlum Ağa Hamamı'nın yeniden kullanımına yönelik işlevi Kars Valiliği, İl Kültür Turizm Müdürlüğü ve Kars halkının görüş ve önerileri kapsamında yeniden değerlendirilmesi ile mümkün olacaktır. Onarımı yapılan hamamın fonksiyonel yapısına uygun işlev verilerek kentin kültür ve turizmüne kazandırılması ve gelecek kuşaklara aktarılması bakımından oldukça önem arz etmektedir.

Kaynakça

- Akçayöz, V., & Öztürkkan, Y. (2010). *Eski yeni fotoğraflarla Kars - An illustrated story Kars*. İstanbul: Kars Kültür ve Sanat Derneği Yayınları.
- Aru, K. A. (1949). *Türk Hammalarının Etüdü*. İstanbul: İTÜ Mimarlık Fakültesi Yayınları.
- Belli, O. (2007). *Kars Bölgesi'ndeki keşfedilen tarih öncesi döneme ait kaya üstü resimleri*. Kars 2. Kent Kurultayı-Kafkasya'da Ortak Geleceğimiz, İstanbul, Türkiye.
- Demir, M. (2013). *Kars kent coğrafyası*. (Doktora tezi), Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Diez, E., & Aslanapa, O. (1955). *Türk Sanatı*. İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Yayınları, No. 627.
- Esad, C. (1928). *Türk Sanatı*. İstanbul: Akşam Matbaası.
- Eyice, S. (1960). İznik'te büyük hamam ve Osmanlı devri hamamları hakkında bir deneme. *Tarih Dergisi*, 11, 108.
- Eyice, S. (1997). Hamam maddesi. *Diyanet İslam Ansiklopedisi*, C. XV, 402-429. İstanbul: TDV Yayınları.
- Glück, H. (1927). İslam hamamının menşei ve tekâmülü. *Türk Yurdu*, 5(27), 259-279.
- Kars Valiliği. (1999). *Cumhuriyetimizin 75.Yılında Kars*. Ankara: Önder Matbaacılık.
- Klinghardt, K. (1927). *Türkische Baeder, Julius Hoffman*. Stuttgart: Herausgegeben mit Unterstützung Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft.
- Önge, Y. (1988). *Anadolu Türk hamamları hakkında genel bilgiler ve Mimar Koca Sinan'ın inşa ettiği hamamlar, mimarbaşı Koca Sinan: yaşadığı çağ ve eserleri*. İstanbul: C. I. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Öztürk, Ş. (2002). *Van Gölü Havzası Orta Çağ ve sonrası su mimarisi*. (Doktora tezi), Yüzüncü Yıl Üniversitesi. Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sanat Tarihi Anabilim Dalı, Van, Türkiye.
- Öztürk, Ş. (2018). *Kars/Merkez Mazlum Ağa Hamamı koruma rölöve, restitüsyon ve restorasyon raporu*, Kars, Türkiye, 5-25 s (yayınlanmamış).

- Öztürk, Ş. (2019). Kişisel proje ve fotoğraf arşivi. Van.
- Öztürk, Ş. (2021, Mart). *Kars su mimarisinden bir örnek: Mazlum Ağa Hamamı*. III. Uluslararası Aras Havzası Sempozyumu, Kafkas Üniversitesi, Kars, İstanbul-Türkiye.
- Sevgen, N. (1959). *Anadolu Kaleleri*, 1.Cilt. Ankara: Doğu Ltd. Şirketi Matbaası.
- Uluçam, A. (1992). *Kars'taki Osmanlı eserleri*. Yakın Tarihimizde Kars ve Doğu Anadolu Sempozyumu, Ankara-Türkiye.
- Ülgen, A. S. (1988). Hamam maddesi. *İslam Ansiklopedisi*, C.V, 174-178. İstanbul: Milli Eğitim Yayınları.



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Absisik Asit ve Arbusküler Mikorizal Fungus Uygulamalarının Fasulyede Kömür Çürüklüğü Hastalığı [(*Macrophomina phaseolina*) (Tassi) Goid.] ve Bitki Gelişimine Etkisi †

Ali VURAL¹, Semra DEMİR^{*1}, Çeknas ERDİNÇ²

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, 65040, Van, Türkiye

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, 65040, Van, Türkiye

Ali VURAL, ORCID No: 0009-0006-9053-9529, Semra DEMİR, ORCID No: 0000-0002-0177-7677,

Çeknas ERDİNÇ, ORCID No: 0000-0003-1208-032X

*Sorumlu yazar e-posta: semrademir@yyu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 19.03.2024

Kabul: 16.05.2024

Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1452862

Anahtar Kelimeler

Absisik asit,
Arbusküler mikorizal
funguslar (AMF),
Fasulye,
Goidanich,
Macrophomina phaseolina
(Tassi)

Öz: Bu çalışmada, fasulyede önemli bir patojen olan kömür çürüklüğü hastalığı etmenine karşı (*Macrophomina phaseolina* (Tassi) (Goidanich) (Mp) Arbusküler mikorizal fungus (AMF) ve absisik asit (ABA) uygulamasının etkileri incelenmiştir. İlk aşamada *in vitro* koşullarda ABA'nın 0, 1, 5, 10, 20 µM dozlarının Mp'ya karşı etkisine bakılmış ve 5 µM ABA dozunun Mp'nin koloni gelişimini yüksek oranda kısıtladığı görülmüştür. İkinci aşamada, iklim odası koşullarında yetiştirilen Gina fasulye çeşidine ait fidelerde AMF ve farklı ABA dozlarının bitki gelişimi ve kömür çürüklüğü hastalığına etkileri incelenmiştir. Bazı fide gelişim parametrelerinde (*yaprak sayısı, toplam yaprak alanı, yaş ağırlık, kuru ağırlık*) tüm ABA dozları kontrole göre azalmaya neden olurken, bazı parametrelerde ise (*toplam yaprak alanı, yaş ve kuru ağırlık*) 5 µM ABA'nın diğerlerine göre daha etkili olduğu bulunmuştur. Tek başına ABA dozlarının hastalık şiddeti üzerindeki etkisinde, 5 µM ABA dışındaki diğer dozların hastalık şiddetini arttırdığı belirlenmiştir. Genel olarak ABA dozlarının AMF ile birlikte uygulanmasının %33 oranında hastalık şiddetinde azalmaya neden olduğu saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar, uygun ABA dozu ve AMF'nin kombine uygulanmasının hastalık yönetiminde etkili olabileceğini göstermiştir.

Abscisic Effect of Abscisic Acid and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Applications on Coal Rot Disease [(*Macrophomina phaseolina*) (Tassi) Goid.] and Plant Growth in Bean

ArticleInfo

Received: 19.03.2024

Accepted: 16.05.2024

Online Published August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1452862

Keywords

Abscisic acid,
Arbuscular mycorrhizal fungi
(AMF),
Bean,
Goidanich,

Abstract: In this study, the effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and abscisic acid (ABA) treatment against charcoal rot disease, an important pathogen of bean (*Macrophomina phaseolina* (Tassi) (Goidanich) (Mp) were investigated. In the first stage, the effects of 0, 1, 5, 10, 20 µM doses of ABA against Mp were investigated under *in vitro* conditions and it was observed that 5 µM ABA dose highly restricted the colony growth of Mp. In the second stage, the effects of AMF and different ABA doses on plant growth and charcoal rot disease in seedlings of Gina bean cultivar grown under climate chamber conditions were investigated. While all ABA doses caused a decrease in some seedling growth parameters (number of leaves, total leaf area, wet weight, dry weight) compared to the control, in some parameters (total leaf area, wet and dry weight) 5 µM ABA was found to be more effective than the others. In the effect of ABA doses alone on

† Bu çalışma Ali VURAL'ın "Fasulyede Kısıtlı Sulama Koşullarında, Absisik Asit ve Arbusküler Mikorizal Fungus (AMF)

Uygulamalarının Fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) Kömür Çürüklüğü (*Macrophomina phaseolina*) (Tassi) Goid. Hastalığına ve Bazı Verim Unsurlarına Etkisi" isimli doktora tez çalışmasının bir kısmını oluşturmaktadır.

Macrophomina phaseolina
(Tassi)

disease severity, it was determined that all doses except 5 μ M ABA increased the disease severity. In general, it was determined that the application of ABA doses together with AMF caused a 33% decrease in disease severity. The results obtained showed that the combined application of appropriate ABA dose and AMF may be effective in disease management.

1. Giriş

Dünya üzerinde en çok yetiştiriciliği yapılan türler arasında yer alan fasulye, Türkiye’de de hem sebze hem de tarla bitkisi olarak yaygın olarak yetiştirilmektedir. Çok geniş bir tür çeşitliliğine sahip olan Fabaceae familyasına dahil olan fasulye önem bakımından baklagiller içinde dünyada üçüncü sırada yer almaktadır (Blair ve ark., 2009). İnsan beslenmesinde temel protein ihtiyacının yaklaşık olarak % 30’unu karşılama yanı sıra, içerdiği antioksidan bileşikler nedeniyle birçok hastalığın tedavisinde etkili olduğu belirtilmektedir. Ayrıca gıda olarak tüketilmesinin dışında kozmetik ve boya sanayisinde de kullanılmaktadır (Singh ve ark., 2007). Türkiye, dünya taze fasulye üretiminde 519.713 ton üretim ile Çin, Endonezya ve Hindistan’dan sonra dördüncü sırada yer almaktadır (FAOSTAT, 2022).

Ülkemizde hem olgunlaşmamış taze baklası hem de olgunlaşmış kuru tohumları tüketildiği için hemen hemen her bölgede yetiştiriciliği yapılan fasulyede, pek çok abiyotik ve biyotik stres kaynağı önemli verim kayıplarına neden olmaktadır. Önemli biyotik stres faktörlerinden biri de toprak kökenli fungal etmen *Macrophomina phaseolina*’nın neden olduğu kömür çürüklüğü hastalığıdır. Nekrotrofik patojen *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid. (Khan, 2007), bitkilerin kök bölgesinde hastalık meydana getirmekte, önemli verim kayıpları oluşturmaktadır (Mihail, 1992; Partridge, 2003; Ndiaye ve ark., 2007). Sulu şartlarda kömür çürüklüğünün şiddetinin, kuru şartlara göre çok daha düşük olduğu (Mengistu ve ark., 2018); kömür çürüklüğü nedeniyle verim düşüklüğünün % 6-33 arasında seyrettiği bildirilmiştir (Mengistu ve ark., 2011). Etmen, fasulyenin de içinde bulunduğu birçok kültür bitkisinde hastalığa neden olur (Pastor-Corrales & Abawi, 1988). *M. phaseolina*’nın fasulyede neden olduğu kayıplar; çıkış öncesi ve sonrası fide ölümleri, dayanıklılık kaybı veya olgun bitkilerde verim kayıpları şeklinde ortaya çıkmaktadır. Ciddi şekilde enfekte olmuş bitkilerde solgunluk, kloroz, erken yaprak dökülmesi, erken olgunluk ve ölüm görülür (CIAT, 1983). Fungus çoğaldıkça, mikrosklerot adı verilen küçük siyah hif kümeleri oluşturur ve enfekte olmuş ölü bitkiler toprağa dahil olarak fungusun gelecekteki enfeksiyon kaynağını oluştururlar (Dhingra, 1978; Gupta ve ark., 2012; Iqbal ve ark., 2014). Mikrosklerotlar, toprakta 2-15 yıl boyunca hayatta kalabilirler. Fungusun, primer enfeksiyon kaynağı olan mikrosklerotların yanı sıra, konukçu türüne (Dhingra, 1978) ve ortama bağlı olarak konidia oluşturma yeteneği de bulunmaktadır (Ma ve ark., 2010).

M. phaseolina’ya karşı konukçu düzeyinde genetik dayanıklılık ile ilgili bilgiler sınırlıdır. *M. phaseolina* enfeksiyonunu inhibe eden veya sınırlayan bilinen bir dikey direnç (R-genine dayalı) olmamakla birlikte, enfeksiyonu sınırlamayan, ancak hasarları azaltan veya telafi eden kısmi bir direnç olduğu ifade edilmektedir. Fasulye gibi önemli bir bitkide verim kayıplarına neden olan *M. phaseolina*’ya karşı konukçu dayanıklılığının tek başına yetersiz kalması; bu patojenle mücadelede sulama, organik katkıların eklenmesi ve ürün rotasyonu gibi kültürel önlemlerin de çok etkili olmamasından dolayı bu hastalıkla mücadelede; biyolojik mücadele ajanları ve bitki büyüme düzenleyicilerinden faydalanılabilir ve bu yönde yapılmış araştırmalar da mevcuttur (Marquez ve ark., 2021).

Etmene karşı biyolojik mücadelede kullanılabilecek ajanlardan biri Arbusküler Mikorizal Fungus (AMF)’dur. AMF’ler bitki besin maddesi ve su alınımını arttırmak suretiyle bitki gelişimini teşvik etmekte, ürün kalite ve kantitesini arttırarak verim unsurlarını arttırmakta ve bitkinin biyotik ve abiyotik stres faktörlerine karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadırlar (Koide, 2006). Konukçu bitki ile simbiyotik ilişki kuran Arbusküler Mikorizal (AM) fungus bitkiye penetrasyondan sonra önemli fizyolojik değişikliklere neden olarak, bitkilerin hastalık etmenlerine predispozisyonunu etkilemektedir. AM fungusu ile bitki arasındaki interaksiyon kök bölgesinde cereyan ettiğinden, bu alanda yapılan çalışmalar genellikle toprak kaynaklı patojenlerin, özellikle fungusların neden olduğu hastalıklar üzerinde yoğunlaşmıştır (Demir & Onoğur, 1999). Genel olarak bazı AM fungusları, kültür bitkileri ile simbiyotik yaşamı sadece bitki gelişimi açısından değil, toprak kaynaklı patojenlere karşı dayanıklılık

sağlaması yönüyle de önemlidir (Dehne, 1982; Linderman, 1994). Soya fasulyesi, mung fasulyesi ve kavun gibi kültür bitkilerinde AMF'nin kömür çürüklüğü etmeninin konukçu köklerinde yayılışını engelleyerek hastalık şiddetini azalttığı ve hastalığa karşı dayanıklılık sağladığı bildirilmiştir (Zambolim & Schenck, 1983; Jalali ve ark., 1990; Demir, 1998). AMF'nin, *M. phaseolina*'nın soya fasulyesinde biyokütle ve tohum üretimi üzerindeki olumsuz etkilerini minimize ettiği (Marquez ve ark., 2018), soya fasulyesinde, patojen varlığında (*M. phaseolina*) düşük seviyelerde AMF (*G. intraradices*) kolonizasyonu ve canlılığı gözlenirken, AMF uygulamasının hastalığı azalttığı (Spagnoletti ve ark., 2017), ekimden önce AMF (*Glomus deserticola* ve *Gigaspora gigantea*) inokulasyonu yapılan ve 10 günlük çimlenmeden sonra *M. phaseolina* aşılanan toprakta daha yüksek büyüme parametrelerinin kaydedildiği, eş zamanlı aşılanan bitkide ise hastalık şiddetinin en düşük düzeyde kaydedildiği bildirilmiştir (Oyewole ve ark., 2017).

Bitki büyüme düzenleyicilerinden absisik asit de (ABA) stres koşullarına karşı temel bitki savunma tepkilerine aracılık eder (Jiang & Zhang, 2001; Stec ve ark., 2016; Chen ve ark., 2020). ABA'nın embriyo olgunlaşması, tohum dormansisi, çimlenme, hücre bölünmesi ve uzaması, çiçek indüksiyonu ve kuraklık, tuzluluk, soğuk, patojen saldırısı ve UV radyasyonu gibi çevresel streslere verilen tepkiler dahil olmak üzere bitki büyümesi ve gelişiminin birçok yönünü düzenlediği gösterilmiştir (Finkelstein, 2013). Yüksek ABA konsantrasyonunun, patojen enfeksiyonu zamanında ekzojen uygulama nedeniyle bitki hastalık direncini etkilediği (Mohr & Cahill, 2003), ABA'nın, bitkinin patojen enfeksiyonuna cevabında negatif veya pozitif etki yapabildiği, bitkilerdeki daha yüksek ABA seviyelerinin, SA, JA veya etilenin aracılık ettiği sinyali baskılayarak savunma gen ekspresyonunu baskılayabildiği bildirilmiştir (Anderson ve ark., 2004). ABA'nın, stomaların hızlı kapanması yoluyla penetrasyon direncini artırarak patojenlere karşı pre-invaziv (enfeksiyon öncesi) savunmada ağırlıklı olarak olumlu tepkiler verdiği ifade edilmektedir (Melotto ve ark., 2006; Başak, 2011). Ekzojen ABA uygulamasının *Medicago truncatula* A17 bitkilerinde *Macrophomina phaseolina*'nın hastalık gelişimini daha çok hızlandırdığı (Hefel, 2010), bu çalışmanın sonucunda; bitkilere düşük doz ABA (10-20 µM) uygulamasının hastalığın ilerlemesini hızlandırdığı ve ABA üretimi ve sinyalizasyonunun *M. phaseolina* ile enfekte olmuş bitkilere zararlı olabileceği ifade edilmiştir.

AMF-bitki interaksyonunun stres koşulları altında bitki açısından avantaj yarattığı, özellikle bitkinin hormon dengesinde farklılıklar yarattığı bilinmektedir. Nitekim Wu ve ark. (2021), bitki başına AMF spor yoğunluğu arttıkça bitkideki absisik asit, indol asetik asit ve giberallik asit birikiminin arttığını rapor etmiştir. Aynı zamanda Martinez-Medina ve ark. (2011), kavun bitkilerinin sürgünlerinde *T. harzianum* ve AMF (*Glomus intraradices* ve *Glomus mosseae*) ile eş zamanlı inokulasyonların sürgündeki zeatin (Ze), indol-3-asetik asit (IAA), 1-aminosiklopropan-1-karboksilik asit (ACC), salisilik asit (SA), jasmonik asit (JA) ve absisik asit (ABA) içeriğinde farklı tepkileri gösterdiğini ve bu etkilerin fusarium solgunluğuna karşı bazal dirençte etkili olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmada; *in vitro* koşullarda farklı ABA konsantrasyonlarının *Mp*'nin gelişimine etkilerinin belirlenmesi ve bu ABA dozlarının AMF (*Rhizopagus irregularis*) ile birlikte *in vivo* şartlarda fasulyede hastalık şiddeti ve bitki gelişimi üzerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada bitkisel materyal olarak bodur Gina fasulye çeşidi (May tohum); patojen olarak kömür çürüklüğü hastalığı etmeni *Macrophomina phaseolina*'nın (*Mp*) önceden yüksek virülensliği bilinen 7₂ izolatu; biyolojik kontrol ajanı olarak Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bitki Koruma Bölümü Mikoloji laboratuvarı stoklarından temin edilen *Rhizopagus intraradices* Schenck and Smith (*Rhizopagus irregularis*) kullanılmış; absisik asit (ABA)(CAT NO: 190673), MP Biyomedikal firmasından temin edilmiştir.

2.1. *In vitro* koşullarda farklı ABA dozlarının *M. phaseolina*'ya etkisinin belirlenmesi

Bu aşamada, *Mp*'nin *in vitro*'daki gelişimini en yüksek oranda engelleyen ABA dozu tespit edilmeye çalışılmıştır. ABA dozlarının, daha önce yapılmış çalışmalar dikkate alınarak; 9 cm'lik petrilere 15'er ml PDA ile birlikte 0, 1, 5, 10, 20 µM konsantrasyonları uygulanmıştır (Başak, 2011; Hefel, 2010). Önceden PDA ortamında geliştirilmiş 7-10 günlük *Mp* kültürlerinden corkborer yardımıyla 5 mm'lik parçalar alınarak, ABA+PDA içeren petri kaplarına yerleştirilmiştir (Soliman &

Badeaa, 2002). Petri kapakları parafilm ile sıkıca sarıldıktan sonra 27 °C’de inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyonun 3., 4., 5. ve 6. günlerinde petrilere gelişen fungusların koloni çapları dijital kumpas kullanılarak ölçülmüştür.

2.2. *In vivo* koşullarda farklı ABA dozlarının *M. phaseolina*’ya etkisinin belirlenmesi

Çalışmanın bu aşamasında *in vitro* denemede kullanılan absisik asit dozları (0, 1, 5, 10 ve 20 µM) ile birlikte AMF’nin *Mp*’ya ve bitki gelişimine etkisi araştırılmıştır. Çalışma, ortalama 23±2 °C sıcaklık, 16 saat aydınlık, 8 saat karanlık fotoperiyot ve 4000-6000 lux ışık şiddetine sahip iklim odası koşullarında tesadüf parselleri deneme desenine göre 5 tekerrürlü olacak şekilde yürütülmüştür. Tohumlar, önce 2:1 oranında torf ve perlit karışımı içeren plastik bardaklarda her bardağa bir tohum olacak şekilde ekilmiştir. AMF’nin olduğu deneme parsellerinde, inokulum tohum ekim yatağına konulduktan sonra tohum ekimi gerçekleştirilmiştir. Bitkiler ilk gerçek yapraklı dönemden itibaren Hoagland besin solüsyonu içeren (% 0.2) su ile sulanmış ve 3 gerçek yapraklı döneme ulaşıncaya 2:1 oranındaki torf ve perlit içeren 3 litrelik saksılara aktarılmıştır. Deneme, 8. haftanın sonunda sonlandırılmıştır.

2.2.1. Fide gelişim parametrelerinin belirlenmesi

Kömür çürüklüğü hastalığına karşı farklı ABA dozları ile AMF uygulamasının bitki gelişimine etkilerinin belirlenebilmesi için bitki boyu, gövde çapı, yaprak sayısı ve sürgün yaş ağırlığı (SYA) belirlenmiştir. Ayrıca, yaprak alanı LI-3000 C (LI-COR Biosences) marka cihaz ile ölçülmüştür. Bitkilerde gerekli ölçümler tamamlandıktan sonra oda koşullarında nemini kaybetmesi sağlanmış ve sonrasında 65 °C etüvde 48 saat süreyle kurutularak sürgün kuru ağırlıkları (SKA) belirlenmiştir.

2.2.2. AMF kök kolonizasyonu, toprakta AMF spor yoğunluğunun belirlenmesi

AMF kök kolonizasyonu, bitkilerin kök bölgesinden yaklaşık 0.5-1g olacak şekilde parçalar alınarak AFA fiksasyon sıvısına (% 70’lik 90 ml alkol, 5 ml formaldehit ve 5 ml asetik asit) konulan köklerde (Phillips & Hayman, 1970), Grid-Line Intersect Metodu kullanılarak (Giovanetti & Mosseae, 1980), 1 no’lu Eşitlik yardımıyla belirlenmiştir.

$$\% \text{ AMF} = \text{AMF}_K / K \times 100 \quad (1)$$

AMF_K = AMF ile kolonize olmuş kök sayısı;

K = Toplam kök sayısı

Toprakta AMF spor yoğunluğu, AMF’li bitkilerin rizosfer bölgesindeki topraklarda Gerdemann & Nicholson (1963) tarafından geliştirilen ıslak eleme metodu ile tespit edilmiştir.

2.2.3. *M. phaseolina*’nın hastalık şiddeti ve topraktaki propagül yoğunluğunun belirlenmesi

Fasulye bitkilerinde *Mp*’nın neden olduğu hastalık şiddetini belirlemek amacıyla, hasattan sonra bitki kökleri musluk suyunda yıkanmış, *M. phaseolina*’nın hastalık şiddeti 0-3 skalasına göre belirlenmiştir (Demir, 1998).

0= Sağlıklı

1= Kök boğazında 3 cm’den daha küçük hastalık belirtisi

2= Kök boğazında 3 cm’den daha büyük hastalık belirtisi

3= Bitki tamamen kurumuş ve ölmüş

Tanımsal skalaya göre belirlenen değerlerle, yeşil aksam Hastalık Şiddeti İndeksi (HŞİ) aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$H\dot{S}\dot{I} (\%) = [\Sigma(SD \times BS)] \times 100 / ESD \times TB \quad (2)$$

SD: Skala değeri

BS: Aynı skala değerindeki bitki sayısı

ESD: En yüksek skala değeri

TB: Toplam bitki sayısı

M. phaseolina'nın topraktaki propagül yoğunluğunun belirlenmesi için; kaba unsurlarından ayrılmış ve elenmiş 1 g toprak örneği bir beher içerisinde 100 ml su içine karıştırılarak yaklaşık 10 dakika bekletilmiş ve bir blender yardımıyla 5 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra, önce 150 µm'lik elekten geçirilmiş, elek altı atılarak eleğin üzerindeki materyal su ile yıkanarak 45 µm'lik elekten geçirilmiştir. Eleğin üzerinde kalan materyal yine su ile yıkanarak bir kaptan toplanmış, toplanan bu materyal 100 ml % 0.25'lik sodyum hipoklorit (NaClO) içinde 8 dakika kadar bekletildikten sonra, tekrar su ile yıkanarak NaClO uzaklaştırılmıştır. Bir süre bekletildikten sonra bu süspansiyondan 1 ml alınarak içinde PDA ortamı bulunan petrilere aktarılmış, 24°C ±2'de 7 gün inkübe edildikten sonra mikroskop altında incelenerek *M. phaseolina* kolonileri sayılmıştır (Demir, 1998).

2.3. İstatistiksel analizler

Hem *in vitro*, hem de *in vivo* deneme, tesadüf parselleri deneme planına göre 5 tekerrürlü olarak yürütülmüştür. Çalışmalardan elde edilen tüm verilerin istatistiksel varyans analizleri SPSS (ver. 21) paket programı yardımıyla oneway varyans analizine tabi tutulmuş, uygulamalar arasındaki farklılıklar Duncan Çoklu Karşılaştırma Testine göre karşılaştırılmıştır. *In vitro* koşullarda koloni çaplarından elde edilen veriler PAST paket programında kümeleme analizine tabi tutulmuştur. Ayrıca ABA dozları ve uygulamalara karşılık gelen bağımsız değişkenlerin ısı haritası kümelemesi (ClustVis) yapılmıştır (Metsalu & Vilo, 2015).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. *In vitro* koşullarda *Macrophomina phaseolina*'ya (Mp) en etkili absisik asit (ABA) dozunun belirlenmesi

ABA'nın *in vitro* koşullarda, Mp'nın koloni gelişimine etkisinin araştırıldığı denemede, koloni çapları ekim yapıldıktan sonra 3.,4.,5. ve 6. günlerde ölçülmüş ve elde edilen değerler Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere elde edilen bulgular ve istatistiksel değerlendirmelere göre 5 µM ABA dozunun, diğer dozlar ve kontrole göre Mp'nın gelişimini önleme yönünden en uygun doz olduğu belirlenmiş, özellikle 4, 5 ve 6. günlerde gerçekleştirilen ölçümlerde koloni çapının gelişiminde yarattığı etkinin diğer dozlardan önemli bir farklılık gösterdiği ($p \leq 0.05$) ve kontrole göre Mp'nın gelişimini % 18.64 oranında daha fazla kısıtladığı tespit edilmiştir. Ayrıca 10 ve 20 µM ABA dozlarının kontrol ile aynı grupta olduğu ve bu bağlamda koloni gelişimini azaltmadığı da araştırma bulgularına yansımıştır (Çizelge 1).

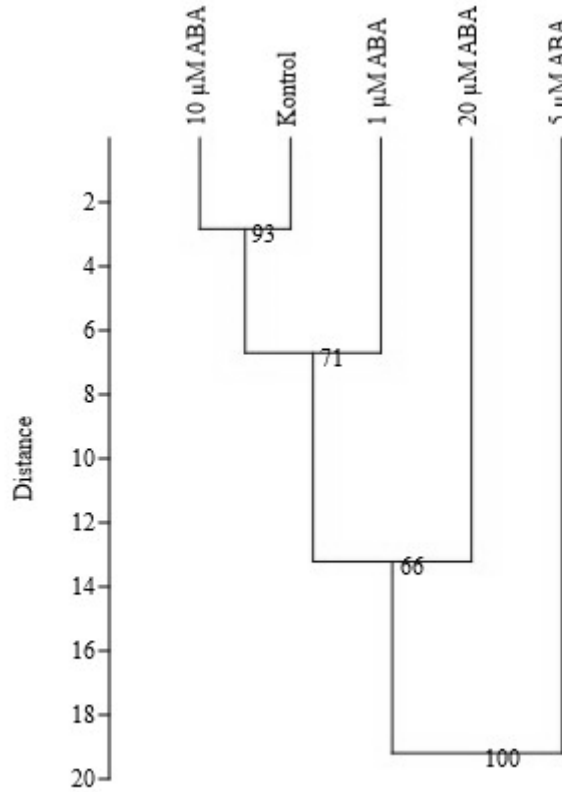
Absisik asitin biyotik etkenlere karşı bitki savunmasındaki etkisi negatif veya pozitif olabilmekte, mekanizmanın kesinlik kazanması için bilimsel çalışmalar süregelmektedir. Bu bağlamda ABA'nın bitki savunma mekanizmasını olumlu etkileyen, biyotik patojenlere karşı bitki gelişmesi ve sağlığında yararlı etki gösterdiğini ifade eden çalışmalar mevcuttur (Bari ve Jones, 2009; Maksimov, 2009; Khedia ve ark., 2020). Mevcut çalışmamızda da nekrotrofik patojen *M. phaseolina*'ya karşı 20 µM ABA uygulaması hariç tüm ABA dozları kontrole göre engelleyici etki göstermişlerdir (Çizelge 1). Hefel (2010), düşük doz ekzojen ABA uygulamasının *Macrophomina phaseolina*'nın hastalık belirtilerinin gelişimini daha çok hızlandırdığını tespit etmiş ve bunun ABA'nın hipersensitive tepkideki (HR) rolü ile ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Bu sonuçlar, çalışmamızın sonuçlarıyla çelişki göstermektedir. Söz konusu farklılığın *in vitro* ve *in vivo* çalışma sonuçlarının her zaman paralellik göstermemesinden kaynaklanmış olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 1. *In vitro*da farklı ABA dozları uygulanmış Mp kültürlerinde farklı günlerdeki koloni çapı gelişimleri

Uygulamalar	Koloni Çapı Gelişimleri (mm)			
	3.Gün $\bar{x} \pm S_{\bar{x}}$	4.Gün $\bar{x} \pm S_{\bar{x}}$	5.Gün $\bar{x} \pm S_{\bar{x}}$	6.Gün $\bar{x} \pm S_{\bar{x}}$
1 μ M ABA	49.98 \pm 1.83 ^{b*}	58.80 \pm 1.57 ^b	69.10 \pm 0.11 ^c	77.68 \pm 0.05 ^a
5 μ M ABA	49.17 \pm 0.94 ^b	55.25 \pm 0.85 ^c	65.59 \pm 0.04 ^d	64.94 \pm 0.03 ^b
10 μ M ABA	53.86 \pm 1.19 ^{ab}	60.41 \pm 0.76 ^{ab}	73.92 \pm 0.09 ^b	78.56 \pm 0.12 ^a
20 μ M ABA	60.68 \pm 1.35 ^a	66.40 \pm 1.52 ^a	79.95 \pm 0.03 ^a	80.91 \pm 0.02 ^a
Kontrol	52.00 \pm 1.71 ^{ab}	62.04 \pm 1.37 ^{ab}	74.51 \pm 0.05 ^b	79.82 \pm 0.06 ^a

*: Aynı sütundaki verilerden aynı harfle gösterilen ortalamalar arasındaki fark önemsizdir (P > 0.05).

Farklı ABA dozları kullanılarak *in vitro* koşullarda geliştirilen Mp kültürlerinden elde edilen koloni çaplarına ait veriler kümeleme analizine tabi tutulmuş ve bir dendogram elde edilmiştir (Şekil 1). Bu dendograma göre 5 μ M ABA dozu tek başına ayrı bir grupta konumlanırken, 0, 1, 10 ve 20 μ M ABA konsantrasyonları ikinci ana grupta yer almıştır. Bu bağlamda varyans analizinde de ortaya konduğu üzere 5 μ M ABA'nın diğer muamele gruplarından farklı olduğu kümeleme analizinde de ortaya çıkmıştır.



Şekil 1. *In vitro* koşullarda geliştirilen Mp kültürleri ile farklı ABA dozları arasındaki ilişkiyi gösteren kümeleme analizine ait dendogram.

3.2. *In vivo* koşullarda ABA'nın farklı dozlarının *Macrophomina phaseolina*'ya ve AMF'ye etkisinin belirlenmesi

In vitro koşullarda *Mp*'ya etkisi belirlenen ABA dozlarının, daha sonra *in vivo* koşullarda, AMF ile birlikte *Mp* inokule edilmiş Gina fasulye çeşidinde fide gelişimi ve hastalığa etkisi test edilmiştir. ABA dozları ve AMF uygulamalarının fide gelişimi ve hastalık şiddetine etkisine ilişkin sonuçlar Çizelge 2 ve Çizelge 3'te verilmiştir.

3.2.1. Fide gelişim kriterleri

In vivo koşullarda da AMF ve *M. phaseolina* uygulaması yapılan fasulye bitkilerine aynı ABA dozları (0, 1, 5, 10 ve 20 μ M) uygulanmıştır. Fide gelişim kriterleri açısından hem ABA dozları hem de uygulamalar arasında farklılıklar belirlenmiştir (Çizelge 2). Bitki gelişim kriterleri açısından genel olarak tüm ABA dozları kontrole göre azalmaya neden olmakla birlikte, Toplam yaprak alanı, SYA ve SKA gibi bazı parametrelerde kontrolden sonraki en yüksek değerlerin 5 μ M ABA dozundan elde edildiği görülmüştür (Çizelge 2). AMF'un tek başına olduğu uygulamada bitki boyunda kontrole göre artış, diğer parametrelerde azalış görülürken, istatistiki olarak fark sadece SYA'da ortaya çıkmıştır (Çizelge 2). AMF'un, negatif kontrol hariç (0 μ M ABA), diğer ABA dozlarıyla birlikte uygulandığı durumda; yaprak sayısı, SYA ve SKA hariç, kendi kontrolleri ve negatif kontrole göre bitki gelişim parametrelerinde olumlu sonuçlar elde edilmiş ve bu olumlu etki en çok 1 ve 10 μ M ABA dozlarında belirlenmiştir.

Çizelge 2 incelendiğinde, *Mp* uygulamasında bitki boyu, gövde çapı ve yaprak sayısı, AMF+*Mp* uygulamasında ise bitki boyu ve SYA özelliklerinde ABA dozları arasındaki farklılıkların önemli olduğu belirlenmiştir ($p \leq 0.05$) (Çizelge 2).

ABA dozlarının uygulamalarda ABA uygulanmamış (0 μ M) bitkilere göre fide gelişim özelliklerindeki değişim oranı incelendiğinde (Şekil 2) bitki boyunda kontrol grubunda tüm dozlarda belirli oranlarda bir artışın olduğu gözlenmiştir. *Mp*'da sadece 5 μ M dozun etkili olduğu, *Mp* ile birlikte AMF varlığında ise 20 μ M dozun pozitif bir artış sağladığı tespit edilmiştir. Gövde çapında 20 μ M ABA'nın tüm uygulamalarda artış yarattığı, yaprak sayısında ise *Mp* uygulamasında ABA dozu ile paralel bir şekilde artış yaşandığı belirlenmiştir. Yaprak sayısına benzer şekilde kontrol grubunda ABA dozları olumsuz etki yaparken, hastalık stresi koşullarında 1, 5 ve 20 μ M dozlarının etkili olduğu göze çarpmıştır. SYA ve SKA özelliklerinde kontrolde ABA etkili olmamış, ancak özellikle 1 ve 20 μ M ABA dozları *Mp* ve AMF+*Mp* uygulamalarında olumlu bir katkı sağlamıştır.

Stres koşulu altında bulunmayan bitki hücrelerinde genelde çok düşük seviyelerde bulunan ABA'nın bitki büyümesi için gerekli olduğu ifade edilmektedir (Jiang & Zhang, 2001; Finkelstein, 2013; Stec ve ark., 2016). Genel olarak büyümeyi engelleyici hormonlar içerisinde yer alan ABA'nın bu etkisinin yüksek dozlarda kendisini gösterdiği ve özellikle düşük doz ABA'nın büyümeyi teşvik edici etkisinin olduğu da belirtilmiştir (Chen ve ark., 2020). Farklı dozların değişen stres şartlarında bitki gelişimine etkilerinin değişkenlik gösterdiği yapılan bazı çalışmalarda da rapor edilmiştir (Yang ve ark., 2007; Çavuşoğlu ve ark., 2009; Başak, 2011; Abdeal, 2015; Zhang ve ark., 2021).

AMF genel olarak bitki gelişimi açısından teşvik edici unsurlara sahiptir (Dehne, 1982; Linderman, 1994). AMF'un bazı baklagil bitkilerinin (fasulye, soya fasulyesi, maş fasulyesi) de gelişimine olumlu etkilerde bulunduğu bazı çalışmalarda teyit edilmiştir (Aysan & Demir, 2009; Erdinç ve ark., 2017; Hindumathi ve ark., 2017; Marquez ve ark., 2018; Spagnoletti ve ark., 2020). Çalışmamızda, AMF'un gerek tek başına gerekse bazı ABA dozları ile birlikte uygulandığı durumlarda bazı fide gelişim parametreleri açısından olumlu etki gösterdiği belirlenmiştir (Çizelge 2). Fide gelişim parametreleri açısından ortaya çıkan farklılık bitki türü ve uygulanan AMF türü veya izolatına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Ullah ve ark., 2023).

Çizelge 2. Fasulyede farklı ABA dozlarında AMF ve *M. phaseolina* uygulamalarının bazı morfolojik gelişim parametrelerine etkileri ($\bar{x} \pm S$)*

ABA Dozları	Uygulamalar	Bitki Boyu (cm)	Gövde çapı (cm)	Yaprak Sayısı (adet bitki ⁻¹)	Toplam Yaprak Alanı (cm ² bitki ⁻¹)	SYA (g bitki ⁻¹)	SKA (g bitki ⁻¹)
0 µM	Kontrol	43.40±3.33	3.71±0.10	52.20±3.32 ^a	531.03±41.96 ^a	16.63±1.45 ^a	1.85±0.16 ^a
	AMF (+)	48.00± 4.21	3.54±0.26	44.40±2.42 ^{ab}	368.60±49.66 ^{ab}	12.16±0.76 ^b	1.40±0.13 ^{ab}
	Mp(+)	49.00±1.84 ^{B*}	3.90±0.11 ^{AB}	29.00±7.65 ^{b B}	204.45±88.65 ^b	8.22±2.17 ^{bc}	0.88±0.24 ^b
	AMF + Mp	57.20± 4.44 ^A	3.46±0.14	28.00±6.68 ^b	228.83±64.37 ^b	6.61±1.18 ^{c A-C}	0.89±0.28 ^b
p ^{ABA0}		0.093	0.270	0.015	0.006	0.001	0.011
1 µM	Kontrol	45.00±3.35	3.59±0.21	35.40±5.42 ^{bc}	387.38±64.47	10.89±2.66	1.29±0.34
	AMF (+)	52.80±1.24	3.75±0.13	48.60±4.04 ^a	461.43±65.30	15.45±1.72	1.76±0.22
	Mp(+)	40.00±3.96 ^C	3.43±0.15 ^B	30.20±2.56 ^{c B}	403.99±90.66	12.26±2.33	1.35±0.32
	AMF + Mp	51.20±5.30 ^{AB}	3.98±0.07	42.80±2.40 ^{ab}	415.17±77.31	9.78±1.17 ^{AB}	0.97±0.17
p ^{ABA1}		0.101	0.100	0.018	0.910	0.269	0.267
5 µM	Kontrol	48.60±4.47 ^{ab**}	4.10±0.17 ^a	43.60±6.19	446.65±56.81	15.55±1.66 ^a	1.68±0.20 ^a
	AMF (+)	40.60±4.15 ^b	3.98±0.22 ^a	41.60±5.70	440.99±97.58	14.13±2.68 ^a	1.41±0.32 ^a
	Mp(+)	57.80± 2.58 ^{a A}	3.40±0.20 ^{bb}	36.00±3.02 ^B	397.59±62.69	10.19±1.46 ^{ab}	1.08±0.20 ^{ab}
	AMF + Mp	42.80± 3.88 ^{b B}	3.36±0.17 ^b	36.80±10.18	229.84±127.65	4.56±1.80 ^{b C}	0.42±0.21 ^b
p ^{ABA5}		0.026	0.024	0.827	0.329	0.005	0.01
10 µM	Kontrol	55.20±3.43	3.91±0.07	44.60±1.29	367.38±50.02 ^{ab}	13.88±0.88 ^a	1.50±0.10 ^a
	AMF (+)	48.80± 3.35	3.94±0.39	46.40±6.76	476.64±90.19 ^a	14.74±2.54 ^a	1.58±0.34 ^a
	Mp(+)	47.00±1.41 ^{BC}	3.63±0.23 ^{AB}	40.20±3.79 ^{AB}	220.99±36.69 ^{bc}	7.39±0.71 ^b	0.75±0.12 ^b
	AMF + Mp	56.40± 2.73 ^A	3.60±0.25	36.20±6.72	156.56±67.35 ^c	5.03±1.56 ^{b BC}	0.62±0.26 ^b
p ^{ABA10}		0.083	0.698	0.520	0.014	0.001	0.016
20 µM	Kontrol	49.20±1.07 ^{bc}	4.14±0.17	45.60±4.68	399.12±24.45	13.00±1.60	1.41±0.19
	AMF (+)	52.20±1.93 ^b	3.78±0.14	35.80±3.43	412.97±117.28	9.84±1.66	0.96±0.25
	Mp(+)	45.20± 1.93 ^{c BC}	4.12±0.18 ^A	53.00±5.28 ^A	436.02±84.68	12.76±1.37	1.46±0.23
	AMF + Mp	58.80± 3.12 ^{a A}	3.64±0.13	40.40±5.14	340.77±88.98	10.31±1.97 ^A	1.12±0.27
p ^{ABA20}		0.003	0.093	0.098	0.878	0.372	0.414
p ^{kontrol}		0.151	0.084	0.177	0.179	0.205	0.393
p ^{AMF}		0.094	0.728	0.387	0.912	0.253	0.301
p ^{Mp}		0.001	0.039	0.015	0.117	0.145	0.194
p ^{AMF+Mp}		0.050	0.119	0.599	0.265	0.049	0.241

*: Büyük harfler her uygulamadaki ABA dozlarının karşılaştırmasını ifade etmektedir.

** : Küçük harfler her ABA dozunda uygulamaların karşılaştırmasını ifade etmektedir.

Aynı harflerle gösterilen rakamlar arasında istatistiki bakımdan fark yoktur ($p \leq 0.05$)



Şekil 2. Fide gelişim özelliklerinde ABA dozlarının, ABA uygulanmamış bitkilere göre uygulamalar bazında % değişim oranları.

3.2.2. AMF ve ABA uygulamalarının *Macrophomina phaseolina*'nın hastalık şiddeti ve toprakta Mp'nın koloni sayısı üzerine etkisi

ABA dozlarında Mp ve AMF+Mp uygulamalarının hastalık şiddeti üzerine etkisi önemsiz bulunurken, Mp koloni sayısında 0 ve 10 μM ABA dozlarında bu uygulamalar arasındaki farkın etkili olduğu saptanmıştır ($p \leq 0.05$) (Çizelge 3). AMF'nin hastalık şiddetini azalttığı görülse de bu azalışın önemli olmadığı gözlenmiştir. Mp koloni sayısında 0 μM ABA dozunda AMF koloni sayısını önemli miktarda azaltırken, 10 μM ABA dozunda tersi bir durum yaşanmıştır. Mp ve AMF+Mp uygulamalarında ABA dozları arasındaki farklılıkların karşılaştırılmasında da hastalık şiddetine ABA dozları etkisiz bulunmuştur (Çizelge 3). Koloni sayısında hem Mp hem de AMF+Mp uygulamasında önemli etkinin olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 3). ABA'nın biyotik stres koşulları altındaki etkinliği abiyotik strese göre daha az bilinmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda hem nekrotrofik hem de biyotrofik patojenlere karşı savunma tepkileri ABA ile ilişkili bulunmakla ve salisilik asit (SA), jasmonik asit (JA) ve etilen (ET) gibi stres hormonları ile interaksiyonları bilinmekle beraber bitki savunmasındaki rolü bu hormonlar kadar anlaşılammıştır (Ton ve ark., 2009; Qi ve ark., 2016). ABA hipersensitiv reaksiyona neden olan ve patojenin yayılmasını önleyen reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimini tetikleyebilmekte (Kawano, 2003), ayrıca kalloz birikiminde artış yoluyla bazı patojenlere karşı direnci artırmaktadır (Ton ve ark., 2009). Maksimov (2009), ABA eksikliği olan bazı mutantların biyotrofik patojenlere karşı yüksek direnç gösterdiğini, ancak nekrotrofik patojenlere karşı direncin azaldığını rapor etmiştir. Benzer şekilde Bari ve Jones (2009), ABA-eksik Arabidopsis mutantların nekrotrofik patojenlere karşı direncinin negatif etkilendiğini ya da ABA sinyalinin bozulması ile birlikte nekrotroflara karşı dayanıklılık seviyesinin yabancı bitkilerden daha iyi olduğunu belirtmiştir. Qi ve ark. (2016) ise buğdayda *Fusarium graminearum*' a karşı eksojen ABA uygulanmasının, duyarlılığı artırdığı yönünde bulgular elde ettiklerini bildirmiştir. Bu çalışmada, 5 μM ABA dozunun kontrole göre hastalık şiddetinde artışa neden olmayan tek doz olması, toprakta Mp propagül sayısında 10 μM ABA dozundan sonra en düşük değere sahip olması ve aralarındaki farkın istatistiki olarak önemli bulunmamasından dolayı, hastalık açısından en uygun ABA dozu, 5 μM olarak belirlenmiştir. Adie ve ark. (2007), eksojen ABA uygulamasının, arabidopsis bitkisinde, *Pythium irregulare* ve *Alternaria brassicicola*' ya, Wiese ve ark. (2004), arpada *Blumeria graminis* f. sp. *hordei*'ye karşı bitki direncine katkıda bulunduğunu bildirmişlerdir. Agarwal ve ark. (2016) ve Kheida ve ark. (2020) ABA'nın bazı bitki ekstraktları ile birlikte kullanıldığında uyarıcı hormonlar salisilik asit (SA) ve absisik asit (ABA)'in maksimum birikim gösterdiklerini ve bu hormonların uyarıcı etkisiyle bitkilerin *M. phaseolina*'ya karşı direnç sağlandığını bildirmişlerdir. Söz konusu bulgular çalışmamızla uyumlu sonuçlardır. Mevcut çalışmamızda 5 μM ABA dışındaki ABA dozlarının hastalık şiddetini artırmıştır. Benzer çalışmalarda bitkilerde daha yüksek ABA seviyelerinin, SA, JA veya etilenin aracılık ettiği sinyali baskılayarak savunma gen ekspresyonunu baskılayabildiğini ve patojenlerin bitki üzerindeki virulensliğini artırdığını belirtmişlerdir (Audenaert ve ark., 2002; Anderson ve ark., 2004; de Torres-Zabala ve ark., 2007). Ayrıca Hefel (2010) de, *Medicago truncatula* A17 bitkilerine eksojen 10 ve 20 μM ABA uygulamasının, *M. phaseolina*'nın hastalık belirtilerinin gelişimini daha çok hızlandırdığını bildirmiştir.

AMF'nin tek başına, ve bütün ABA dozlarıyla uygulanmasında hastalığı azaltıcı etkisi olduğu, en yüksek baskılayıcı etkinin (% 33.34) AMF'nin 10 μM ABA dozuyla uygulamasında ortaya çıktığı; toprakta Mp koloni sayısında ise, AMF'nin, 10 ve 20 μM ABA dozlarında pozitif kontrollerine göre artış, diğer dozlarda azalma yarattığı görülmüştür (Çizelge 3). Konukçu bitki ile simbiyotik ilişki kuran AM fungusu bitkiye penetrasyondan sonra önemli fizyolojik değişikliklere yol açarak, bitkilerin hastalık etmenlerine predispozisyonunu etkilemektedir (Dehne, 1982; Linderman, 1994; Demir & Onoğur, 1999). Önemli bir kök patojeni olan *M. phaseolina*'nın baskılanmasında da AMF'un etkili olduğu birçok çalışmada kanıtlanmıştır (Jalali ve ark., 1990; Zambolim & Schenck, 1983; Demir, 1998; Hindumathi ve ark., 2017; Spagnoletti ve ark., 2017; Spagnoletti ve ark., 2020). İlgili çalışmalar ile mevcut çalışmamızın sonuçları birbirini ile paralellik göstermiş olup, AMF'un tek başına veya etkili ABA dozları ile beraber kullanıldığı durumlarda *M. phaseolina*'nın hastalık şiddetinin minimize ettiği ve bu baskılamada ABA'nın da stimüle edici etkisinin olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3. Fasulyede farklı ABA dozlarında, AMF ve Mp uygulamalarının hastalık ve AMF özelliklerine etkisi

ABA Dozları	Uygulamalar	Hastalık şiddeti (%)	Mp koloni sayısı (Adet/g toprak)	Hastalık baskılama oranları (%)	AMF kök kolonizasyonu (%)	Toprakta AMF propagül sayısı (adet/ 10 g toprak)
0 µM	AMF (+)				5.96±1.16 ^b	19.20±4.22 ^C
	Mp(+)	46.67±8.17***	76.40±14.32 ^{a A}	0.00		
	AMF + Mp	44.44±11.11	36.00±6.96 ^{b B}	4.78	17.11±3.17 ^{a A}	26.20±10.67 ^{BC}
p ^{ABA0}		0.875	0.035		0.011	0.537
1 µM	AMF (+)				6.97±0.60 ^b	37.80±9.92 ^{BC}
	Mp(+)	50.00±9.62	85.00±12.85 ^A	-6.66		
	AMF + Mp	46.67±8.17	71.20±15.45 ^A	6.66	16.82±0.86 ^{a A}	66.60±13.49 ^A
p ^{ABA1}		0.798	0.512		0.000	0.124
5 µM	AMF (+)				6.99±1.46	80.00±8.95 ^{a A}
	Mp(+)	46.67±8.17	55.00±10.49 ^{AB}	0.00		
	AMF + Mp	41.67±8.34	36.00±6.00 ^B	10.71	13.96±4.03 ^{AB}	22.00±5.07 ^{b C}
p ^{ABA5}		0.685	0.154		0.143	0.000
10 µM	AMF (+)				10.98±2.23 ^a	55.00±8.21 ^B
	Mp(+)	50.00±9.62	30.00±7.07 ^{b B}	-6.66		
	AMF + Mp	33.33±0.00	60.00±8.94 ^{a AB}	33.34	3.04±0.37 ^{b C}	54.25±15.34 ^{AB}
p ^{ABA10}		0.089	0.030		0.008	0.965
20 µM	AMF (+)				7.02±1.75	19.00±3.76 ^C
	Mp(+)	53.33±18.26	60.00±16.73 ^{AB}	-12.49		
	AMF + Mp	40.00±14.91	64.00±12.63 ^{AB}	25.00	8.31±0.99 ^{BC}	14.40±2.87 ^C
p ^{ABA20}		0.242	0.853		0.542	0.359
p ^{AMF}					0.213	0.000
p ^{Mp}		0.977	0.050			
p ^{AMF+Mp}		0.698	0.085		0.002	0.007

*: Büyük harfler her uygulamadaki ABA dozlarının karşılaştırmasını ifade etmektedir.

** : Küçük harfler her ABA dozunda uygulamaların karşılaştırmasını ifade etmektedir.

***: Her uygulamadaki ABA dozları ve her ABA dozundaki uygulamalarda hastalık şiddeti arasında istatistiksel fark yoktur.

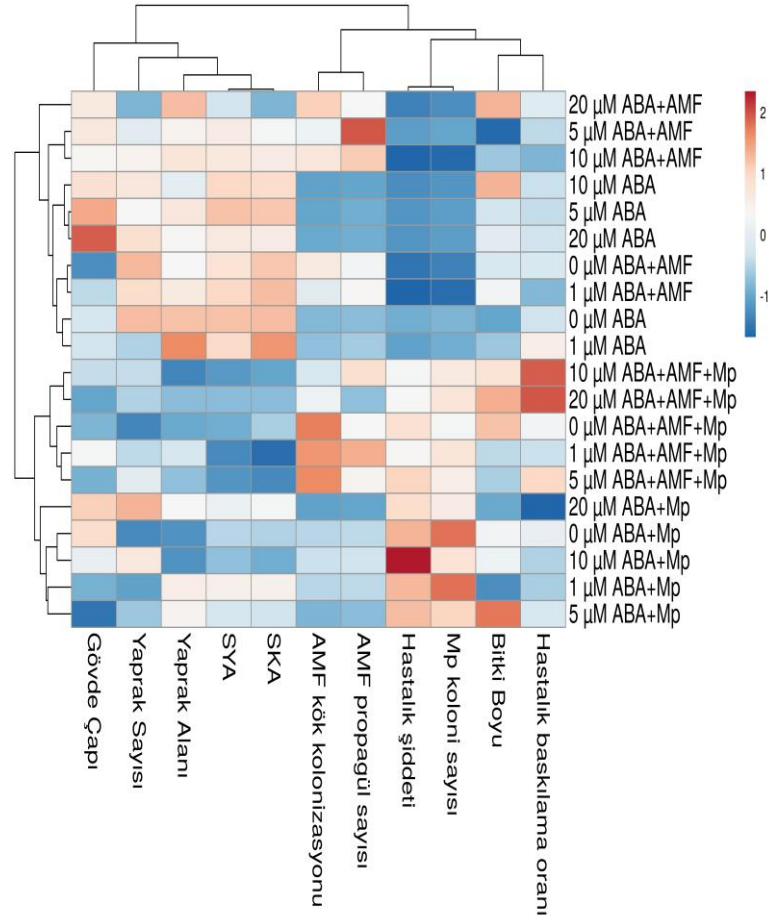
Aynı harflerle gösterilen rakamlar arasında istatistiksel bakımdan fark yoktur (p≤0.05)

3.2.3. ABA ve Mp uygulamalarının AMF'nin kök kolonizasyonu ve topraktaki propagül sayısı üzerine etkisi

AMF kök kolonizasyonu ve AMF propagül sayısı parametrelerinde AMF ve AMF+Mp uygulamaları varyans analizine tabi tutularak çoklu karşılaştırma testi yapılmıştır (Çizelge 3). ABA'nın 0, 1 ve 10 µM dozlarında bu iki uygulamanın AMF kök kolonizasyonuna etkileri önemli bulunurken, AMF propagül sayısında sadece 5 µM ABA dozunda uygulamaların etkili olduğu saptanmıştır (p≤0.05). Bu bağlamda 0 ve 1 µM ABA dozunda hastalık stresi altında AMF kolonizasyonu daha yüksek çıkarken, 10 µM ABA'da sadece AMF uygulamasında kolonizasyon daha yüksek bulunmuştur (Çizelge 3). AMF+Mp uygulamasında ABA dozlarının AMF kök kolonizasyonuna etkileri önemli bulunmuş, toprakta AMF propagül sayısında ise AMF ve AMF+Mp uygulamalarının ikisinde de ABA dozları arasındaki farklılığın önemli olduğu belirlenmiştir (p≤0.05). AMF+Mp uygulamasında ABA konsantrasyonu arttıkça kök kolonizasyonun da azaldığı görülmüştür (Çizelge 3). [Stec ve ark. \(2016\)](#) ABA konsantrasyonu arttıkça AM oluşumunda gerileme olduğunu ve düşük dozlardaki ekzojen ABA uygulamasının AMF kolonizasyonu üzerinde olumlu etkisinin olduğunu bildirirken, [Zhang ve ark. \(2019\)](#) da AMF gelişiminin belli ABA dozlarında teşvik edici olduğunu ifade etmişlerdir.

Çalışmamızda genel olarak patojen (Mp)'nin yer aldığı ve, 10 µM hariç, tüm ABA uygulamalarında (0 µM ABA dahil) AMF'un kök kolonizasyon oranlarının kontrole göre düşüş gösterdiği belirlenmiştir (Çizelge 3). Toprakta AMF spor sayısına bakıldığında ise ABA dozları arttıkça patojenin yer aldığı uygulamalarda kontrole göre bir artış olduğu gözlenmiştir (Çizelge 3). Yapılan çalışmalarda da biyotik ve abiyotik faktörlerin AMF'un gelişim parametrelerine etkisine yönelik farklı sonuçlar elde edilmiş ([Zambolim & Schenck, 1983](#); [Akköprü & Demir, 2005](#); [Turhan & Demir, 2013](#); [Spagnoletti ve ark., 2017](#)) ve AMF'lerin kolonizasyonu ve rizosfer toprağındaki spor yoğunluğunun lokalize oldukları bölgedeki abiyotik ve biyotik stres koşullarına bağlı olduğu ifade edilmiştir ([Akköprü & Demir, 2005](#)).

Çalışmada 5 farklı ABA dozu ile birlikte AMF ve Mp uygulamalarının bitki gelişimi, AMF ve Mp'nın bazı özellikleri ile ilişkilerini ortaya koymak amacıyla kümeleme ısı haritası (cluster heat map) analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Isı haritası, bir veri matrisine ait verilerin hiyerarşik kümeleme yapısıyla beraber ilişkilerini ortaya koyan ve bir olgunun büyüklüğünü göstermek için renk dağılımını kullanan iki boyutlu bir veri görselleştirme analizini ifade etmektedir (Barua ve ark., 2022; Karaman, 2023). Bu bağlamda oluşan iki ayrı kümelemenin olduğu görülmektedir. Satırlarda ABA ve uygulamaların meydana getirdiği dendogramda iki ana kümeleme grubunun meydana geldiği tespit edilmiştir. İlk grupta ABA'nın tek başına veya AMF ile birlikte olduğu uygulamalar yer alırken, ikinci grupta Mp uygulamasının olduğu muamele grupları kümelanmıştır. Sütunları oluşturan ve renk dağılımını belirleyen özelliklerde iki ana grup halinde kümelanmıştır. SYA, SKA, yaprak sayısı ve alanı ile gövde çapı ilk grubu oluştururken, AMF ve hastalık gelişimi ile ilgili özellikler ve bitki boyu ikinci ana grup içerisinde konumlanmıştır. Kırmızı renk yüksek değerleri, mavi renk ise düşük değerleri ifade etmektedir. Renk değişimleri dikkate alındığında özellikle bitki boyu hariç fide gelişimini belirleyen özelliklerde yüksek değerlerin genellikle hastalığın olmadığı ana grupta yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. Fide gelişim özellikleri ile ilgili mavi renk yoğunlaşmasının ise Mp uygulamasını içeren muamele gruplarında görüldüğü tespit edilmiştir. Renk değişimine göre hastalık şiddetinin baskınmasında AMF ile birlikte özellikle 10 ve 20 μM ABA dozlarının daha etkili olduğu gözlenmektedir. Hastalık stresi altında 1 ve 5 μM ABA dozlarının AMF kolonizasyonunu artırabildiği de aynı zamanda görülmektedir.



Şekil 3. ABA dozları ve farklı uygulamalar ile bitki, hastalık ve AMF parametrelerinin hiyerarşik kümeleme modelini ifade eden ısı haritası.

4. Sonuç

Çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında; fasulyede ekonomik boyutta ürün kaybına yol açan kömür çürüklüğü etmeni *Macrophomina phaseolina*'ya karşı AMF ve uygun ABA dozlarının birlikte

kullanılmasının bitki gelişimi ve hastalık baskısını minimize etme bağlamında olumlu sonuçlar verebileceği söylenebilir. Bitkiler ekzojen olarak verilen ABA'nın ya kuraklığa bağlı birikim veya patojen enfeksiyonunda bitkinin direncini etkileyebilmektedir. Bu bağlamda, söz konusu yaklaşımın farklı patosistemler üzerinde ve abiyotik stres faktörlerine karşı da etkisinin olacağı ve elde edilecek sonuçların sürdürülebilir tarım açısından anlamlı olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri koordinasyon Birimi tarafından FDK-2018-6589 No'lu proje olarak desteklenmiştir.

Kaynakça

- Abdealal, K. A. A. (2015). Effect of salicylic acid and abscisic acid on morpho-physiological and anatomical characters of faba bean plants (*Vicia faba*) under drought stress. *Journal of Plant Production*, 6(11), 1771-1788. <http://dx.doi.org/10.21608/jpp.2015.52096>
- Adie, B. A., Pérez-Pérez, J., Pérez-Pérez, M. M., Godoy, M., Sánchez-Serrano, J. J., Schmelz, E. A., & Solano, R. (2007). ABA is an essential signal for plant resistance to pathogens affecting JA biosynthesis and the activation of defenses in Arabidopsis. *Plant Cell*, 19(5), 1665-1681. <https://doi.org/10.1105/tpc.106.048041>
- Agarwal, P., Patel, K., Das, A. K., Ghosh, A., & Agarwal, P. K. (2016). Insights into the role of seaweed *Kappaphycu salvarezii* towards phytohormone signalling and regulating defence responsive genes in *Lycopersicon esculentum*. *Journal of Applied Phycology*, 28, 2529-2537. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0784-1>
- Akköprü, A., & Demir, S. (2005). Biological control of Fusarium wilt in tomato caused by *Fusarium oxysporum* f.sp. lycopersici by AMF *Glomus intraradices* and some rhizobacteria. *Journal of Phytopathology*, 153, 544-550. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2005.01018.x>
- Anderson, J. P., Badruzsafari, E., Schenk, P. M., Manners, J. M., Desmond, O. J., Ehlert, C., ... & Kazan, K. (2004). Antagonistic interaction between abscisic acid and jasmonate-ethylene signaling pathways modulates defense gene expression and disease resistance in Arabidopsis. *The Plant Cell*, 16, 3460-3479. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.025833>
- Audenaert, K., De Meyer, G. B., & Höfte, M. M. (2002). Abscisic acid determines basal susceptibility of tomato to *Botrytis cinerea* and suppresses salicylic acid-dependent signaling mechanisms. *Plant Physiology*, 128(2), 491-501. <https://doi.org/10.1104/pp.010605>
- Aysan, E., & Demir, S. (2009). Using Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Rhizobium leguminosarum biovar phaseoli against *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Pathology Journal*, 8(2), 74-78. <https://doi.org/10.3923/ppj.2009.74.78>
- Bari, R., & Jones, J. D. (2009). Role of plant hormones in plant defence responses. *Plant Molecular Biology*, 69(4), 473-488. <https://doi.org/10.1007/s11103-008-9435-0>
- Barua, H., Saha, S. R., Ivy, N. A., Rasul, G., & Islam, A. A. (2022). Genetic divergence of guava (*Psidium guajava* L.) genotypes in Bangladesh: Guava Genotypes in Bangladesh. *SAARC Journal of Agriculture*, 20(1), 15-28. <http://dx.doi.org/10.3329/sja.v20i1.60618>
- Başak, H. (2011). *Absisik asit (ABA) uygulamalarının domates (Lycopersicon esculentum mill.) fidelerinde bazı fizyolojik ve morfolojik özellikler ile kök gelişim değerlerine etkisi*. (Doktora tezi), Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Blair, M. W., Diaz, L. M., Buendia, H. F., & Duque, M. C. (2009). Genetic diversity, seed size associations and population structure of a core collection of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 119, 955-972. <https://doi.org/10.1007/s00122-009-1064-8>
- Chen, K., Li, G. J., Bressan, R. A., Song, C. P., Zhu, J. K., & Zhao, Y. (2020). Abscisic acid dynamics, signaling, and functions in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 62(1), 25-54. <https://doi.org/10.1111/jipb.12899>
- CIAT. (1983). *Bean program annual report*. CIAT, Cali, Colombia. 288 pp.

- Çavuşoğlu, K., Kılıç, S., & Kabar, K. (2009). Effects of plant growth regulators on the root, stem and leaf anatomies of radish seedlings grown in abscisic acid medium. *Advances in Food Sciences*, 31(1), 34-40.
- de Torres-Zabala, M., Truman, W., Bennett, M. H., Lafforgue, G., Mansfield, J. W., & Rodriguez Egea, P., ... & Grant, M. (2007). *Pseudomonas syringae* pv. tomato arabidopsis abscisic acid signalling pathway to cause disease. *Embo Journal*, 26, 1434-43. <https://doi.org/10.1038/sj.emboj.7601575>
- Dehne, H. W. (1982). Interaction between vesicular arbuscular mycorrhizal fungi and plant pathogens. *Phytopathology*, 72, 1115-1119.
- Demir, S. (1998). *Bazı kültür bitkilerinde vesiküler-arbusküler mikoriza (VAM) oluşumu ve bunun bitki gelişimi ve dayanıklılıktaki rolü üzerinde araştırmalar*. (Doktora Tezi), Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Demir, S., & Onoğur, E. (1999). Bitkilerde vesiküler arbusküler mikoriza oluşumunun bitki besleme ve bitki korumadaki önemi. *Anadolu Journal of Agriculture*, 9(2), 12-31.
- Dhingra, O. D., Sinclair, J. B. (1978). *Biology and pathology of Macrophomina phaseolina*. Universidade Federal De Viosa, Minas Gerais.
- Erdinç, Ç., Demire Durak E., Ekincialp A., Şensoy, S., & Demir, S. (2017). Variations in response of determinate common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes to arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 41, 1-9. <http://dx.doi.org/10.3906/tar-1609-68>
- FAOSTAT, 2022. Faostat–food and agriculture organization of the United Nations. Erişim Tarihi: 28.02.2023. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Finkelstein, R. (2013). Abscisic acid synthesis and response. *The Arabidopsis book/American Society of Plant Biologists*, 11. <http://dx.doi.org/10.1199/tab.0166>
- Gerdemann, J. W., & Nicholson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from the soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(2), 235-244. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)
- Giovanetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, 84, 489-500.
- Gupta, G. K., Sharma, S. K., & Ramteke, R. (2012). Biology, epidemiology and management of the pathogenic fungus *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid. with special reference to charcoal rot of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). *Journal of Phytopathology*, 160(4), 167-180. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2012.01884.x>
- Hefel, A. J. (2010). *Molecular interactions between the pathogenic fungus Macrophomina phaseolina and its plant host Medicago truncatula*. (Master Thesis), Graduate School of Wichita State University.
- Hindumathi, A., Reddy, B. N., Sabitha Rani, A., & Narsimha Reddy, A. (2017). *Associative effect of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium on plant growth and biological control of charcoal rot in green gram [Vigna radiata L. (Wilczek)]* (Bhukya B., and Tangutur, A.D.). Apple Academic Press.
- Iqbal, U., Mukhtar, T., & Iqbal, S.M. (2014). In vitro and in vivo evaluation of antifungal activities of some antagonistic plants against charcoal rot causing fungus *Macrophomina phaseolina*. *Pakistan Journal of Agricultural Science*, 51(3), 689-694.
- Jalali, B. L., Chhabra, M. L., & Singh, R. P. (1990). Interaction between vesicular-arbuscular mycorrhizal endophyte and *Macrophomina phaseolina* in mung bean. *Indian Phytopathology*, 43(4), 527-530.
- Jiang M., & Zhang, J. (2001). Effect of abscisic acid on active oxygen species, antioxidative defence system and oxidative damage in leaves of maize seedlings. *Plant and Cell Physiology*, 42(11), 1265-1273. <https://doi.org/10.1093/pcp/pce162>
- Karaman, R. (2023). Fasulye genotiplerinde çok değişkenli istatistiksel yöntemler ile tohum fiziksel özelliklerinin karakterizasyonu. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 60(3), 451-464. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.1258084>
- Kawano, T. (2003). Roles of the reactive oxygen species-generating peroxidase reactions in plant defense and growth induction. *Plant Cell Reports*, 21, 829-837. <https://doi.org/10.1007/s00299-003-0591-z>

- Khan, S. N. (2007). *Macrophomina phaseolina* as causal agent for charcoal rot of sunflower. *Mycopathologia*, 5(2), 111-118.
- Khedra, J., Danghariya, M., Nakum, A.K., Agarwal, P., Panda, A., Parida, A.K., ... & Agarwal, P.K. (2020). *Sargassum* seaweed extract enhances *Macrophomina phaseolina* resistance in tomato by regulating phytohormones and antioxidative activity. *Journal of Applied Physiology*, 32, 4373-4384. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02263-5>
- Koide, R. T. (2006). Nutrient supply, nutrient demand and plant response to mycorrhizal infection. *New Phytol*, 117(3), 365-386. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1991.tb00001.x>
- Linderman, R. G. (1994). Role of VAM fungi in biocontrol. *Mycorrhizae and Plant Health*, 1-17.
- Ma, J., Hill, C. B., & Hartman, G.L. (2010). Production of *Macrophomina phaseolina* Conidia by multiple soybean isolates in culture. *Plant Disease*, 94(9), 1088-1092. <https://doi.org/10.1094/pdis-94-9-1088>
- Maksimov, I.V. (2009). Abscisic acid in the plants-pathogen interaction. *Russian Journal of Plant Physiology*, 56(6), 824-835. <http://dx.doi.org/10.1134/S102144370906003X>
- Marquez, N., Giachero, M. L., Gallou, A., Debat, H. J., Cranenbrouck, S., Di Rienzo, J. A., ... & Declerck, S. (2018). Transcriptional changes in mycorrhizal and nonmycorrhizal soybean plants upon infection with the fungal pathogen *Macrophomina phaseolina*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 31(8), 842-855. <https://doi.org/10.1094/MPMI-11-17-0282-R>
- Marquez, N., Giachero, M.L., Declerck, S., & Ducasse, D.A. (2021). *Macrophomina phaseolina*: General characteristics of pathogenicity and methods of control. *Frontiers in Plant Science*, 12, 634397. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634397>
- Martínez-Medina, A., Roldán, A., Albacete, A., & Pascual, J.A. (2011). The interaction with arbuscular mycorrhizal fungi or *Trichoderma harzianum* alters the shoot hormonal profile in melon plants. *Phytochemistry*, 72, 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2010.11.008>
- Melotto, M., Underwood, W., Koczan, J., Nomura, K., & He, S.Y. (2006). Plant stomata function innate immunity against bacterial invasion. *Cell*, 126, 969-80. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2006.06.054>
- Mengistu, A., Smith, J. R., Ray, C. D., & Bellaloui, N. (2011). Seasonal progress of charcoal rot and its impact on soybean productivity. *Plant Disease*, 95(9), 1159-1166. <https://doi.org/10.1094/pdis-02-11-0100>
- Mengistu, A., Ray, J. D., Smith, J. R., Arelli, P. R., Bellaloui, N., Chen, P., ... & Boykin, D. (2018). Effect of charcoal rot on selected putative drought tolerant soybean genotypes and yield. *Crop Protection*, 105, 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.11.012>
- Metsalu, T., & Vilo, J. (2015). ClustVis: A web tool for visualizing clustering of multivariate data using Principal Component Analysis and heatmap. *Nucleic Acids Research*, 43, 566-570. <https://doi.org/10.1093/nar/gkv468>
- Mihail, J. D. (1992). *Macrophomina*. *Methods for Research on Soilborne Phytopathogenic Fungi*, 134-136.
- Mohr, P. G., & Cahill, D. M. (2003). Abscisic acid influences the susceptibility of *Arabidopsis thaliana* to *Pseudomonas syringae* pv. tomato and *Peronospora parasitica*. *Functional Plant Biology*, 30(4), 461-469. <https://doi.org/10.1071/fp02231>
- Ndiaye, M., Termorshuizen, A.J., Van Bruggen, A. H. C. (2007). Combine deffects of solarization and organic amendment on charcoal rot caused by *Macrophomina phaseolina* in the Sahel. *Phytoparasitica*, 35(4), 392-400. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02980703>
- Oyewole, B.O., Olawuyi, O.J., Odebode, A.C., & Abiala, M.A. (2017). Influence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on drought tolerance and charcoal rot disease of cowpea. *Biotechnology Reports*, 14, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.02.004>
- Partridge, D. (2003). *Macrophomina phaseolina*. Erişim Tarihi: 16.09.2017. http://www.cals.ncsu.edu/course/pp728/Macrophomina/macrophominia_phaseolina.
- Pastor-Corrales, M.A., & Abawi, G.S. (1988). Reactions of selected bean accessions to infection by *Macrophomina phaseolina*. *Plant Disease*, 72, 39-41.
- Phillips, J.M., & Hayman, D.S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55, 158- 161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)

- Qi, P. F., Balcerzak, M., Rocheleau, H., Leung, W., Wei, Y. M., Zheng, Y. L., & Ouellet, T. (2016). Jasmonic acid and abscisic acid play important roles in host–pathogen interaction between *Fusarium graminearum* and wheat during the early stages of fusarium head blight. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 93, 39–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmpp.2015.12.004>
- Singh, R. J., Chung, G. H., & Nelson, R. L. (2007). Landmark research in Legumes. *Genome*, 50, 525–537. <https://doi.org/10.1139/g07-037>
- Soliman, K.M., & Badeaa, R.I., (2002). Effect of oil extract from some medicinal plants on different mycotoxigenic fungi. *Food and Chemical Toxicology*, 40(11), 1669–1675. [https://doi.org/10.1016/s0278-6915\(02\)00120-5](https://doi.org/10.1016/s0278-6915(02)00120-5)
- Spagnoletti, F., Carmona, M. E. Tobar Gómez, N. E. T., Chiocchio, V. S., & Lavado. R. S. (2017). Arbuscular mycorrhiza reduces the negative effects of *M. phaseolina* on soybean plants in arsenic-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*, 121, 41–47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.019>
- Spagnoletti, F. N., Cornero, M., Chiocchio, V., Lavado, R. S., & Roberts, I. N. (2020). Arbuscular mycorrhiza protects soybean plants against *Macrophomina phaseolina* even under nitrogen fertilization. *European Journal of Plant Pathology*, 156, 839–849. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-01934-w>
- Stec, N., Banasiak, J., & Jasinski, M. (2016). Abscisic acid an overlooked player in plant-microbe symbioses formation?. *Acta Biochemica Polonica*, 63, 53–58. https://doi.org/10.18388/abp.2015_1210
- Ton, J., Flors, V., & Mauch-Mani, B. (2009). The multifaceted role of ABA in disease resistance. *Trends in Plant Science*, 14(6), 310–317. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.03.006>
- Turhan, P., & Demir, S. (2013). Çilekte siyah kök çürüklüğü (*Rhizoctonia solani* Kühn.) hastalığına karşı bazı biyolojik mücadele elemanlarının etkileri. *Türkiye Biyolojik Mücadele Dergisi*, 4(2), 125–140.
- Ullah, F., Ullah, H., Ishfaq, M., Khan, R., Gul, S.L., Gulfraz, A., ... & Zhifang, L. (2023). Genotypic variation of tomato to AMF inoculation in improving growth, nutrient uptake, yield, and photosynthetic activity. *Symbiosis*, 9(12), 1–14. <http://dx.doi.org/10.1007/s13199-023-00961-5>
- Wiese, J., Kranz, T., & Schubert, S. (2004). Induction of pathogen resistance in barley by abiotic stress. *Plant Biology (Stuttg)*, 6, 529–536. <https://doi.org/10.1055/s-2004-821176>
- Wu, M., Yan, Y., Wang, Y., Mao, Q., Fu, Y., Peng, X., ... & Ahammed, G.J. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi for vegetable (VT) enhance resistance to *Rhizoctonia solani* in watermelon by alleviating oxidative stress. *Biological Control*, 152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104433>
- Yang, L., Yu, C. L., Shi, F., Wei, Y. Q., Wang, C. C., Hu, H. T., & Cheng, C. G. (2007). Effects of abscisic acid on growth and dehydration tolerance of *Cynanchum komarovii* seedlings. *Plant Growth Regulation*, 51, 177–184. <https://doi.org/10.1007/s10725-006-9160-0>
- Zambolim L., & Schenck, N. C. (1983). Reduction of the effects of pathogenic, root-infecting fungi on soybean by the mycorrhizal fungus, *Glomus mossea*. *Phytopathology*, 73, 1402–1405. <http://dx.doi.org/10.1094/Phyto-73-1402>
- Zhang, X. H., Liu, Y. H., Liu, B. W., Liu, Q., Wen, S. Y., Ao, B., ... & Xu, Y. F. (2019). Arbuscular mycorrhiza fungus improved growth, antioxidant defense and endogenous hormones in tall fescue under low-light stress. *South African Journal of Botany*, 127, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.08.032>
- Zhang, X., Tahir, M. M., Li, S., Tang, T., Mao, J., Li, K., ... & Zhang, D. (2021). Effect of exogenous abscisic acid (ABA) on the morphology, phytohormones, and related gene expression of developing lateral roots in ‘Qingzhen 1’ apple plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 148, 23–34. <https://doi.org/10.1007/s11240-021-02157-5>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Zeytin Atığı Karasuyun Nane (*Mentha piperita* L.) ve Kuzukulağı (*Rumex acetosella* L.) Bitkilerinde Bazı Morfolojik Özellikler ve Mineral Madde İçeriğine Etkisi †

İsmail GÜL^{*1}, Yasemin SALİHOĞLU², Faika YARALI KARAKAN³

¹Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, 79000, Kilis, Türkiye

²Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bahçe Bitkileri Ana Bilim Dalı, 79000, Kilis, Türkiye

³Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 79000, Kilis, Türkiye

İsmail GÜL, ORCID No: 0000-0003-0558-9240, Yasemin SALİHOĞLU, ORCID No: 0000-0002-9540-6921, Faika YARALI KARAKAN, ORCID No: 0000-0002-2176-8663

*Sorumlu yazar e-posta: isgul1971@hotmail.com

Makale Bilgileri

Geliş: 15.01.2024

Kabul: 27.05.2024

Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1420003

Anahtar Kelimeler

Karasu,
Kuzukulağı,
Nane,
Prina,
Solucan gübresi

Öz: Karasu, zeytinyağı eldesi aşamasında ortaya çıkan, birçok toksik ve fenolik bileşikler içeren bir zeytin atığıdır. İçerdiği yağlar ve zararlı bileşikler nedeniyle toprağa bulaştırılması tehlikelidir. Ancak, solucan gübresi ve prina gibi organik materyallerle birleştirilerek yararlı bir kompost gübreye dönüştürülebilir ve birçok fayda sağlayabilir. Bu amaçla, araştırmada karasuya ilave edilen prina ve solucan gübresi uygulamalarının nane ve kuzukulağı bitkilerinin bazı morfolojik özellikleri ile mineral madde içeriklerine etkisi incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre nanede en yüksek bitki boyu (77.70 cm) KS₁, en yüksek bitki yaş ağırlığı (10.75 g/bitki) KP₁, en yüksek kök yaş ağırlığı (11.81 g/bitki) KS₄ uygulamasından; kuzukulağı bitkilerinde ise en yüksek bitki boyu (18.67 cm) KS₄, en yüksek bitki yaş ağırlığı (12.89 g/bitki) S₁, en yüksek kök yaş ağırlığı (0.98 g/bitki) KS₂ uygulamasından elde edilmiştir. Yapılan uygulamalar nane ve kuzukulağının mineral madde içeriği üzerine de etki etmiş, istatistiksel olarak nanede en yüksek mineral madde değerleri P₁ uygulamasından, kuzukulağında ise en yüksek azot, magnezyum ve mangan değerleri S₁, en yüksek demir, sodyum, çinko ve bakır değerleri KS₂ uygulamasından elde edilirken; en yüksek magnezyum ve kalsiyum değerleri ise S₁ ve KS₂ uygulamalarından elde edilmiştir. Araştırma sonuçları, zeytin karasuyu ile birlikte uygulanan prina ve solucan gübresinin karasuyun olumsuz etkilerini azaltmakta kullanılabileceğini ortaya çıkartmıştır.

The Effect of Olive Mill Wastewater on Some Morphological Characteristics and Mineral Content of Mint (*Mentha piperita* L.) and Sorrel (*Rumex acetosella* L.)

Article Info

Received: 15.01.2024

Accepted: 27.05.2024

Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1420003

Abstract: Olive mill wastewater (OMW) is an olive waste produced during olive oil extraction that contains many toxic and phenolic compounds. Contamination of soil is dangerous due to the oils and harmful compounds it contains. However, by combining it with organic materials such as vermicompost and pomace, it can be converted into a useful compost fertilizer that offers many benefits. In this study, the effects of adding pomace and vermicompost to OMW on some morphological characteristics and mineral contents of mint and sorrel plants were investigated. According to the results, the highest plant height (77.70 cm) at KS₁, the highest plant weight (10.75 g/plant) at KP₁ and the highest root weight (11.81 g/plant) at KS₄ were

† Bu makale ikinci yazara ait yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Keywords

Mint,
Pomace,
Sorrel,
Vermicompost,
Wastewater

obtained in mint plants. The highest plant height (18.67 cm) was achieved with KS₄, the highest plant weight (12.89 g/plant) with S₁ and the highest root weight (0.98 g/plant) with KS₂ treatment in sorrel plants. The treatments also affected the mineral content of mint and sorrel plants. The highest mineral content values other than iron and phosphorus in mint were obtained from P₁ treatment statistically. In sorrel, the highest nitrogen, potassium and manganese values were obtained from S₁ treatment, the highest iron, sodium, zinc and copper values were obtained from KS₂ treatment, while the highest magnesium and calcium values were obtained from S₁ and KS₂ treatments were received. The results of the study showed that pomace and vermicompost applied along with OMW reduced the negative effects of OMW.

1. Giriş

Dünyada zeytin üretimi daha çok İspanya, İtalya, Tunus, Yunanistan, Türkiye, Fas ve Portekiz gibi Akdeniz ülkelerinde yapılmaktadır. Zeytinin iklim isteklerinin karşılanabildiği bu ülkeler dünya zeytin ağaç varlığının yaklaşık %72'ne sahiptir (FAO, 2023). Ülkemizde zeytin üretiminin en fazla yapıldığı iller Aydın, İzmir, Muğla, Balıkesir, Manisa, Hatay, Kilis ve Çanakkale'dir. Ülkemizde zeytin ağaçlarının varlığı gittikçe artmakta, toplam 9.030.611 da alanda 167.544.963 adet ağaç ile 490.000 ton sofralık, 1.030.000 ton yağlık zeytin üretimi yapılmaktadır (TÜİK, 2023). Ülkemizde zeytinyağı üretiminin artmasına paralel olarak zeytinyağının işlenmesi sırasında ortaya çıkan organik yan ürünler olan prina ve karasu miktarları da artış göstermektedir. Bu ürünlerden prina, ikinci bir işlemeden sonra gıda, endüstri ve enerji sektörlerinde hammadde olarak kullanılmakta, diğer yan ürün olan karasu ise henüz ekonomik anlamda değerlendirilememektedir. Bunun yanı sıra, karasu önemli bir çevresel sorun olarak karşımıza çıkmakta ve toprağa direk verilmemesi gereken birçok yağ ve toksik bileşikler içermektedir (Yıldırım & Tunaloğlu, 2016). Prina, toprak karbon içeriğini ve agrega stabilitesini arttırmak için önemli bir kaynak olarak kullanılabilir de, toprağa doğrudan uygulanması bazı dezavantajlara neden olabilmektedir. Çevreye karbon (C) arzı prina ile arttığından, büyük miktarda azot (N) immobilizasyonu meydana gelebilmekte ve bu durum da bitkiler için gerekli olan N alımı üzerinde olumsuz etki gösterebilmektedir. Bu nedenle prina ile birlikte uygun bir azot kaynağının kullanılarak kompost yapılması önem taşımaktadır.

Solucan gübresi, dünyadaki yaygın ismi ile "vermicompost", kırmızı Kaliforniya solucanı adıyla bilinen *Lumbricus rubellis* ve *Eisenia spp.* toprak solucanı türlerinin organik olarak yetiştirilmiş büyükbaş hayvanların dışkıları ve organik bitkisel materyallerin fiziksel ve kimyasal yapılarını sindirim sistemlerinden geçirerek değiştirmeleri temeline dayanarak ürettikleri bir toprak düzenleyici ve bitki besleme materyalidir (Edwards & Arancon, 2022). Vermikompost yavaş salımlı bir özelliğe sahip olması ve kullanıldığı topraklarda fiziksel, kimyasal, biyolojik ve mikrobiyolojik iyileşmeler sağlaması sebebiyle güvenilir organik bir gübredir (Bellitürk, 2016).

Uçucu yağının değerli olması nedeniyle *Mentha* türlerinin birçok ülkede ticari olarak tarımı yapılmaktadır. Ülkemizde ise eskiden beri bahçelerde, evlerin önünde ve tarlalarda yetiştirilen nane bitkisi tıbbi açıdan spazm ve gaz giderici, serinletici, uyarıcı ve diüretik etkileri nedeniyle, baharat ve bitki çayları şeklinde de çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Nane yağı ilaç, gıda ve kozmetik sanayiinde geniş bir uygulama alanı olan mentolün en zengin doğal kaynağıdır (Baytop, 1984).

Polygonaceae familyasında yer alan kuzukulağı (*Rumex acetosella* L.), sebze olarak değerlendirilmesinin yanı sıra, sahip olduğu antiradikal ve antimikrobiyal özellikler sayesinde halk arasında ateş düşürücü, idrar söktürücü, kan temizleyici, yanık ve iltihap iyileştirici olarak da kullanılmaktadır (Keser ve ark., 2022). Dolayısıyla, kuzukulağı gibi kurutulmuş da kullanılan sebzeler artık sadece beslenmek ve öğün oluşturmak amacıyla değil, doğal yaşayabilmek için arındırıcı ve tedavi edici, hastalıklara karşı koruyucu olarak da tüketilmektedir (Demirtaş, 2019).

Bu çalışmada zeytinyağı üretiminde atık madde olarak ortaya çıkan, toprak ve bitki üzerine toksik etkisi olduğu bilinen karasuyun tarımda kullanım olanakları araştırılmıştır. Bu amaçla karasuyun olumsuz etkilerinin azaltılmasında zeytin prinası ve solucan gübresinin etkisi, nane ve kuzukulağı bitkilerinin bazı morfolojik özellikleri ve mineral madde içerikleri üzerinden değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Araştırmada bitkisel materyal olarak nane (*Mentha piperita* L.) ve kuzukulağı (*Rumex acetosella* L.) kullanılmıştır. Nane ve kuzukulağı tohumları 02.03.2022 tarihinde Kilis 7 Aralık Üniversitesi Ziraat Fakültesi'ne ait araştırma serasında torfla doldurulmuş viyollere ekilmiştir. Elde edilen fideler uygulamaların gerçekleştirilmesi amacıyla 04.04.2022 tarihinde torf ile doldurulmuş 3'er litrelik saksılara, her saksıda üç bitki olacak şekilde dikilmiş ve Çizelge 1'de belirtilen uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Kullanılan karasu ve pirina numuneleri Kilis ilinde faaliyet gösteren zeytinyağı fabrikalarından temin edilmiştir. Uygulamaların ardından üç aylık bitkilerde 04.07.2022 tarihinde hasat yapılarak ölçüm ve analizler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Araştırmada kullanılan nane ve kuzukulağı bitkilerine yapılan uygulamalar

Kontrol	Karasu	Solucan gübresi	Prina	Karasu+ Solucan gübresi	Karasu+ Prina
Kontrol (Torf)	K ₁ : 5 ton/da karasu K ₂ : 10 ton/da karasu	S ₁ : 2 ton/da solucan gübresi	P ₁ : 1 ton/da prina	KS ₁ : 5 ton/da karasu+ 1 ton/da solucan gübresi KS ₂ : 5 ton/da karasu+ 2 ton/da solucan gübresi KS ₃ : 10 ton/da karasu+ 1 ton/da solucan gübresi KS ₄ : 10 ton/da karasu+ 2 ton/da solucan gübresi	KP ₁ : 5 ton/da karasu+ 1 ton/da prina KP ₂ : 10 ton/da karasu+ 1 ton/da prina

2.2. Yöntem

Zeytin karasuyu uygulamaların nane ve kuzukulağı bitkilerinin bazı morfolojik özellikleri üzerine etkisini belirlemek amacıyla bitki boyu (cm), bitki yaş ağırlığı (g/bitki), bitki kuru ağırlığı (g/bitki), kök yaş ağırlığı (g/bitki) ve kök kuru ağırlığı (g/bitki) değerleri ölçülmüştür. Uygulamaların bitkilerde mineral madde içeriği üzerine etkisini belirlemek amacıyla; Kalsiyum (Ca), Magnezyum (Mg), Demir (Fe), Manganez (Mn), Çinko (Zn), Bakır (Cu) analizleri Atomik Absorpsiyon Spektrometresi (AAS, Perkin Elmer 1100B, Waltham, MA, ABD); Azot (N), analizleri Kjeldhal yöntemi ile Buchi cihazında; Fosfor (P) analizleri spektrofotometre; Potasyum (K) analizleri ise Alev Fotometresi (Sherwood Model 410, Cambridge, UK) ile ölçülmüştür. Bu amaçla alınan bitki örnekleri 72 °C'de basınçlı hava fırınında kurutulmuş ve kurutulan örneklerden 0.5 g alınarak mikro dalga fırında 200W güç altında 30 dakika yakılmıştır. Yakılan örnekler 125 mm çapında 42 Whatman filtre kâğıtlarından süzülerek 50 ml'lik plastik tüplere alınmış, son hacim 25 ml olacak şekilde saf su eklenerek seyreltme yapılmıştır.

2.3. İstatistiksel analiz

Bitki boyu, bitki yaş ağırlığı, bitki kuru ağırlığı, kök yaş ağırlığı ve kök kuru ağırlığı ölçümleri ile mineral madde analizlerinden elde edilen bulgular JMP pro version 14 (SAS Institute, NC, USA) istatistik programı ile varyans analizi yapılarak değerlendirilmiştir. Araştırma tesadüf parselleri deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak kurulmuştur. Ortalamalar arasındaki fark 0.05 önemlilik derecesinde Tukey testi ile karşılaştırılmıştır. Morfolojik parametreler ile mineral maddeler arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla korelasyon analizi yapılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Zeytin karasuyunun nanede bazı morfolojik özellikler ve mineral madde içeriğine etkisi

Zeytin karasuyu uygulamalarının nanenin bazı morfolojik özellikleri üzerine etkisi Çizelge 2'de verilmiştir. Uygulamalar arasında bitki boyu 55.00 ile 77.70 cm arasında değişmiş ve en yüksek bitki boyu KS₁ (5 ton/da karasu+1 ton/da solucan gübresi) uygulamasından elde edilmiştir. En yüksek bitki yaş ağırlığı değeri (10.75 g/bitki) KP₁ (5 ton/da karasu + 1 ton/da prina), en yüksek kök yaş ağırlığı değeri (11.81 g/bitki) ve kök kuru ağırlığı değeri (3.44 g/bitki) KS₄ (10 ton/da karasu + 2 ton/da solucan

gübre), en yüksek kök kuru ağırlığı değeri (3.44 g/bitki) KS₄ (10 ton/da karasu + 2 ton/da solucan gübresi) uygulamasından elde edilmiştir. Uygulamalar arasında bitki kuru ağırlığı değerleri bakımından istatistiki bir fark bulunmamıştır.

Çizelge 2. Zeytin karasuyu uygulamalarının nanede bitkisinde bazı morfolojik özellikler üzerine etkisi

Uygulamalar	Bitki boyu (cm)	Bitki yaş ağırlığı (g/bitki)	Kök yaş ağırlığı (g/bitki)	Bitki kuru ağırlığı (g/bitki)	Kök kuru ağırlığı (g/bitki)
Kontrol	63.30a	6.37ab	9.99ab	1.15a	0.56b
K ₁	76.00a	5.26b	3.02b	0.89a	0.56b
K ₂	55.00b	6.53ab	6.52ab	1.15a	0.92b
KS ₁	77.70a	9.85ab	9.12ab	2.19a	2.24ab
KS ₂	59.00ab	7.90ab	7.77ab	1.46a	1.47ab
KS ₃	76.50a	10.48a	11.69a	2.21a	3.38a
KS ₄	74.00ab	7.52ab	11.81a	1.58a	3.44a
S ₁	73.30ab	8.02ab	11.80a	1.67a	2.00ab
KP ₁	70.30ab	10.75a	8.00ab	1.92a	1.62ab
KP ₂	61.30ab	7.56ab	9.82ab	1.10a	2.01ab
P ₁	68,30ab	7.32ab	9.94ab	1.95a	2.13ab
LSD %5	18.18	4.39	6.28	1.31	1.73

P<0.05, Farklı harflerle gösterilen değerler birbirinden farklıdır.

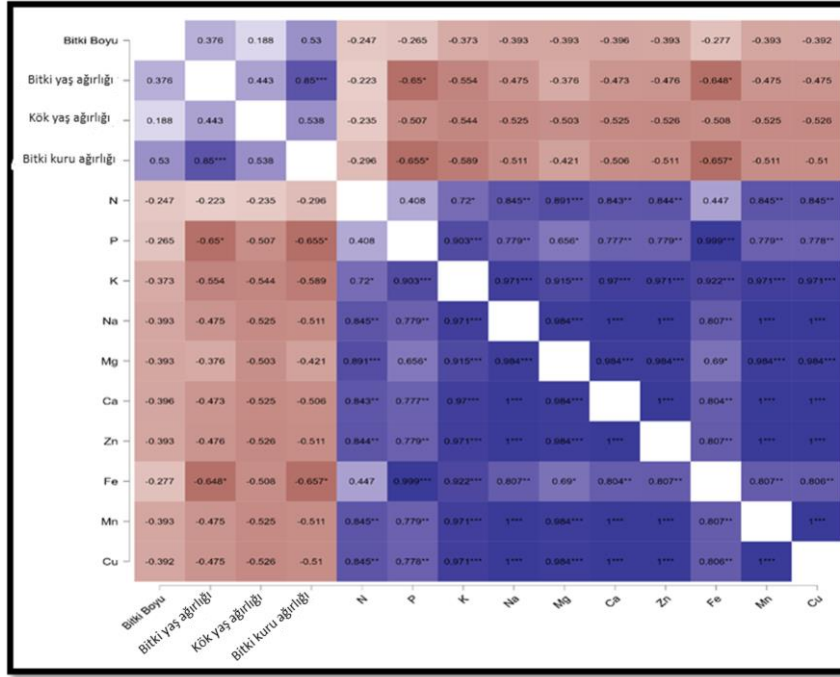
Zeytin karasuyu uygulamalarının nanede mineral madde içeriğine etkisi Çizelge 3'de verilmiştir. Çizelge 3 incelendiğinde, en yüksek azot değerinin (%0.074) P₁ (1 ton/da prina), en düşük azot değerinin K₂ (10 ton/da karasu) ve KS₃ uygulamalarından elde edildiği görülmektedir. Fosfor değeri 0.137 ile 0.167 mg/kg arasında değişim göstermiş, en yüksek fosfor değeri kontrol uygulamasından, en düşük değer ise K₂ (10 ton/da karasu) uygulamasından elde edilmiştir. Araştırmada en yüksek potasyum (0.357 mg/kg), sodyum (263.21 mg/kg), magnezyum (0.411 mg/kg), kalsiyum (1.376 mg/kg), çinko (11.955 mg/kg), mangan (72.84 mg/kg) ve bakır (8.682 mg/kg) değerleri P₁ (1 ton/da prina) uygulamasından, en yüksek demir içeriği (588.09 mg/kg) uygulama yapılmayan kontrol bitkilerinden elde edilmiştir. En düşük potasyum, sodyum, magnezyum, kalsiyum, çinko, demir, mangan ve bakır değerleri K₂ (10 ton/da karasu) uygulamasından elde edilmiştir. Araştırmadan elde edilen sonuçlar en yüksek mineral madde değerlerinin genel olarak 1 ton/da prina içeren P₁ uygulamasından elde edildiğini ortaya çıkartmıştır.

Çizelge 3. Zeytin karasuyu uygulamalarının nanenin mineral madde içeriğine etkisi

Uygulama	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Na (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)
Kontrol	0.067b-e	0.167a	0,331b-d	237,89b-d	0,366c-e	1,243b-d	10,805b-d	588,09a	65,83bc	7,84b-d
K ₁	0.066de	0.142de	0,316d-f	231,54de	0,361de	1,211de	10,516de	511,88de	64,07cd	7,63de
K ₂	0.063e	0.137e	0,303f	223,22e	0,347e	1,166e	10,138e	493,49e	61,77d	7,36e
KS ₁	0.069b-d	0.145cd	0,322b-e	236,42cd	0,368cd	1,236cd	10,738cd	522,67cd	65,42b-d	7,79cd
KS ₂	0.066c-e	0.145cd	0,320c-f	235,00c-e	0,366c-e	1,228c-e	10,674c-e	519,53c-e	66,03bc	7,75c-e
KS ₃	0.063e	0.138de	0,307ef	225,83de	0,352de	1,181de	10,257de	499,26de	62,49cd	7,45de
KS ₄	0.067b-e	0.145cd	0,320c-f	235,53c-e	0,366c-e	1,231c-e	10,698c-e	520,71c-e	65,18b-d	7,77c-e
S ₁	0.071ab	0.153b	0,339b	249,30b	0,389b	1,303b	11,323b	551,14b	68,99ab	8,22b
KP ₁	0.070bc	0.151bc	0,337bc	246,61bc	0,384bc	1,289bc	11,200bc	545,19bc	68,24b	8,13bc
KP ₂	0.070bc	0.145cd	0,322b-e	236,64b-d	0,368cd	1,237b-d	10,749b-d	523,15b-d	65,48b-d	7,81b-d
P ₁	0.074a	0.162a	0,357a	263,21a	0,411a	1,376a	11,955a	581,89a	72,84a	8,68a
LSD5%	0.0022	0.0046	0.0103	7.46	0.012	0.039	0.34	16.48	2.29	0.25

P<0.05, Farklı harflerle gösterilen değerler birbirinden farklıdır.

Zeytin karasuyu uygulanmış nane bitkilerinde bazı morfolojik özellikler ile mineral madde içeriği arasındaki korelasyon analizi sonuçları Şekil 1'de verilmiştir. Korelasyon analizi sonuçlarına göre morfolojik parametreler ile mineral madde içeriği arasında negatif bir ilişki olduğunu ancak bu ilişkinin istatistiksel olarak anlamsız olduğu tespit edilmiştir. Bitki boyunun diğer morfolojik parametreler ile ilişkisi anlamlı bulunamazken; bitki yaş ağırlığı ve bitki kuru ağırlığı arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki belirlenmiştir (r=0.850; p=0.001). Benzer şekilde bitki yaş ağırlığı ve fosfor (r=-0.650; p=0.031), bitki yaş ağırlığı ve demir (r=-0.648; p=0.031), bitki kuru ağırlığı ve fosfor (r=-0.655; p=0.029), bitki kuru ağırlığı ve demir (r=-0.657; p=0.028) arasında anlamlı korelasyonlar belirlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Zeytin karasuyu uygulanmış nane bitkilerinde bazı morfolojik özellikler ile mineral madde içeriği arasındaki korelasyon analizi sonuçları.

3.2. Zeytin karasuyunun kuzukulağında bazı morfolojik özellikler ve mineral madde içeriğine etkisi

Zeytin karasuyu uygulamalarının kuzukulağının bazı morfolojik özellikleri üzerine etkisi Çizelge 4’de verilmiştir. Çizelge 4 incelendiğinde, bitki boyunun 9.33 ile 18.67 cm arasında değiştiği ve en yüksek bitki boyunun KS₄ (10 ton/da karasu + 2 ton/da solucan gübresi), en düşük bitki boyu değerinin ise K₂ (10 ton/da karasu) uygulamasından elde edildiği görülmektedir. En yüksek bitki yaş ağırlığı değeri (12.89 g/bitki) S₁ (2 ton/da solucan gübresi), en yüksek kök yaş ağırlığı (0.98 g/bitki), bitki kuru ağırlığı (0.79 g/bitki) ve kök kuru ağırlığı (0.11 g/bitki) değeri KS₂ (5 ton/da karasu+ 2 ton/da solucan gübresi) uygulamasından elde edilmiştir.

Çizelge 4. Zeytin karasuyu uygulamalarının kuzukulağında bazı morfolojik özellikler üzerine etkisi

Uygulama	Bitki boyu (cm)	Bitki yaş ağırlığı (g/bitki)	Kök yaş ağırlığı (g/bitki)	Bitki kuru ağırlığı (g/bitki)	Kök kuru ağırlığı (g/bitki)
Kontrol	11.00cd	0.62e	0.22c	0.06b	0.04ab
K ₁	11.33b-d	1.62de	0.34bc	0.11b	0.03b
K ₂	9.33d	1.20e	0.22c	0.16b	0.05ab
KS ₁	13.67a-d	2.16de	0.22c	0.25b	0.02b
KS ₂	17.33ab	6.97bc	0.98a	0.79a	0.11a
KS ₃	14.67a-d	3.47c-e	0.55a-c	0.23b	0.05ab
KS ₄	18.67a	4.29c-e	0.58a-c	0.31ab	0.08ab
S ₁	17.00a-c	12.89a	0.74ab	0.57ab	0.06ab
KP ₁	17.00a-c	6.27bc	0.40bc	0.50ab	0.07ab
KP ₂	15.33a-d	5.51b-d	0.43bc	0.39ab	0.08ab
P ₁	18.00a	9.22b	0.49bc	0.56ab	0.05ab
LSD5%	5.37	3.53	0.44	0.44	0.06

P<0.05, Farklı harflerle gösterilen değerler birbirinden farklıdır.

Zeytin karasuyu uygulamalarının kuzukulağında mineral madde içeriğine etkisi Çizelge 5’te verilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, en yüksek azot değerinin (%3.11) S₁ (2 ton/da solucan gübresi), en düşük azot değerinin KP₂ (10 ton/da karasu +1 ton/da prina) uygulamasından elde edildiği görülmektedir. Uygulamalar arasında potasyum değeri açısından istatistiki olarak bir fark olmazken, en yüksek magnezyum (0.145 mg/kg) S₁ (2 ton/da solucan gübresi) ve KS₂ (5 ton/da karasu+ 2 ton/da

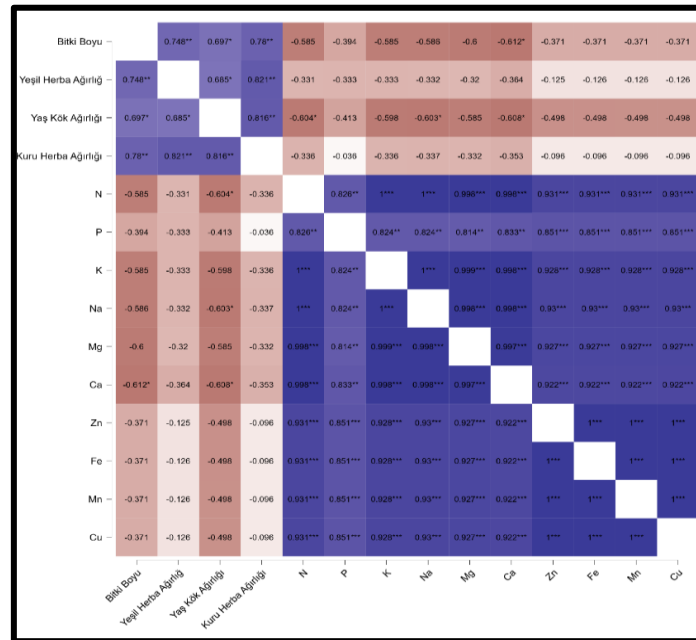
solucan gübresi), mangan (1593.10 mg/kg) değeri S₁ (2 ton/da solucan gübresi) uygulamasından, en yüksek sodyum (140.83 mg/kg), çinko (877.70 mg/kg), demir (364.60 mg/kg) ve bakır (294.30 mg/kg) KS₂ (5 ton/da karasu+ 2 ton/da solucan gübresi) uygulamasından elde edilirken; en yüksek kalsiyum (0.19 mg/kg) içeriği ise S₁ (2 ton/da solucan gübresi) ve KS₂ (5 ton/da karasu+ 2 ton/da solucan gübresi) uygulamalarından elde edilmiştir (Çizelge 5).

Çizelge 5. Zeytin karasuyu uygulamaların kuzukulağının mineral madde içeriğine etkisi

Uygulama	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Na (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)
Kontrol	2.71c	0.02a	0.59c	134.17b	0.138b	0.18b	811.80cd	341.50bc	1449.90bc	272.22cd
K ₁	2.61de	0.02a	0.57de	129.51cd	0.133cd	0.18cd	807.10cd	339.50bc	1441.50bc	270.65cd
K ₂	2.48gh	0.02a	0.54gh	123.10fg	0.126ef	0.17fg	767.20fg	322.70ef	1370.20ef	257.25fg
KS ₁	2.67cd	0.02a	0.58cd	132.24bc	0.136bc	0.18bc	824.20c	346.70b	1471.90b	276.36c
KS ₂	2.84b	0.02a	0.62b	140.83a	0.145a	0.19a	877.70a	369.20a	1567.50a	294.30a
KS ₃	2.57ef	0.02a	0.56ef	127.42de	0.131de	0.17de	794.10de	334.00cd	1418.20cd	266.28de
KS ₄	2.59def	0.02a	0.56def	128.50c-e	0.132cd	0.18c-e	800.90c-e	336.80b-d	1430.30b-d	268.54c-e
S ₁	3.11a	0.02a	0.67a	140.43a	0.145a	0.19a	849.90b	364.60a	1593.10a	284.72b
KP ₁	2.44hi	0.02a	0.53hi	120.72gh	0.124fg	0.17gh	752.40gh	316.50fg	1343.70fg	252.28gh
KP ₂	2.39i	0.02a	0.52i	118.29h	0.122g	0.16h	737.20h	310.10g	1316.60g	247.19h
P ₁	2.53fg	0.02a	0.55fg	125.19ef	0.129de	0.17ef	780.20ef	328.20de	1393.40de	261.62ef
LSD%5	2.71c	0.02a	0.59c	134.17b	0.138b	0.18b	811.80cd	341.50bc	1449.90bc	272.22cd

*: P<0.05, Farklı harflerle gösterilen değerler birbirinden farklıdır.

Zeytin karasuyu uygulanmış kuzukulağı bitkilerinde bazı morfolojik özellikler ile mineral madde içeriği arasındaki korelasyon analizi sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. Analiz sonuçları temel alınarak; bitki boyu ile bitki yaş ağırlığı arasında, bitki boyu ve kök yaş ağırlığı arasında, bitki boyu ile bitki kuru ağırlığı arasında pozitif anlamlı korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Bitki boyu ve Ca arasında ise negatif yönde korelasyon belirtilmiştir. Genel anlamda bakıldığında sonuçlara göre; morfolojik parametreler ile mineral maddeler arasında negatif bir ilişki olduğu görülmüştür. Bu ilişkinin istatistiksel olarak anlamsız bulunduğu görülmektedir. Ayrıca kök yaş ağırlığı ve bitki kuru ağırlığı arasında nane bitkisindeki sonuçlara benzer bir şekilde pozitif yönde ilişki olduğu görülmüştür (r=0,816; p=0,002).



Şekil 2. Zeytin karasuyu uygulanmış kuzukulağı bitkilerinde bazı morfolojik özellikler ile mineral madde içeriği arasındaki korelasyon analizi sonuçları.

4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan çalışmalarda nane bitki boyunun 37.57-76.47 cm, 50.1 ile 74.5 cm arasında değiştiği ve solucan gübresi uygulamalarının nanede bitki boyu üzerine olumlu etkilerinin olduğu bildirilmiştir (Özgülven & Kırıcı, 1999; Ayyobi ve ark., 2013; Arancon ve ark., 2003; Lazcano ve ark., 2010; Keshavarz-Mirzamohammadi ve ark., 2021; Tekdemir & Kırıcı, 2021). Ayyobi ve ark. (2013)'ün nanede yaptığı çalışmada bitki yaş ağırlığının 7.93 ile 13.02 g/bitki arasında değiştiği yönündeki bulguları ve Özgülven & Kırıcı (1999)'un kök yaş ağırlığı değerleri ile Keshavarz-Mirzamohammadi ve ark. (2021), Arancon ve ark. (2003), Lazcano ve ark. (2010) ve Tekdemir & Kırıcı (2021)'in solucan gübresinin nane bitkisinin büyüme özelliklerini arttırdığı yönündeki bulguları bulgularımızla benzerlik göstermektedir. Araştırma sonuçları düşük doz zeytin karasuyu uygulamasının nanede bitki boyunu arttırdığını, yüksek dozunda ise azalttığını ortaya çıkartmıştır. Bu bulguların aksine Gonzalez ve ark. (1990), Riffaldi ve ark. (1993), Uzun (2016) ve Alma (2022) karasu uygulamasının bitki boyunda artış meydana getirdiğini bildirmişlerdir. Araştırmada prina uygulamalarının bitki boyu ve bitki yaş ağırlığı üzerine etkisinin olumsuz olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde prina uygulamalarının bitki gelişimine olumsuz etkide bulunduğu farklı çalışmalarda da ortaya çıkarılmıştır (Gonzalez ve ark., 1990; Riffaldi ve ark., 1993). Biber bitkisinde prinanın artan dozuyla yaprak yaş ağırlığının ve kök kuru ağırlığının azaldığı (Alma, 2022), ham prinanın ayçiçeğinde büyümeyi engellediği (Kavdır & Killi, 2008) bildirilmiştir. Araştırmadan elde edilen sonuçlar nane bitkisinde demir ve fosfor hariç en yüksek mineral madde değerlerinin 1 ton/da prina içeren P₁ uygulamasından elde edildiğini ortaya çıkartmıştır. Benzer şekilde Cucci ve ark. (2008), zeytin prinasının artan dozlarının bitki gelişimi için gerekli olan makro ve mikro elementlerin sağlanmasına katkıda bulunduğunu bildirmişlerdir. Bulgularımızın aksine Türkmen & Dizdar (2022), tarafından nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinde yapılan farklı bir çalışmada, demir içeriğinin 6.18-170 mg/kg, çinko içeriğinin 1.34-86.2 mg/kg, bakır içeriğinin 0.09-12.4 mg/kg, mangan içeriğinin 2.01-99.8 mg/kg, sodyum içeriğinin 16.2-71.2 mg/kg, magnezyum içeriğinin 50.05-3742 mg/kg, potasyum içeriğinin 26973-4716.8 mg/kg arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bulunan farklı sonuçların yetiştirme şartlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Araştırmada karasu ile birlikte kullanılan solucan gübresinin kuzukulağı bitkilerinin morfolojik parametreleri üzerine olumlu etki ettiği belirlenmiştir. Nitekim solucan gübresi tek başına uygulandığında 17 cm olan bitki boyunun KS₂ (5 ton/da karasu+ 2 ton/da solucan gübresi) ve KS₄ (10 ton/da karasu + 2 ton/da solucan gübresi) uygulamalarında sırasıyla 17.33 cm ve 18.67 cm olarak ölçülmüştür. Kaliteli kuzukulağı üretimi için organik gübre kullanımının gerekli olduğu bildiren Sezer, (2015), organik gübre dozu arttıkça verimin arttığını, Biswas (2014) solucan gübresinin yeşil bitki ağırlığı ve bitki boyunu artırdığını, Uludağ ve ark. (2017) ise bitki kuru ağırlığı üzerine etkisinin olumlu olduğunu bildirmişlerdir. Araştırma sonuçları tek başına karasu uygulanan bitkilerde bitki boyunun azaldığını, buna karşın karasu ile birlikte solucan gübresi ve prina uygulamalarının bitki boyunda artışa neden olduğunu ortaya çıkartmıştır. Benzer şekilde, Seferoğlu & Kılınç (2002), tek başına karasu uygulamasının buğdayda bitki boyunda azalmayla neden olduğunu, Seferoğlu (2011), yüksek dozda karasu uygulamasının bakla ve soğan bitkilerinde çimlenme ve büyümeyi olumsuz etkilediğini bildirmişlerdir. Kavdır & Killi (2008), prina uygulamasının ayçiçeği bitkisinde bitki büyümesini engellediğini, Kelepesi & Tzortzakakis (2009) prina içerisindeki fenollü bileşiklerin marul bitkisinde verimi azalttığını, Alma (2022), biber bitkisinde prina uygulamalarının yeşil yaprak ağırlığını ve bitki boyunu azalttığını tespit etmişlerdir. Zeytin karasuyu uygulamalarının kuzukulağında mineral madde içeriğine etkisi de uygulamalar arasında farklılık göstermiştir. Tek başına uygulanan ve karasu ile birlikte uygulanan solucan gübresi kuzukulağında mineral madde içeriğini arttırmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, en yüksek azot (%3.11) ve mangan (1593.10 mg/kg) değerleri S₁ (2 ton/da solucan gübresi), en yüksek sodyum (140.83 mg/kg), çinko (877.70 mg/kg), demir (369.20 mg/kg) ve bakır değerleri (294.30 mg/kg) KS₂ (5 ton/da karasu+ 2 ton/da solucan gübresi) uygulamasından elde edilirken; en yüksek magnezyum (0.145 mg/kg) ve kalsiyum (0.19 mg/kg) değerleri ise S₁ (2 ton/da solucan gübresi) ve KS₂ (5 ton/da karasu+ 2 ton/da solucan gübresi) uygulamalarından elde edilmiştir. Benzer şekilde, Küçükşumuk ve ark. (2014) solucan gübresinin biber bitkisinde mineral madde içeriğine olumlu etki gösterdiğini, Sağlam ve ark. (2015) kıvrıkcık yapraklı salatada solucan gübresi uygulamalarının verim ve kalite üzerine etkisinin olumlu olduğunu bildirmiştir. Bu bulguların aksine, Canbay & Saltan (2015), kuzukulağı yapraklarında belirlenen çinko miktarının 1.04- 32.81 mg/kg, bakır miktarının 0.28 -5.54 mg/kg, mangan miktarının 0.30-6.23 mg/kg, demir miktarının 0.98-19.63 mg/kg,

magnezyum miktarının 7706-26033 mg/kg, kalsiyum miktarının 3374.821891.7 mg/kg, sodyum miktarının 23066-32601 mg/kg, potasyum miktarının 26631-28633,3 mg/kg arasında değiştiğini bildirmiştir.

Araştırma sonuçları değerlendirildiğinde zeytin karasuyu ile birlikte uygulanan prina ve solucan gübresinin morfolojik özellikler ve mineral madde içeriği dikkate alındığında nane ve kuzukulağı bitkilerinde karasuyun olumsuz etkilerini azalttığı tespit edilmiştir. Bu bulgular ışığında, zeytinyağı üretiminde atık madde olarak ortaya çıkan karasuyun olumsuz özelliklerinin giderilmesinde prina ve solucan gübresi gibi organik materyalle birleştirilerek kullanılması önerilmektedir.

Kaynakça

- Alma, Z. (2022). *Zeytin prinası ve deniz yosunu ekstraktı uygulamalarının biberde fide gelişimi üzerine etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, Türkiye.
- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Bierman, P., Metzger, J. D., Lee, S., & Welch, C. (2003). Effects of vermicomposts on growth and marketable fruits of field-grown tomatoes, peppers and strawberries. *Pedobiologia*, 47(5-6), 731-735. <https://doi.org/10.1078/0031-4056-00251>
- Ayyobi, H., Peyvast, G. A., & Olfati, J. A. (2013). Effect of vermicompost and vermicompost extract on oil yield and quality of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Agricultural Sciences (Belgrade)*, 58(1), 51-60. <https://doi.org/10.2298/JAS1301051A>
- Baytop, T. (1984). *Türkiye’de bitkiler ile tedavi*. İstanbul Üniversitesi Yayınları. No: 3255, İstanbul.
- Bellitürk, K. (2016). Sürdürülebilir tarımsal üretimde katı atık yönetimi için vermikompost teknolojisi. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 31(3), 1-5.
- Biswas, S. (2014). Evaluation of growth, yield and nutrient content with microbial consortia combined with different organic manures in *Rumex acetosella* L. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)*, 8(11), 01-05.
- Canbay, H. S., & Saltan, F. Z. (2015). Eskişehir’de halk arasında kullanılan bazı bitkilerdeki ağır metal ve besin elementlerinin belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(1), 83-90.
- Cucci, G., Lacolla, G., & Caranfa, L. (2008). Improvement of soil properties by application of olive oil waste. *Agronomy for sustainable development*, 28, 521-526. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2008027>
- Demirtaş, B. (2019). *Kuzukulağı (Rumex acetosella L.) bitkilerinde azot ve potasyum uygulamalarının verim ve kaliteye etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu, Türkiye.
- Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2022). *Biology and ecology of earthworms* (Fourth Edition). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74943-3>
- FAO. (2023). *Faostat veri tabanı*. Erişim tarihi: 01.01.2023. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- Gonzalez, M. D., Moreno, E., Quevedo-Sarmiento, J., & Ramos-Cormenzana, A. (1990). Studies on antibacterial activity of waste waters from olive oil mills (alpechin): inhibitory activity of phenolic and fatty acids. *Chemosphere*, 20(3-4), 423-432. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(90\)90073-3](https://doi.org/10.1016/0045-6535(90)90073-3)
- Kavdir, Y., & Killi, D. (2008). Influence of olive oil solid waste applications on soil pH, electrical conductivity, soil nitrogen transformations, carbon content and aggregate stability. *Bioresource Technology*, 99(7), 2326-2332. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.034>
- Keleş, S., & Tzortzakakis, N. G. (2009). Olive mill wastes—a growing medium component for seedling and crop production of lettuce and chicory. *International Journal of Vegetable Science*, 15(4), 325-339. <https://doi.org/10.1080/19315260903000560>
- Keser, F., Karatepe, M., Keser, S., Tekin, S., Türkoğlu, İ., Kaygılı, Ö., ... & Kırbağ, S. (2022). *Rumex acetosella* L. (kuzukulağı)’nın *in vitro* antiradikal, antimikrobiyal, antikanser ve fitokimyasal özellikleri. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 683-692. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.994208>
- Keshavarz-Mirzamohammadi, H., Tohidi-Moghadam, H. R., & Hosseini, S. J. (2021). Is there any relationship between agronomic traits, soil properties and essential oil profile of peppermint (*Mentha piperita* L.) treated by fertiliser treatments and irrigation regimes. *Annals of Applied Biology*, 179(3), 331-344. <https://doi.org/10.1111/aab.12707>

- Küçükyumuk, Z., Gültekin, M., & Erdal, İ. (2014). Vermikompost ve mikorizanın biber bitkisinin gelişimi ile mineral beslenmesi üzerine etkisi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 9(1), 51-58.
- Lazcano, C., Sampedro, L., Zas, R., & Domínguez, J. (2010). Vermicompost enhances germination of the maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *New Forests*, 39(3), 387-400. <https://doi.org/10.1007/s11056-009-9178-z>
- Özguven, M., & Kırıcı, S. (1999). Farklı ekolojilerde nane (*Mentha*) türlerinin verim ile uçucu yağ oran ve bileşenlerinin araştırılması. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 23(5), 465-472.
- Riffaldi, R., Levi-Minzi, R., Saviozzi, A., Vanni, G., & Scagnozzi, A. (1993). Effect of the disposal of sludge from olive processing on some soil characteristics: laboratory experiments. *Water, Air, and Soil Pollution*, 69, 257-264. <https://doi.org/10.1007/BF00478162>
- Sağlam, N., Doksöz, S., Gebeloğlu, N., Şahin, S., & Yılmaz, E. (2015). Agrimol örtü ve sıvı solucan gübresinin farklı uygulama sayısı ve dozlarının kıvrırcık yapraklı salatada verim, kalite ve bitki gelişimine etkileri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 8(1), 59-61.
- Seferoğlu, S., & Kılınç, G., (2002, Haziran). *An investigation on use of olive vegetation water as fertilizer for wheat*. 13th International Fertilizer Symposium, Fertilizers in Context with Resource Management in Agriculture, Tokat, Türkiye.
- Seferoğlu, S. (2011). Effects of olive oil solid waste on growth and nutrient uptake of faba bean, onion, and radish plants. *African Journal of Biotechnology*, 10(34), 6510-6515.
- Sezer, M. (2015). *Kuzukulağında (Rumex acetosella L.) yetiştirme ortamı ve organik gübrelemenin bazı verim özelliklerine etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Tekdemir, A., & Kırıcı, S. (2021). *Mentha spicata* L.'de farklı organik gübre uygulamaların verim ve kaliteye etkisi. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 40(3), 64-71.
- TÜİK. (2023). *Bitkisel üretim istatistikleri*. Erişim tarihi: 18.03.2024. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr>
- Türkmen, A., & Dizdar, Ç. (2022). Giresun'da yetişen bazı bitki türlerinin hasattan mutfağa gelene kadarki ağır metal ve mineral madde düzeylerinin tespiti. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 97-112. <https://doi.org/10.31466/kfbd.999728>
- Uludağ, T., Öztekin, G. B., & Tüzel, Y. (2017). Farklı besin solüsyonu konsantrasyonlarının yüzen su kültüründe yetiştirilen kuzukulağının verim ve kalitesi üzerine etkileri. *Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, ICAE - IWCB 2017 Özel Sayı*, 62-77.
- Uzun, N. (2016). *Farklı karasu ve azot dozlarının pamuk bitkisinde (Gossypium hirsutum L.) verim ve kalite özelliklerine etkisi*. (Doktora Tezi), Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın, Türkiye.
- Yıldırım, R., Tunaloğlu, R. (2016). Aydın'da karasu sorunu ve zeytinyağı işletmelerinin çözüme yönelik tercihlerinin incelenmesi. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 13(2), 39-48. <https://doi.org/10.25308/aduziraat.293422>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Narince x Regent Melezi F1 Genotiplerinin Mildiyö ve Külleme Hastalıklarına Dayanıklılığının Moleküler Markörlerle Belirlenmesi

İlknur POLAT^{*1,2}, Esra SULUHAN¹

¹Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 07059, Antalya, Türkiye

²Akdeniz Üniversitesi, Elmalı Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, 07700, Antalya, Türkiye

İlknur POLAT, ORCID No: 0000-0001-9841-847X, Esra SULUHAN, ORCID No: 0009-0004-4682-0941

*Sorumlu yazar e-posta: ilknurpolat@akdeniz.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 01.04.2024
Kabul: 28.06.2024
Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1462684

Anahtar Kelimeler

Bağcılık,
Dayanıklılıkla ilişkili genler,
Külleme,
MAS,
Mildiyö,
PCR

Öz: Asma yetiştiriciliğinde hastalıklar bakımından en önemli sorun, fungal hastalıklardan olan külleme (*Uncinula necator*) ve mildiyö (*Plasmopara viticola*) ile mücadeledir. Hastalıklarla mücadelede en etkin yöntemlerden birisi dayanıklı çeşitlerle yetiştiricilik yapmaktır. İslah çalışmalarında moleküler yöntemlerle seleksiyon yapmak hem zaman hem de güvenilirlik açısından önemlidir. Bu çalışmada, Narince x Regent melezi sonucunda elde edilen F1 genotiplerinde mildiyö ve külleme hastalıklarına dayanıklılık/duyarlılık durumları moleküler markörler kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada ebeveyn olarak Narince (♀), Regent (♂) ve 31 adet F1 genotipi olmak üzere toplamda 33 adet genotipte yapılan moleküler testlemelerde, mildiyöye dayanıklılık ile ilişkili Rpv3 geni ile bağlantılı UDV737 ve GF18-06 primelleriyle yapılan analizlerde 21 genotip dayanıklı olarak tespit edilmiştir. Küllemeye dayanıklılıkta Ren9-Ren3 genleriyle bağlantılı ScORA7 ve GF15-66 primerleriyle yapılan analizlerde 18 adet F1 genotip dayanıklı bulunmuştur. Bununla birlikte, her iki hastalığa da dayanıklı 14 genotip tespit edilmiştir. Araştırmada kullanılan markörler, ıslah çalışmasında piramitleme için önemli faydalar sağlamıştır.

Determination of Resistance to Mildew and Powdery Mildew Diseases of Narince x Regent Cross F1 Genotypes by Molecular Markers

Article Info

Received: 01.04.2024
Accepted: 28.06.2024
Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1462684

Keywords

Downy mildew,
MAS,
PCR,
Powdery mildew,
Resistance related genes,
Viticulture

Abstract: The most important problem in grapevine cultivation is the control of fungal diseases such as powdery mildew (*Uncinula necator*) and downy mildew (*Plasmopara viticola*). One of the most effective methods in the defence against diseases is cultivation with resistant varieties. In breeding studies, selection by molecular methods is important in terms of both time and reliability. In this study, the resistance/sensitivity of F1 genotypes obtained from Narince x Regent crosses to mildew and powdery mildew diseases were investigated by using molecular markers. In the molecular tests performed on a total of 33 genotypes including Narince (♀), Regent (♂) as parents and 31 F1 genotypes in the study, 21 genotypes were found to be resistant in the analyses performed with UDV737 and GF18-06 primers linked to the Rpv3 gene associated with resistance to mildew. In the analyses performed with ScORA7 and GF15-66 primers linked to Ren9-Ren3 gene associated with powdery mildew resistance, 18 F1 genotypes were found resistant. However, 14 genotypes resistant to both diseases were identified. The markers we used have provided significant benefits for pyramiding in breeding.

1. Giriş

Asma (*Vitis vinifera* L.), dünyanın en eski kültür bitkilerinden birisidir. Avrupa kıtasına özgü olan *V. vinifera* L. türü, insanlık tarihi ile birlikte kıtalar arasında yayılmış ve farklı iklim koşullarına yüksek uyum yeteneği sayesinde bağcılık kültürünün zenginleşmesinde büyük rol oynamıştır (Uzun, 2015; Kunter & Keskin, 2018; Sucu & Yağcı, 2020).

TÜİK Bitkisel Üretim Verilerine göre Türkiye’de meyveler, içecek ve baharat bitkileri içerisinde üzüm üretim miktarı incelendiğinde 2022 yılında 4.165.000 ton, 2023 yılında ise 3.400.000 ton üretim yapılmıştır. Bağcılığın ve üzümde elde edilen ürünlerin Türkiye ekonomisinde önemli bir yeri vardır. 2022 yılında üzüm üretim miktarı, toplam meyveler, içecek ve baharat bitkileri üretim miktarı içerisindeki oranı %15.5 olmuştur. 2023 yılı üzüm üretim miktarı bir önceki yıla göre %18.4 azalmıştır (TÜİK, 2024). Üretim miktarındaki bu azalmanın en büyük sebeplerinden birisi üzümde üretim dengesizliğine ve kalite kaybına neden olan mildiyö hastalığıdır (Anonim, 2024).

Bağcılıkta üretimi sınırlandıran en önemli hastalıklardan *Plasmopora viticola* (Berk. Et Curt) Berl et de Toni’ nin neden olduğu mildiyödür (Akçalı & Demiray, 2020). *Plasmopora viticola* Kuzey Amerika ve Avrupa’da en tahripkâr üzüm patojeni olarak kabul edilmektedir. İlk olarak 1834 yılında Amerika’da görülen bağ mildiyösü daha sonra Avrupa’da Fransa’daki bağlarda 1878 yılında görülmüş ve 1882 yılına kadar Avrupa’nın pek çok ülkesine yayılmıştır (Gargin & Öztürk, 2013). Hastalık yaprakların üzerinde yuvarlak ve yağ lekesi görünümünde belirti gösterir, yaprakların alt kısmında beyazımsı bir tabaka oluşur ilerleyen dönemde tüm yaprağı kaplayabilir. Yağmurlu havalardan sonra yaprakların nemli kalması veya çiğ görülen zamanlarda hastalık salgına dönüşür. Mildiyö hastalığı bulaştığında salkımlarda uçtan çürümeye neden olarak verim ve kalitede düşüslere neden olur bu yüzden mildiyö mücadelesi çiçeklenme ile koruk dönemi öncesinde titizlikle yapılmalıdır (Uzun, 2015).

Külleme (*Uncinula necator* (Schw.) Burr.) hastalığına neden olan obligat hastalık etmeni, sıcak ve kurak iklim koşullarında her yıl görülür. Gündüzleri sıcak olan ve akşamları serin olan yerlerde hastalığın görülme sıklığı artar. Hastalık omcanın tüm yeşil aksamında etkili olur. Bulaştığı aksamlarda grimsi, beyaz tozlu, pudramsı bir görüntüye sebep olur. Hastalığın erken dönemlerinde asma yapraklarının üst yüzeyinde yağ lekesine benzeyen lekeler görülür. Koruk döneminde hastalığa yakalanan omcadaki tanelerin gelişimleri olumsuz etkilenir (Anonim, 2008).

Asmanın meyvesi kadar yaprakları da ekonomik değere sahiptir. Özellikle ülkemizde son yıllarda asma yaprağı taze olarak pazarlandığı gibi salamuralık olarak da pazar değeri yüksek bir ürün haline gelmiştir (Cangi & Yağcı, 2017). Sultani Çekirdeksiz, Narince (Cangi ve ark., 2011) ve Yapıncak (Ertürk, 2009) yaprakları en fazla değerlendirilen çeşitlerdendir. Bununla birlikte yapraklarda pestisit kalıntısı önemli bir sorundur. Ertürk (2009), çalışmasında külleme, mildiyö gibi hastalıklarda kullanılan fungusitlerin salamura ve taze yaprak olarak kullanılan Yapıncak üzüm çeşidindeki kalıntı miktarlarını incelemiştir. Üzüm yetiştiriciliğini kısıtlayan külleme ve mildiyö hastalıklarına karşı uygulanabilecek entegre mücadele yöntemlerinin insan sağlığına zararlarını ortaya koymuştur.

Bütün bitkilerde olduğu gibi üzümde de hastalık ve zararlılar ile çevre koşullarına dayanıklılık elde etmek, doğal seleksiyonla ortaya çıkmış bireylerin korunması, bunlardan daha üstün özellikleri taşıyanların ortaya çıkarılması ya da istenen özelliklerin bir bitkide toplanması ancak belirli ıslah yöntemlerini uygulamakla elde edilebilir (İşçi, 2008). Teknolojinin gelişmesi ile biyoteknolojik yöntemlerin asma ıslahında kullanılmaya başlanması ve asma yetiştiriciliğinde karşılaşılan olumsuz sonuçlar doğuran mantari hastalıklara dayanıklılığın genetik tanımlanmasına yönelik araştırmalara hız kazandırmıştır (Dalbó ve ark., 2001; Luo ve ark., 2001; Pauquet ve ark., 2001; Fischer ve ark., 2004; Akkurt ve ark., 2007). Moleküler çalışmalar çeşitlerin hastalığa dayanım sağlayan genlerin mevcut olup olmadığı konusunda bilgi vermesinin yanında dayanıklılık derecesini belirlemede yetersiz kalmakta ve fenotipik gözlemlerle desteklenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Çeşidin hastalığa dayanım durumu ve dayanım derecesi konusunda da daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesi ve klasik ıslahta yaşanacak zaman kayıplarının önlenmesine yardımcı olacaktır (Uzun ve ark., 2018).

Bağda hastalıklara dayanıklılık çalışmaları hastalıklara dayanıklı yeni çeşit elde edilmesi ve elde edilen çeşitlerde külleme için dayanıklılıkla ilişkili 9 gen (Pauquet ve ark., 2001; Akkurt ve ark., 2007) ve mildiyö için 31 genin varlığının tespit edilmesi (Merdinoglu ve ark., 2003; Fischer ve ark., 2004; Welter ve ark., 2007; Bellin ve ark., 2009; Marguerit ve ark., 2009; Moreira ve ark., 2011; Schwander ve ark., 2012; Venuti ve ark., 2013; Sargolzaei ve ark., 2020; Zendler ve ark., 2020) önem kazanmıştır. Hastalıklarla ilişkili genler, dayanıklılık kaynakları olan asma çeşit/türlere ve buldukları

kromozomlara göre değişmektedir. Regent x Lemberger çeşidinin melezlemesiyle oluşturulan haritalama popülasyonunda, mildiyöye dayanıklılıkla ilişkili Rpv3, Rpv4 ve Rpv11 genlerin, sırasıyla 18, 4 ve 5 numaralı kromozom üstünde olduğu bulunmuştur (Fischer ve ark., 2004; Welter ve ark., 2007; Bellin ve ark., 2009; Uzun ve ark., 2018).

Bu çalışmada Narince x Regent melezlemelerinden elde edilen 33 adet F1 genotiplerin külleme ve mildiyö hastalıklarına dayanıklılıklarının moleküler düzeyde tespit edilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan toplam 33 adet bitkisel materyal, Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi bağ parsellerinde bulunan Narince, Regent ve Narince x Regent melezlemesinden elde edilen F1 genotipleridir. 2021 yılında tamamlanan “Salamuralık Yapraklı ve Mildiyö Hastalığına Dayanıklı Yeni Üzüm Çeşitleri Geliştirme” isimli ve 1180226 proje numaralı 1001-TÜBİTAK tarafından desteklenen proje sonucu elde edilmiştir. Ayrıca, klasik olarak yapılan testlemelerde mildiyö hastalığına karşı dayanıklı olduğu tespit edilmiştir (Uzun & Özer, 2021). Çalışmada kullanılan bitkisel materyallerin özellikleri şöyledir:

Ana ebeveyn Narince; beyaz-sarı renkte, çekirdekli, yaprakları seyrek tüylü ve beşgen yapıda bir üzüm çeşididir. Tokat yöresinde yapılan bağcılıkta üretim değerleri ile ve farklı kullanım alanlarının olması yönüyle ön plana çıkmaktadır. Kullanım alanı bakımından yaprakları ülkemizde genellikle salamura yapımında kullanılsa da elde edilen üzümler şıra, şarap yapımı ve sofralık tüketiminde de ön plandadır. Narince üzüm çeşidi mildiyö ve külleme hastalıklarına karşı oldukça hassastır (Cangi & Yağcı, 2017; Uzun & Özer, 2021).

Baba ebeveyn Regent; bağcılıktaki önemli hastalıklara (külleme, mildiyö ve kurşuni küf) olan yüksek dayanımı ile ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, yaprakları tüysüz ve az dilimlidir (Uzun & Özer, 2021).

2.2. Yöntem

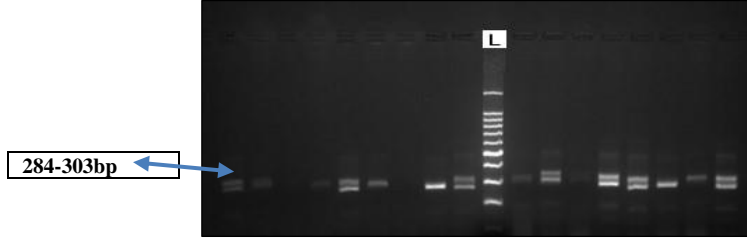
Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi bağ parsellerinden 2019 yılında dikilen ve kordon terbiye sistemi uygulanmış olan 33 adet asmadan alınan genç yaprak örnekleri, Bahçe Bitkileri Moleküler Biyoloji Laboratuvarında CTAB metodu (Doyle & Doyle, 1990) uyarlanarak DNA izolasyonu yapılmıştır. İzole edilen DNA örneklerinin kalitelerinin kontrol edilmesi için %1'lik agaroz jel elektroforezde 40 dk 100 V'da yürütülmüştür. DNA örneklerinin çoğaltılması için PCR (Polymerase Chain Reaction) tekniği kullanılmıştır. PCR ürünleri mildiyö için UDV737 (Tummala, 2021) ve GF18-06 (Akkurt ve ark., 2022), külleme için ScORA7 (Akkurt ve ark., 2007) ve GF15-66 primerleri (Zendler ve ark., 2020) kullanılarak çoğaltılmıştır. Primerlerin baz dizimleri Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir. PCR çoğaltımında 16 µL reaksiyon hacim olacak şekilde hazırlanan örneklerde 2 µl DNA, 4 µl ileri ve geri primerler ve son olarak 10 µl master mix (Fermentas) kullanılmıştır. PCR çalışması Blue Ray Termal Cyler cihazı kullanılarak; 3 dakika 94°C de ön denatürasyon işleminden sonra ayrılma (denatürasyon) işlemi için 94°C de 30 saniye, 55 °C de 45 saniye birleşme (annealing) ve uzama (extension) 72°C de 1 dk ve 35 döngü olacak şekilde yapılmıştır. Son olarak 72 °C de 5 dakika uzama aşaması gerçekleştirilmiştir. PCR ürünleri %2'lik agaroz jel elektroforezinde 2 saat 100 V da yürütülmüştür. Jel UV ışığı altında (Vilber UV Gel Documentation System) görüntülenerek fotoğflanmıştır.

3. Bulgular

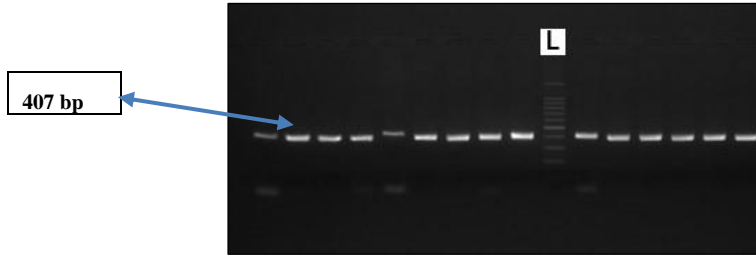
Mildiyö ve külleme hastalıklarına moleküler düzeyde dayanıklılık/duyarlılık bakımından 33 adet genotipte incelemeler yapılmıştır. Mildiyö hastalığına dayanıklılık ile ilişkilendirilmiş Rpv3 gen varlığının tespiti için yapılan analizler sonucunda UDV737 primeri ile yapılan moleküler çalışmalar sonucunda mildiyö hastalığına dayanıklı 22 adet (%70.96) dayanıklı F1 genotip tespit edilmiştir. GF18-06 primeri ile yapılan testlemeler sonucunda mildiyöye dayanıklı 27 adet (%87) genotip tespit edilmiştir (Çizelge 3). ScORA7 primeri ile 760 bp büyüklüğünde amplifikasyon ürünü veren, küllemeye dayanıklılık ile ilişkilendirilmiş Ren3 gen varlığının saptandığı, 18 adet (%58) F1 genotip tespit

edilmiştir (Şekil 4). GF15-66 primeri ile elde edilen PCR analizi sonucunda külleme hastalığı dayanıklılık sağlayan Ren9 geniyle ilişkili band 330 bp'dir ve 25 adet (%80.60) dayanıklı F1 genotip tespit edilmiştir (Şekil 3).

33 adet genotipte yapılan moleküler testlemelerde mildiyöye dayanıklılık ile ilişkili Rpv3 geni ile bağlantılı UDV737 ve GF18-06 primelerleriyle yapılan analizlerde 21 adet F1 genotipin dayanıklı olduğu, küllemeye dayanıklılık ile ilişkili Ren3 ve Ren9 geni ile bağlantılı ScORA7 ve GF15-58 primerleriyle yapılan moleküler analizlerde küllemeye dayanıklı 18 genotip ve her iki hastalığa da dayanıklı 14 genotip tespit edilmiştir (Çizelge 3). Mildiyö ve külleme hastalıklarına dayanıklı F1 genotip sayısının primerlere göre dağılımını ve her iki primer için de elde edilen ortak dayanıklı genotiplerin sayısı Şekil 5'de sunulmuştur.



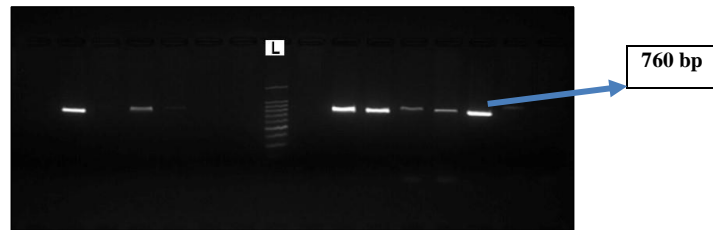
Şekil 1. UDV737 primerine ait band deseninin jeldeki görünümü. L: DNA ladder.



Şekil 2. GF18-06 primerine ait band deseninin jeldeki görünümü. L: DNA ladder.



Şekil 3. GF15-58 primerine ait band deseninin jeldeki görünümü. L: DNA ladder.



Şekil 4. ScORA7 primerine ait band deseninin jeldeki görünümü. L: DNA ladder.

Çizelge 1. Mildiyö hastalığıyla ilişkili kullanılan markörler, baz dizilimleri, ilgili gen ve allel büyüklükleri (bp)

Markör Adı	Primerlerin Baz Dizilimi (F ve R)	Allel Büyüklükleri (bp)	Elde Melezler	Edildiği	İlgili Gen
UDV737	F: TTTGCATGCGATACCTGAAG R: TCCTGCAGCTGTTGACGATA	291/301 (Hassas) 284/303 (Dayanıklı)	Cabernet Sauvignon x Chambourcin		<i>Rpv3</i>
GF18-06	F: GGTCTCCTAGAAAGCCAAGCAA R: TCCCTTTCCCCTTGTCTCG	417 (Hassas) 407 (Dayanıklı)	Alphonse Lavallee x Regent		<i>Rpv3</i>

Çizelge 2. Külleme hastalığıyla ilişkili kullanılan markörler, baz dizilimleri, ilgili gen ve allel büyüklükleri (bp)

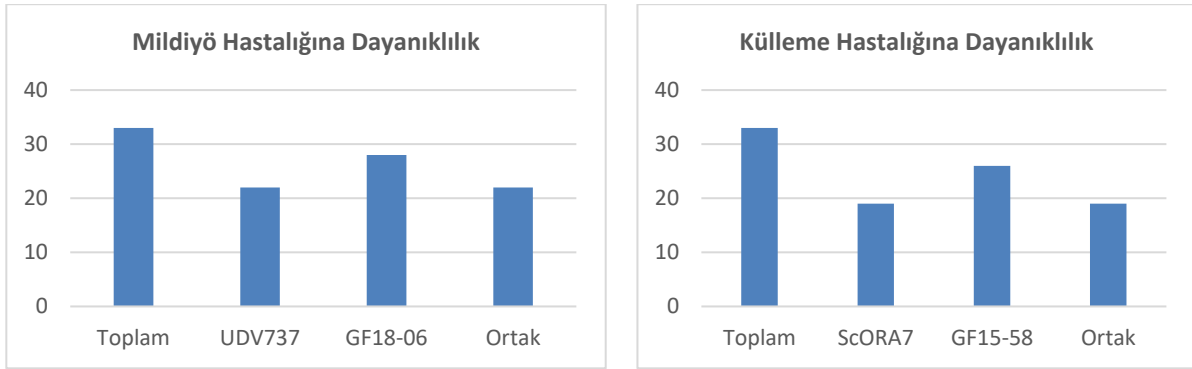
Markör Adı	Primerlerin Baz Dizilimi (F ve R)	Allel Büyüklükleri (bp)	Elde Melezler	Edildiği	İlgili Gen
ScORA7	F: GAAACGGGTGTGAGGCAAAGGTGG R: GGCCATTAGGAAATCAACATTAC	760 (Dayanıklı)	Lemberger x Regent		Külleme dayanıklı QTL
GF15-58	F: TTTTAGGAGAAGGAAGCGACAG R: TTTAGGGTGTGATTGCAGATTG	330 (Dayanıklı)	Cabernet Sauvignon x Regent		<i>Ren9</i>

Çizelge 3. Moleküler markörlerle testleme sonuçları

Genotipler	Moleküler Markörler			
	Mildiyö Hastalığına Dayanıklılık		Külleme Hastalığına Dayanıklılık	
	UDV737	GF18-06	ScORA7	GF15-58
Narince (♀)	Hassas	Hassas	Hassas	Hassas
Regent (♂)	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-1	Dayanıklı	Dayanıklı	Hassas	Hassas
F1-2	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-3	Hassas	Hassas	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-4	Dayanıklı	Dayanıklı	Hassas	Dayanıklı
F1-5	Dayanıklı	Dayanıklı	Hassas	Hassas
F1-6	Dayanıklı	Dayanıklı	Hassas	Dayanıklı
F1-7	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-8	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-9	Hassas	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-10	Hassas	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-11	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-12	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-13	Dayanıklı	Dayanıklı	Hassas	Dayanıklı
F1-14	Dayanıklı	Hassas	Hassas	Dayanıklı
F1-15	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-16	Hassas	Hassas	Hassas	Hassas
F1-17	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-20	Hassas	Hassas	Hassas	Hassas
F1-21	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-22	Hassas	Dayanıklı	Hassas	Dayanıklı
F1-23	Hassas	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı
F1-24	Dayanıklı	Dayanıklı	Hassas	Dayanıklı
F1-25	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı	Dayanıklı

Çizelge 3. Moleküler markörlerle testleme sonuçları (devam)

Genotipler	Moleküler Markörler			
	Mildiyö Hastalığına Dayanıklılık		Külleme Hastalığına Dayanıklılık	
	UDV737	GF18-06	ScORA7	GF15-58
F1-26	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl
F1-27	Hassas	Dayanıkl	Hassas	Hassas
F1-28	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl
F1-29	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl
F1-30	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl
F1-31	Hassas	Dayanıkl	Hassas	Hassas
F1-32	Dayanıkl	Dayanıkl	Hassas	Dayanıkl
F1-33	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl



Şekil 5. Mildiyö ve külleme hastalıklarına dayanıklı genotip sayısının primerlere göre dağılımı.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmanın amacı, Narince x Regent melezlemesinden elde edilen F1 genotiplerinin mildiyö ve külleme hastalıklarına karşı dayanıklı olup olmadıklarını moleküler markörlerle belirlemektir. Külleme ve mildiyö hastalıklarına dayanıklılıkla ilişkili markörler ile PCR analizleri yapılarak, söz konusu hastalıklara dayanıklı olma olasılığı yüksek genotipler, marköre destekli seleksiyon (Marker Assisted Selection-MAS) tekniği ile erken dönemde teşhis edilebilmektedir (Söylemezoğlu ve ark., 2012).

Asmada görülen heterezigotik yapı popülasyondaki istenen karakterin yeterince bulunamamasına, gençlik kısırılığının uzun olması ise ıslah programlarının 15-18 yıl gibi çok uzun sürmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, daha kısa sürede, daha ekonomik ve klasik ıslahı destekleyen güvenilir sonuçlar elde etmek amacıyla MAS çalışmalarında kullanılacak markörleri geliştirmek önemlidir (Pauquet ve ark., 2001; Akkurt ve ark., 2007 ve 2022). Her iki hastalık için de pek çok QTL haritalama çalışmaları yapılmış ve MAS amaçlı kullanılacak markörler geliştirilmiştir (Blasi ve ark., 2011; Sapkota ve ark., 2019; Tummala, 2021; Akkurt ve ark., 2007 ve 2022).

Islah programlarında MAS amaçlı kullanılacak moleküler markörden en fazla doğrulukta sonuçlar elde etmek için, öncelikle markörün dayanıklılık geniyle çok yakın ilişkili olması önemlidir (Tanksley, 1983; Choi ve ark., 2020). Bu nedenle, kullanılacak markörün geliştirildiği haritalama popülasyonundaki dayanıklı ebeveyn de önemlidir. Çalışmamızdaki her iki hastalık için de dayanıklılıkla ilişkili olarak farklı tür/çeşitlerde ve kromozomlarda bulunan genler tespit edilmiştir (Donald ve ark., 2002; Barker ve ark., 2005; Sargolzaei ve ark., 2020).

Bu çalışmada, Narince x Regent melezlemesinden elde edilen F1 genotiplerinde mildiyöye dayanıklılık ile ilişkili Rpv3 geni ile bağlantılı UDV737 ve GF18-06 primerleri, külleme hastalığına dayanıklılık ile ilişkili Ren3 ve Ren9 geni ile bağlantılı ScORA7 ve GF15-58 primerleri kullanılmıştır. Regent, külleme ve mildiyö hastalıklarına dayanıklı Diana (Silvane × Müller-Thurgau) × Chambourcin melezlemesi elde edilen bir çeşittir (Eibach & Töpfer, 2003; Zandler ve ark., 2020). Araştırmada kullanılan primerlerden GF18-16, ScORA7 ve GF15-58, dayanıklı genotip olarak

Regent'in kullanıldığı melezlemelerden oluşturulan haritalama popülasyonlarından geliştirilmiştir. UDV737 primeri ise, Regent'in elde edildiği ve dayanıklılık sağlayan genin aktarılmış olduğu Chambourcin çeşidinin kullanıldığı haritalama popülasyonundan elde edilmiştir. Asma genotiplerinin dayanıklılık durumlarını belirlemek amacıyla pek çok çalışmada kullanılmışlardır. Di Gaspero ve ark. (2012) 265 Avrupa çeşidi, 82 yabancı tür ve Kuzey Amerika kökenli 233 üzüm hattında gerçekleştirilen analizler sonucunda Rpv3 gen varlığı tespit edilerek, melezlemeler sonucu dayanıklılık genlerine sahip olan çeşitlerin belirlenmesinde UDV737 primerinin MAS için uygun olduğunu belirtmiştir. Polat & Suluhan (2024), Regent x Manisa Sultanı melezlemelerinden elde edilen F1 genotiplerin külleme ve mildiyö hastalıklarına dayanıklılık durumlarının tespitinde önemli bulmuştur. Yıldırım ve ark. (2019), külleme hastalığına dayanıklılıkla ilişkili genleri tespit etmek amacıyla ScORA7 primerini de kullanmışlar ve dayanıklı/hassas genotipleri ayırt edebilmişlerdir.

Bu çalışmada kullanılan materyaller, temin edildiği TÜBİTAK projesinde (Uzun & Özer, 2021) mildiyö hastalığına dayanıklı olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen ümitvar genotiplerde klasik testleme yapılmış, genotiplerin yüksek derecede mildiyö hastalığına dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Verilen literatürdeki klasik testleme sonuçları ile yaptığımız moleküler analiz sonuçları genel olarak paralellik göstermektedir. Bu çalışmada da salamura yapmak için kullanılan Türkiye'nin önemli üzüm çeşitlerinden olan Narince ve üzüm yetiştiriciliğinde hastalıklarla mücadelede dayanıklılığı kanıtlanmış olan Regent kullanılması sonucunda, üzümün ekonomik öneminde düşüşe sebep olan ilaç kalıntısı sorunlarının aşılmasında önemli olacaktır. Elde edilen dayanıklı çeşitlerin ticari olarak üretime katkı sağlayabilme imkânı bulunmaktadır. Çalışmamızda, dayanıklı ebeveyn olarak Regent ve hassas ebeveyn olarak Narince üzüm çeşitlerinin melezlenmesiyle dayanıklılığın bir sonraki nesillere aktarımını ve elde edilen F1 genotiplerinde yapılan moleküler analizler sonucunda külleme ve mildiyö hastalıklarının her ikisine de dayanıklı olan 14 genotipin varlığı tespit edilmiştir. Farklı türler ve genotiplerde yapılan hastalık testlemeleri moleküler analizler ile desteklenerek yeni çeşitlerin elde edilmesinin amaçlanması Türkiye üzüm yetiştiriciliği için olumlu etkiler sağlayabilecektir.

Teşekkür

Çalışmada kullanılan materyaller, Prof. Dr. H. İbrahim UZUN'un yürütücülüğünü yaptığı TÜBİTAK (proje no:118O226) tarafından desteklenen projeden elde edilmiştir. Yazarlar olarak hem TÜBİTAK'a hem de proje yürütücülerine teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Akçalı, E., & Demiray, S. T. (2020). Akdeniz Bölgesinde bağ mildiyösü hastalığı (*Plasmopara viticola*) ile mücadelede Fluopicolide+ Fosetyl-Al (Profler®)'in alt dozlarının biyolojik etkinliğinin belirlenmesi. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 30(2), 229-233. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.697623>
- Akkurt, M., Welter, L., Maul, E., Töpfer, R., & Zyprian, E. (2007). Development of SCAR markers linked to powdery mildew (*Uncinula necator*) resistance in grapevine (*Vitis vinifera* L. and *Vitis* sp.). *Molecular Breeding*, 19(2), 103-111. <https://doi.org/10.1007/s11032-006-9047-9>
- Akkurt, M., Şenses, I., Aktürk, B., Tozlu, I., Özer, N., & Uzun, H. (2022). Marker assisted selection (MAS) for downy mildew resistance in grapevines using Rpv3. 1 associated markers. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 50(1). <https://doi.org/10.15835/nbha50112708>
- Anonim. (2008). *Zirai mücadele teknik talimatları Cilt IV*. Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü, Ankara. Erişim tarihi: 12.03.2024. <https://www.tarimorman.gov.tr/TAGEM/Belgeler/Teknik%20tal%C4%B1matlar%202008/C%C4%B0LT%204.pdf>
- Anonim. (2024). *Bağlardaki mildiyö hastalığı üzüm üretimini ciddi oranda düşürdü*. Alışehir Manşet 13 Ocak 2024 tarihli. Erişim tarihi: 16.03.2024. <https://www.alasehirmanset.com/baglardaki-mildiyo-hastaligi-uzum-uretimini-ciddi-oranda-dusurdu/12949/>
- Barker, C. L., Donald, T., Pauquet, J., Ratnaparkhe, M. B., Bouquet, A., Adam-Blondon, A.F., ... & Dry, I. (2005). Genetic and physical mapping of the grapevine powdery mildew resistance gene, RUN1, using a bacterial artificial chromosome library. *Theoretical and Applied Genetics*, 111, 370-377. <https://doi.org/10.1007/s00122-005-2030-8>

- Bellin, D., Peresotti, E., Merdinoglu, D., Wiedemann-Merdinoglu, S., Adam-Blondon A.F., Cipriani, G., ... & di Gaspero G. (2009). Resistance to *Plasmopara viticola* in grapevine 'Bianca' is controlled by a major dominant gene causing localised necrosis at infection site. *Theoretical and Applied Genetics*, 75, 669-673. <https://doi.org/10.1007/s00122-009-1167-2>
- Blasi, P., Blanc, S., Wiedemann-Merdinoglu, S., Prado, E., Rühl, E. H., Mestre, P., & Merdinoglu, D. (2011). Construction of a reference linkage map of *Vitis amurensis* and genetic mapping of Rpv8, a locus conferring resistance to grapevine downy mildew. *Theoretical and Applied Genetics*, 123, 43-53. <https://doi.org/10.1007/s00122-011-1565-0>
- Cangi, R., & Yağcı, A. (2017). Bağdan sofraya yemeklik asma yaprak üretimi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 137-148. <https://doi.org/10.17100/nevbittek.288316>
- Cangi, R., Admır, M., Yağcı, A., Topçu, N., & Sucu, S. (2011). Salamuralık yaprak üretilen bağlarda farklı üretim modellerinin ekonomik analizi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(2), 77-84.
- Choi, Y. R., Lee, J. Y., Hwang, S., & Kim, H. U. (2020). PCR-based InDel marker associated with powdery mildew-resistant MR-1. *Agronomy*, 10(9), 1274-1283. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091274>
- Dalbó, M. A., Ye, G. N., Weeden, N. F., Wilcox, W. F., & Reisch, B. I. (2001). Marker-assisted selection for powdery mildew resistance in grapes. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(1), 83-89. <https://doi.org/10.21273/JASHS.126.1.83>
- Di Gaspero, G., Copetti, D., Coleman, C., Castellarin, S. D., Eibach, R., Kozma, P., ... & Testolin, R. (2012). Selective sweep at the Rpv3 locus during grapevine breeding for downy mildew resistance. *Theoretical and Applied Genetics*, 124, 277-286. <https://doi.org/10.1007/s00122-011-1703-8>
- Donald, T. M., Pellerone, F., Adam-Blondon, A. F., Bouquet, A., Thomas, M. R., & Dry, I. B. (2002). Identification of resistance gene analogs linked to a powdery mildew resistance locus in grapevine. *Theoretical and Applied Genetics*, 104, 610-618. <https://doi.org/10.1007/s00122-001-0768-1>
- Doyle, J. J., & Doyle, J. L. (1990). Isolation of plant DNA from fresh tissue. *Focus*, 12, 13-15.
- Eibach, R., & Töpfer, R. (2003). Success in resistance breeding: "Regent" and its steps into the market. *Proceedings of the VIIIth Int. Conf. Grape Genetic Breeding Kecskemét, Hungary*, 687-692.
- Ertürk, A. (2009). *Tekirdağ ilinde yetiştirilen yapıncak üzüm çeşidinin yapraklarında salamura öncesi ve sonrası fungusit kalıntı miktarları*. (Yüksek Lisans tezi), Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, Türkiye.
- Fischer, B. M., Salakhutnov, I., Akkurt, M., Eibach, R., Edwards, K. J., Töpfer, R., & Zyprian, E. (2004). Quantitative trait locus analysis of fungal disease resistance factors on a molecular map of grapevine. *Theoretical and Applied Genetics*, 108, 501-515. <https://doi.org/10.1007/s00122-003-1445-3>
- Gargin, S., & Öztürk, Y. (2013). Eğirdir koşullarında bazı üzüm çeşitlerinin bağ mildiyösüne (*Plasmopara viticola* (Berk. et. Curt.)) karşı reaksiyonlarının araştırılması. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(1), 134-136.
- İşçi, B. (2008). Asmada QTL (kantitatif karakter lokus) analizi. *Anadolu Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 18(2), 11-37.
- Kunter, B., & Keskin, N. (2018, Temmuz). *Üzümün antioksidan ve ayurvedik önemi*. Uluslararası Avrasya Doğal Beslenme ve Sağlıklı Yaşam Zirvesi, Ankara, Türkiye.
- Luo, S. L., He, P. C., Zhou, P., & Zheng, X. Q. (2001). Identification of molecular genetic markers tightly linked to downy mildew resistant genes in grape. *Acta Genet. Sinica*, 28(1), 76-82.
- Marguerit, E., Boury, C., Manicki, A., Donnart, M., Butterlin, G., Némorin, A., ... & Decroocq, S. (2009). Genetic dissection of sex determinism, inflorescence morphology and downy mildew resistance in grapevine. *Theoretical and Applied Genetics*, 118(7), 1261-1278. <https://doi.org/10.1007/s00122-009-0979-4>
- Merdinoglu, D., Wiedemann-Merdinoglu, S., Coste, P., Dumas, V., Haetty, S., Butterlin, G., & Greif, C. (2003). Genetic analysis of downy mildew resistance derived from *Muscadinia rotundifolia*. *Acta Horticulturae*, 60, 451-456. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.603.57>
- Moreira, F. M., Madini, A., Marino, R., Zulini, L., Stefanini, M., Velasco, R., ... & Grando, M. S. (2011). Genetic linkage maps of two interspecific grape crosses (*Vitis* spp.) used to localize

- quantitative trait loci for downy mildew resistance. *Tree Genetics & Genomes*, 7, 153-167. <https://doi.org/10.1007/s11295-010-0322-x>
- Pauquet, J., Bouquet, A., This, P., & Adam-Blondon, A. F. (2001). Establishment of a local map of AFLP markers around the powdery mildew resistance gene Run1 in grapevine and assessment of their usefulness for marker assisted selection. *Theoretical and Applied Genetics*, 103, 1201-1210. <https://doi.org/10.1007/s001220100664>
- Polat, İ., & Suluhan, E. (2024). Marker-assisted selection to determine downy and powdery mildew resistance in 'Manisa Sultanı' × 'Regent' crossing population using Rpv3.1 and Ren9 gene associated markers. *Acta Horticulture*, 1385, 65-72. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1385.9>
- Sapkota, S., Chen, L-L., Yang, S., Hyma, K. E., Cadle-Davidson, L., & Hwang, C-F. (2019). Construction of a high-density linkage map and QTL detection of downy mildew resistance in *Vitis aestivalis*-derived 'Norton. *Theoretical and Applied Genetics*, 132, 137-147. <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3203-6>
- Sargolzaei, M., Maddalena, G., Bitsadze, N., Maghradze, D., Bianco, P.A., Failla, O., ... & De Lorenzis, G. (2020). Rpv29, Rpv30 and Rpv31: Three novel genomic loci associated with resistance to *Plasmopara viticola* in *Vitis vinifera*. *Frontiers in Plant Science*, 11, 562432. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.562432>
- Schwander, F., Eibach, R., Fenchter, I., Hausmann, L., Zyprian, E., & Töpfer, R. (2012). Rpv10: a new locus from the Asian vitis gene pool for pyramiding downy mildew resistance loci in grapevine. *Theoretical and Applied Genetics*, 124, 163-176. <https://doi.org/10.1007/s00122-011-1695-4>
- Söylemezoğlu, G., Ergül, A., Akkurt, M., & Çakır, A. (2012). *Asmalarda külleme ve mildiyö hastalıklarına dayanıklı çeşit ıslahında marköre dayalı seleksiyon (marker assisted selection-MAS) yöntemi ile hızlandırılmış seleksiyon*, (Kesin Raporu. Proje No: 09B4347002). Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi <https://dspace.ankara.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12575/72374/09B4347002%20kesin%20rapor.pdf?sequence=1>
- Sucu, S., & Yağcı, A. (2020). Farklı anaçlar üzerine aşılı şaraplık üzüm çeşitlerinde fidan randıman ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 790-801. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.690371>
- Tanksley, S. D. (1983) Molecular markers in plant breeding. *Plant Molecular Biology Reporter*, 1, 3-8. <https://doi.org/10.1007/BF02680255>
- Tummala, K. S. (2021). *Marker-assisted selection to determine the introgression of Rpv-3 mediated downy mildew resistance in 'Chambourcin' X 'Cabernet Sauvignon' grapevine population*. (Graduate Theses), Missouri State University. <https://bearworks.missouristate.edu/theses/3652>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2024). Erişim tarihi: 07.03.2024. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/>
- Uzun, H. İ. (2015). *Bağcılık el kitabı*. Hasad Yayıncılık.
- Uzun, İ., Özer, N., Akkurt, M., Özer, C., & Aydın, S. (2018). *Asmalarda mildiyö hastalığına dayanıklılığın marköre dayalı seleksiyon ve fenotipleme yardımıyla erken teşhisi*. TÜBİTAK Proje No: 1150176; Antalya
- Uzun H. İ., & Özer, N. (2021). *Salamuralık yapraklı ve mildiyö hastalığına dayanıklı yeni üzüm çeşitleri geliştirme*. TÜBİTAK Proje No: 1180226.
- Venuti, S., Copetti, D., Foria, S., Falginella, L., Hoffmann, S., Bellin, D., ... & di Gaspero, G. (2013). Historical intogression of downy mildew resistance gene Rpv12 from the Asian species *Vitis amurensis* into grapevine varieties. *PlosOne*, 4, 1-7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061228>
- Welter, L. J., Göktürk Baydar, N., Akkurt, M., Maul, E., Eibach, R., Töpfer, R., & Zyprian, E. (2007). Genetic mapping and localization of quantitative trait loci affecting fungal disease resistance and leaf morphology in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Molecular Breeding*, 20, 359-374. <https://doi.org/10.1007/s11032-007-9097-7>
- Yıldırım, Z., Atak, A., & Akkurt, M. (2019). Determination of downy and powdery mildew resistance of some *Vitis* spp. *Ciência e Técnica Vitivinícola*, 34(1), 15-24. <https://doi.org/10.1051/ctv/20193401015>

Zendler, D., Töpfer, R., & Zyprian, E. (2020). Confirmation and fine mapping of the resistance locus Ren9 from the grapevine cultivar 'Regent'. *Plants*, 10(1), 24.
<https://doi.org/10.3390/plants10010024>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Evelik Otu'nun (*Rumex acetosella*) Yem Değeri ve İn vitro Gerçek Sindirilebilirliğinin Belirlenmesi

Mehtap GÜNEY*¹, Rabia AYDIN²

¹Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, 65080, Van, Türkiye

²Ziraat Mühendisi, 65080, Van, Türkiye

Mehtap GÜNEY, ORCID No: 0000-0002-0613-3600, Rabia AYDIN, ORCID No: 0009-0005-1004-8096

*Sorumlu yazar e-posta: mguney@yyu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 21.05.2024
Kabul: 14.08.2024
Online Ağustos 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1486178

Anahtar Kelimeler

Alternatif kaba yem,
İn vitro gerçek sindirim,
Rumex acetosella

Öz: Bu çalışma, yörede doğal olarak yetişen evelik otunun (EO) (*Rumex acetosella*) ham besin madde içerikleri, yem değeri ve *in vitro* gerçek sindirim (İVGS) parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yürütülmüştür. Çalışmada EO, hayvan beslemede geleneksel olarak kullanılan yonca kuru otu (YKO) ve korunga otu (KO) ile karşılaştırılmıştır. Tüm kaba yemler, 2023 yılı Temmuz ayında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüs alanından toplanmıştır. İn vitro gerçek sindirilebilirliklerinin belirlenmesi için rumen sıvısı, özel bir çiftlikte kaba yem ağırlıklı beslenen ve kesim için mezhabaneye getirilen 2 adet tokludan alınarak Daisy inkübatörde 48 saatlik inkübasyon sonrası belirlenmiştir. Elde edilen veriler tek yönlü varyans analizi ile tespit edilmiştir. Evelik otunun ham kül içeriği (%14.93), YKO (%7.85) ve KO'ndan (%6.43) oldukça yüksek bulunmuştur ($P<0.001$). Evelik otunun HP içeriği %26.87 ile en yüksek elde edilirken, bunu %19.02 ile YKO ve %13.58 ile KO izlemiştir. En düşük ADF ve NDF içeriği EO'ndan elde edilmiştir ($P<0.001$). Nispi Yem Değeri (NYD) bakımından EO'nun YKO ve KO'dan daha iyi olduğu bulunmuştur. En yüksek *in vitro* gerçek sindirilebilirlik (İVGS_{YEM}), *in vitro* gerçek kuru madde sindirilebilirlik (İVGS_{KM}) ve *in vitro* gerçek organik madde sindirilebilirlik (İVGS_{OM}) değerini evelik otu göstermiştir ($P<0.001$). Sonuç olarak, çalışmada yörede doğal olarak yetişen EO'nun, HP içeriğinin hayvan beslemede geleneksel olarak kullanılan YKO ve KO'ndan yüksek, bitki hücre duvarı unsurlarının ise düşük bulunduğu dolayısıyla daha yüksek sindirilebilirlik değerinin elde edildiği gözlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında EO'nun verim özelliklerinin araştırılarak ortaya konulmasının gerekli olduğu, iyi kalitede kaba yem olmasının yanı sıra protein yemi olarak da değerlendirilebilecek alternatif kaba yem olabileceği düşünülmüştür.

Determination of Feed Value and In vitro True Digestibility of *Rumex acetosella*

Article Info

Received: 21.05.2024
Accepted: 14.08.2024
Online August 2024

DOI:10.53433/yyufbed.1486178

Keywords

Alternative roughage,
In vitro digestion,
Rumex acetosella

Abstract: This study was carried out to determine the nutritional contents, feed value and in vitro true digestion (IVGS) parameters of *Rumex acetosella* (RA), which grows naturally in the region. In the study, RA was compared with alfalfa hay (AH) and sainfoin hay (SH), which are traditionally used in animal nutrition. All forages were collected from Van Yuzuncu Yil University campus area in July 2023. To determine the true digestibility in vitro (IVTD), rumen fluid was taken from 2 year fed mainly forage on a private farm and brought to the slaughterhouse for slaughter, and was determined after 48 hours of incubation in the Daisy incubator. The data obtained were determined by one-way analysis of variance. Crude ash content of RA (14.93%) was found to be significantly higher than AH (7.85%) and SH (6.43%) ($P<0.001$). While the CP content of RA was the highest with 26.87%, it was followed by AH with 19.02% and SH with 13.58%. The lowest ADF and NDF content was obtained from RA ($P<0.001$). It was found that

EO was better than YKO and KO in terms of Relative Feed Value (RFV). *Rumex acetosella* showed the highest in vitro true digestibility (IVGS_{ROUGHAGE}), in vitro true dry matter digestibility (IVGS_{DM}) and in vitro true organic matter digestibility (IVGS_{OM}) values ($P<0.001$). As a result, it was observed in the study that the CP content of RA grown naturally in the region was higher than the AH and SH traditionally used in animal nutrition, and the plant cell wall components were lower, thus a higher digestibility value was obtained. In the light of these results, it was thought that it was necessary to investigate and reveal the productivity characteristics of RA, and that it could be an alternative roughage that could be evaluated as protein feed as well as being a good quality roughage.

1. Giriş

Ruminantlar, sindirim fizyolojileri açısından yılın her mevsiminde kaba yemlere ihtiyaç duymaktadır. Ancak, ülkemizde bu hayvanlar için üretilen kaba yemlerin yetersiz olduğu bilinmektedir. Ayrıca günümüzde Dünya'da yaşanan küresel ısınma, etkilerini her geçen gün daha çok hissettirmektedir. Dolayısıyla önümüzdeki süreçte yetersiz yağışlar, baraj sularının azalması gibi tehditler kuraklık krizini de beraberinde getirecek ve böylece kaba yem açığı bakımından makas giderek açılacaktır (Koyuncu & Nageye, 2020). Azalan yem kaynaklarının yanında giderek artan hayvan sayısı da insanoğlunun geleceğini tehdit edecektir (Sevinç ve ark., 2022). Bu nedenle bitkisel ve hayvansal üretimin sürdürülebilirliği açısından kısa vadede çeşitli önlemlerin alınması gerekmektedir. Alınacak önlemlerden birisi de geleneksel kaba yemlerin dışında alternatif veya tamamlayıcı kaba yemlerin hayvan beslemede kullanılmasıdır.

Ülkemiz, gerek kültüre alınan gerekse doğada serbest halde bulunabilen alternatif yem bitkileri olarak tanımlayabileceğimiz birçok farklı bitki türüne ev sahipliği yapmaktadır (Girginer, 2023). Bu yemlerin küçük ve büyükbaş hayvan beslemede kullanılması, geleneksel olarak kullanılan kaba yemlerin maliyetini azaltması ve yem tüketiminin artırılması bakımından oldukça değerlidir. Nitekim işletme sahiplerine yem çeşitliliği sağlamak ve farklı vejetasyonda yetişmeleri nedeniyle üreticiye destek olmaları açısından yardımcı olacağı da bildirilmektedir (Demircioğlu Topçu, 2022). Ayrıca bu kaba yemlerin bazılarının tamamen doğal koşullara bağlı olarak yetişmesi, su stresine karşı dayanıklı olması, yüksek rakımda yetişiyor olması gibi özellikleri bu otları ön plana çıkarmaktadır.

Yörede doğal yayılım gösteren ve halk arasında evelik otu olarak isimlendirilen *Rumex acetosella* otu, saplardan oluşan ve ara ara çiçek açan çok yıllık otsu bir bitkidir. Saplari kırmızımsı sırtlarla ince ve dik gelişen bir bitki olup saplari üst kısımda dallanmaktadır. Mart ayından Kasım ayına kadar çiçek açabilen kırmızı veya sarımsı yeşil çiçekler üretmektedir. Yöre halkı tarafından yemeklerin hazırlanmasında garnitür, salata yeşili ve peynir için pıhtılaştırıcı madde dahil olmak üzere çeşitli şekillerde kullanıldığı bildirilmektedir (Keser ve ark., 2022; Tuncay & Karaiçin, 2019). Evelik otu'nun Türkiye'de kozmopolit bir tür olduğu hem kırsal hem de doğal alanlara uyum sağlama yeteneği ile ülkemizde 28 tür ve 7 melezi bulunduğu bildirilmiştir (Keskin & Severoğlu, 2023). Evlik otu'nun geniş getiren hayvanların beslenmesinde kullanılabilirliğine ait sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan birisi, Bilal ve ark. (2023)'nin evelik (*Rumex acetosella*) otunun, kuzu rasyonlarında artan seviyelerde yonca kuru otu yerine kullanımının araştırılması olup yapılan çalışmada evelik otunun kuzu rasyonlarında kullanılmasının gerçek sindirilebilir kuru madde (GSKM) düzeyini artırdığı bildirilmiştir. Alternatif yemler, genel olarak besin madde kompozisyonu bakımından büyük farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle yem değeri analizinin yapılması bu konuda farklılıkları ortaya koymak açısından önemlidir. Ayrıca hayvanlara dengeli, düşük maliyetli diyetlerin verilebilmesi için yemlerin protein, enerji düzeylerinin de bilinmesi gerekmektedir (Lardy ve ark., 2022).

Bu çalışmada, ruminant hayvan beslemede alternatif veya tamamlayıcı olabilecek evelik otunun besin madde kompozisyonu, yem değeri ve in vitro sindirim özellikleri belirlenerek, hayvan beslemede geleneksel olarak tüketilen yonca ve korunga ile karşılaştırılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu'nun 2024/02-04 sayılı kararı ile onaylanmıştır. Araştırmada yem materyali olarak Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüs alanında doğal olarak yetişen

EO ile yörede geleneksel olarak kullanılan YKO, KO kullanılmıştır. Tüm kaba yemler 2023 yılı Temmuz ayında biçildikten sonra laboratuvar ortamına getirilerek havada kurutulmuştur. Daha sonra 1 mm'lik elekten geçirilerek besin madde analizleri için hazır hale getirilmiştir.

Araştırmada kullanılacak yemlerin ham besin madde içerikleri (kuru madde, ham kül ve ham protein) AOAC (2010)'e, ADF ve NDF analizleri ise Van Soest ve ark. (1991)'a göre yapılmıştır.

Yemlerin kaba yem kalitesinin belirlenmesinde nispi yem değeri (NYD) indeksi kullanılmıştır. Kaba yemlerin değerlendirilmesi ve pazarlamasında bir araç olarak kullanılan nispi yem değerinin belirlenmesi için öncelikle tahmini sindirilebilir kuru madde (SKM) miktarının belirlenmesi gerekmektedir olup aşağıdaki formül esas alınarak NYD indeksi Rivera & Parish (2010)'a göre aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$Kuru\ madde\ sindirilebilirliği\ (KMS,\ %) = 88.9 - (0.779 \times \%ADF) \quad (1)$$

$$Kuru\ madde\ tüketimi\ (KMT,\ \%CA) = 120(\%NDF) \quad (2)$$

$$Nispi\ yem\ değeri\ (NYD) = (KMS \times KMT) / 1.29 \quad (3)$$

Kaba yem kalitesinin belirlenmesinde "The Hay Marketing Task Force of the American Forage and Grassland Council" tarafından yapılan sınıflandırmaya göre NYD bakımından yemlerde "5" (<75) reddedilecek düzeyde kötü kaliteyi; 75-86 arası 4. kaliteyi; 87-102 arası 3. kaliteyi; 103-124 arası 2. kaliteyi; 125-151 arası iyi kaliteyi ifade ederken, "prime" (>151) ise en iyi kaliteyi ifade etmektedir.

İN vitro sindirim değerlerinin belirlenmesinde 4 adet kavanozu bulunan ve yapay rumen ortamı sağlayan Ankom DaisyII- D220 inkübatör cihazı kullanılmıştır. İnkübasyonda her bir yem maddesinden 22'şer adet yem örneği, her bir inkübasyon kavanozu için 3 adet kör olmak üzere toplamda 100 adet F57 filter bag torbalarına 0.5 g örnek tartılarak hazırlanmıştır. Yapay rumen ortamını sağlayacak tampon çözelti için tükrük fonksiyonunu göreceğ iki ayrı solüsyon (A ve B solüsyonları) hazırlanmıştır. Bu solüsyonlar 1/5 oranında olacak şekilde karıştırıldıktan sonra DaisyII inkübatörüne yerleştirilmiş ve cihaz 39°C sıcaklığa sabitlenerek çalıştırılmıştır. İN vitro inkübasyonda kullanılan rumen sıvısı, Van ilinde hizmet veren özel bir mezbahaneye kesime gelen ve kaba yem ağırlıklı olarak beslenen 2 adet küçükbaş hayvandan sabahın erken saatinde alınmıştır. Rumen sıvıları hemen iki kat steril tülbenkten süzölmüş 39°C su içeren termobox içinde optimum koşullar sağlanarak laboratuvara getirilmiştir. Daisy inkübatöründe her bir kavanoza 2 lt'lik inkübasyon sıvısı (1600 mL tampon solüsyonu + 400 mL rumen sıvısı) CO₂ gazı eşliğinde ilave edilmiş ve cihaz 39°C sıcaklığa sabitlenerek çalıştırılmıştır. İnkübasyonun 48. saatinde kavanozlardan çıkarılan örnekler çeşme suyu ile yıkanmış ve 105°C'de etüvde 3 saat kurutularak tartım sonuçları alınmıştır. Yemlerin *in vitro* gerçek kuru madde ve organik madde sindirilebilirliği ANKOM metodu (DaisyII-200/220 Incubator Operator's Manual) kullanılarak aşağıdaki formül uygulanarak hesaplanmıştır:

$$\%İVGS = 100 - ((W3 - (W1 \times C1)) \times 100 / W2) \quad (4)$$

Burada; W1: F57 torbaların darası, W2: Kuru örnek veya kuru örnekteki besin madde miktarı (NDF), W3: NDF çözeltisinden çıkmış rezidüdeki besin madde miktarı, C1: Kör ağırlığı (inkübasyon sonrası etüvde kurutulan boş torba ağırlığı/orijinal torba ağırlığı) ifade etmektedir.

Araştırma sonucunda elde edilen verilerin istatistik analizi için tesadüf parselleri deneme deseninde tek yönlü varyans analizi (One-way ANOVA) uygulanmıştır. Her bir yem maddesinin besin madde kompozisyonu, yem değeri ve in vitro sindirim değerleri arasındaki ilişkilerinin belirlenmesinde varyans analizi, farklılıkların belirlenmesinde ise Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Analiz SAS 9.4 (SAS, 2014) paket programı kullanılarak yapılmıştır.

3. Bulgular

Yapılan çalışmadan elde edilen bulgulara göre, EO'nun ham besin madde içerikleri belirlenmiş olup hayvan beslemede geleneksel olarak kullanılan YKO ve KO ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 1). Buna göre; ham besin madde içeriği bakımından kaba yemler arasındaki farklılıklar önemli bulunmuştur (P<0.001). Çalışmada EO'nun KM içeriği (%90.84), YKO'ndan (%91.13) düşük, KO'ndan (89.73)

yüksek elde edilmiştir. Evelik otu'nun HK içeriği %14.93 olup oldukça yüksek bulunmuştur. Bu nedenle kuru madde ve ham kül içeriği arasındaki farktan hesaplanan OM içeriği, YKO ve KO ile kıyaslandığı zaman düşük elde edilmiştir. Evelik otunun HP içeriği %26.87 olarak belirlenirken, bu değer YKO'nda %19.02, KO'nda ise %13.58 olduğu görülmüş ve EO'nun HP içeriğinin diğer kaba yemlere kıyasla oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada NDF ve ADF içerikleri geleneksel kaba yemlerden önemli farklılık göstermiştir. Evelik otunda belirlenen NDF ve ADF içerikleri sırasıyla (%31.18-12.67), YKO (%35.01-25.03) ile KO'ndan (%39.97-28.33) oldukça düşük olduğu belirlenmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Evelik otunun YKO ve KO ile karşılaştırılması (%)

	EO	YKO	KO	P
	$\bar{x} \pm S \bar{x}$	$\bar{x} \pm S \bar{x}$	$\bar{x} \pm S \bar{x}$	
KM	90.84±0.01b	91.13±0.01a	89.73±0.01c	<0.001
OM	75.90±0.01c	83.28±0.01b	83.33±0.02a	<0.001
HK	14.93±0.01a	7.85±0.02b	6.43±0.04c	<0.001
HP	26.87±0.21a	19.02±0.55b	13.58±0.09c	<0.001
NDF	31.18±0.31c	35.01±0.21b	39.97±0.13a	<0.001
ADF	12.67±0.08c	25.03±0.04b	28.33±0.32a	<0.001

KM: Kuru madde; OM: Organik madde; HK: Ham kül; HP: Ham protein; NDF: Nötr deterjanda çözünmeyen lif; ADF: Asit deterjanda çözünmeyen lif

Araştırmada kullanılan evelik otuna ait KMS, KMT ve NYD değerleri ile kaba yem değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, EO'nun en yüksek %KMS, %KMT ve NYD içeriklerine sahip olduğu görülmektedir. En yüksek NYD değeri, EO'ndan (209.40) elde edilmiş olup bunu YKO (184.50) ve KO (155.23) izlemiştir. Aynı zamanda EO, kaba yem kalitesi bakımından YKO ve KO gibi en iyi kalitede yer almıştır.

Çizelge 2. EO'nun kaba yem kalite sınıfı ve NYD'nin YKO ve KO ile karşılaştırılması

Kaba yemler	N	%KMS	%KMT	NYD	Kaba yem sınıfı
		$\bar{x} \pm S \bar{x}$	$\bar{x} \pm S \bar{x}$	$\bar{x} \pm S \bar{x}$	
Evelik otu	6	79.48±0.24a	3.45±0.01a	209.40±0.29a	En iyi kalite
YKO	6	69.47±0.05b	3.45±0.01a	184.50±0.21b	En iyi kalite
KO	6	66.77±0.03c	3.02±0.01a	155.23±0.18c	En iyi kalite
P-değeri		<0.001	<0.001	<0.001	

KMS: Kuru madde sindirilebilirliği, KMT: Kuru madde tüketimi, NYD: Nispi yem değeri

Evelik otunun İVGS_{YEM}, İVGS_{KM} ve İVGS_{OM} sonuçları YKO ve KO ile karşılaştırılmıştır. Evelik otunun in vitro sindirimine ait incelenen tüm parametreler YKO ve KO'ndan yüksek bulunmuştur (Çizelge 3; P<0.001). Evelik otunda İVGS_{YEM} değeri, ham besin madde sonuçları ile uyumlu bir şekilde %92.73 olarak belirlenmiş olup bu değer YKO'nda %75.33, KO'nda ise %71.16 olarak elde edildiği görülmüştür. Evelik otunun üstünlüğü ile belirlenen bu sonuçlar İVGS_{KM} ve İVGS_{OM} değerlerinde de paralellik göstermiştir.

Çizelge 3. Evelik otunun in vitro gerçek sindirim parametrelerinin YKO ve KO ile karşılaştırılması, % KM

Kaba yemler	İVGS _{YEM}	İVGS _{KM}	İVGS _{OM}
	$\bar{x} \pm S \bar{x}$	$\bar{x} \pm S \bar{x}$	$\bar{x} \pm S \bar{x}$
Evelik otu	92.73±0.64a	92.00±0.70a	90.42±0.84a
YKO	75.33±0.53b	72.93±0.59b	70.38±0.64b
KO	71.16±0.70c	67.86±0.78c	65.38±0.84c
P-değeri	<0.001	<0.001	<0.001

İVGS_{YEM}: İn vitro gerçek sindirim; İVGS_{KM}: İn vitro gerçek kuru madde sindirimi; İVGS_{OM}: İn vitro gerçek organik madde sindirimi

4. Tartışma ve Sonuç

Evelik otunun yem değerini ortaya koymak amacıyla yapılan bu çalışmada, YKO ve KO ile karşılaştırılmıştır. Literatür araştırması sonucunda bu konuda birkaç tane dışında çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla karşılaştırmalar en yakın kaba yemlere göre kıyaslanmıştır. Ham besin madde içeriklerine ait sonuçlar incelendiğinde, EO'nun KM içeriği YKO'ndan düşük KO'ndan yüksek bulunmuştur (Çizelge 1). Yemlerin KM ve HK içeriklerinden hesaplanan OM içerikleri ise YKO ve KO'na göre EO'nda düşük bulunmuştur. Besin maddelerinin OM içerikleri arasındaki farklılıkta, HK içeriği önemli rol oynamaktadır. Nitekim evelik otundan elde edilen HK içeriği (% 14.93) YKO (% 7.85) ve KO'ndan (% 6.43) oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Ham kül içeriğinin, bitkinin bünyesindeki mineral maddeler ve bitkide bulaşık olan topraktaki mineral maddelerin toplamı (Weiss, 2019), yemdeki makro ve mikro mineral madde içeriğinin toplamı olduğu belirtilmektedir (Kavut & Soya, 2012). Nitekim bitkilerdeki HK içeriğindeki farklılık yem bitkisinin türü, gübreleme ve sulama, toprak yapısı, iklim, hasat zamanı, bitkinin toprakla bulaşma durumu, çevre koşulları ve bitkinin yetiştirildiği çevre koşullarına bağlı olarak da değişmektedir (Kılıç & Abdiwali, 2016). Kılıç (2006), bitkilerdeki HK içeriğinin %17'nin üzerinde olmasının yemin çeşitli nedenlerle kirlenmiş olabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmada evelik otuna ait HK değerinin yüksek elde edilmesi nedeniyle HCl'de çözünmeyen kül analizi yapılmıştır. Ham kül içerisindeki gerçek kül içeriği ve kumlu maddeler hakkında fikir vermesi açısından yapılan analiz sonucu EO'nda HCl'de çözünmeyen kül miktarı KM'de 0.57 olarak bulunmuştur. Evelik otu'nda bulunan yabancı cisimlerin %1'in altında kaldığı görülmekte olup yüksek HK içeriğinin bitkinin türü ile ilgili olduğu söylenebilir. Evelik otuna ait bu değer, Bilal ve ark. (2023)'nin elde ettikleri değerden düşük bulunmuştur.

Çalışmada kullanılan evelik otunun HP içeriği YKO ve KO'na göre oldukça yüksek elde edilmiştir (Çizelge 1). Yonca kuru otu bilindiği üzere, baklagil otları içerisinde en yüksek HP içeriğine sahip otlar arasındadır. Genellikle hayvan beslemede düşük proteine sahip yemlerle karıştırılarak bu hayvanların rasyonları dengelenmektedir. Yapılan çalışmada doğada serbest yetişen evelik otunun YKO'ndan daha yüksek HP içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Kaba yemlerin HP düzeylerinin türe, vejetasyon dönemine, iklim ve toprağın azot düzeyine bağlı olarak farklılıklar gösterebildiği belirtilmiştir (Çelik & Selçuk, 2019). Yapılan çalışmada doğada serbest halde yetişen EO'un protein içeriğinin yüksek olması nedeniyle hayvan beslemede kullanımının tavsiye edilebileceği, protein kaynağı bir yem maddesi olarak da anılabileceği görülmüştür. Nitekim ruminantlarda mikrobiyal aktivitenin normal olarak devam edebilmesi için rasyonun HP değerinin %7'nin üzerinde olması gerektiği belirtilmektedir. Bu düzeyin altındaki HP miktarı rumende mikroorganizmalar tarafından sağlanan protein sentezini olumsuz yönde etkilediği bildirilmektedir (Cappelozza, 2013).

Bitki hücre duvarı unsurları bakımından elde edilen sonuçlar incelendiğinde, EO'nun NDF ve ADF içeriklerinin kıyaslanan kaba yemlere göre düşük olduğu görülmüştür (Çizelge 1). Çalışmada incelenen EO'nun hücre duvarı unsurlarından NDF ve ADF değerleri sırasıyla, %31.18-%12.56 iken bu değer YKO'nda %35.01-%25.03, KO'nda ise %39.97-%28.33 olarak belirlenmiştir. Ateş (2012), ADF'nin bitkinin sindirilebilirliğinin, NDF'nin ise hayvanlar tarafından alınabilirliğinin bir göstergesi olduğunu, yemlerde ADF oranının % 30 ve altında, NDF oranının ise % 40 ve altında olması gerektiğini bildirmişlerdir. Buna göre çalışmada yem değeri araştırılan EO ve karşılaştırılan YKO ile KO'nun NDF ve ADF düzeylerine ilişkin tüm sonuçlar bildirilen değerlerden düşük elde edilmiştir. Bitkilerin yapısal karbonhidrat içeriklerinin, ilerleyen vejetasyon ile birlikte miktarının da arttığı ve yüksek ADF içeriğinin düşük sindirilebilirlik ölçüsü olarak kabul edildiğinden EO'nda belirlenen ADF içeriğinin sindirilebilirlik açısından olumlu bir sonuç doğurduğu söylenebilir. Evelik otunun ADF değerinin, Gemalmaz & Bilal (2016)'nin alternatif kaba yem kaynaklarına ait ADF düzeylerinin verildiği değerlerden düşük elde edildiği görülmüştür.

Evelik otunun yem değerinin araştırıldığı çalışmada, YKO ve KO ile karşılaştırılması sonucu en yüksek NYD'nin bu kaba yemden elde edildiği bunu YKO ve daha sonra KO'nun takip ettiği görülmektedir (Çizelge 2). Her 100 çiçekteki yoncanın %'de ifade edildiği ve tam çiçekteki yoncanın 100 olarak kabul edildiği yem değeri indeksinde yapılan hesaplamada, her ne kadar YKO ve KO'nun da en iyi kalite kaba yem sınıfında olduğu görülmekte ise de, EO'nda bu değer oldukça yüksek bulunduğu görülmektedir. Evelik otundan elde edilen yüksek NYD, KMT, KMS içerikleri, bitkinin NDF ve ADF içeriklerinden dolayı yüksek elde edilmiş olup bu otun en iyi kalite yem sınıfında tercih edilebileceği söylenebilir.

Ruminantların beslenmesinde kaba yemlerin besleme değeri ile yemlerin besin maddelerinin sindirilebilirlikleri yakından ilişkilidir. Ayrıca kaba yemlerin türü ve kalitesi rumende yaşayan mikroorganizma aktivitesini de etkilediği için yemlerin sindirilebilirliğinde önemli rol oynamaktadır. Araştırmada ANKOM Daisy in vitro fermentasyon sistemi ile EO'nun İVGS_{YEM}, İVGS_{KM} ve İVGS_{SOM} değerleri belirlenerek YKO ve KO ile karşılaştırılmıştır. Evelik otunun, YKO ve KO'na kıyasla incelenen parametreler bakımından üstünlük sağladığı görülmüştür (Çizelge 3). Kaba yemlerin bünyesinde bulunan hemiselüloz, selüloz, pektin, lignin, β-glukan gibi yapısal karbonhidratların miktarı yanında bitki çeşidi, bitkinin aksamı, vejetasyonu, biçim zamanı, iklim, toprak yapısı, hasat zamanı gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir (Çelik, 2018). Bilal ve ark. (2023), kuzu rasyonlarında artan düzeylerde EO ilavesinin araştırıldığı çalışmada, 1 birim EO ilave edilmesiyle gerçek sindirilebilir kuru madde miktarını 0.0187 mg arttığı bildirilmiştir. Çalışmada, YKO'nun in vitro gerçek sindirim değerleri Örün & Erdoğan (2022)'nin çalışmaları ile uyum göstermiştir. Yapılan çalışmada EO'nun in vitro gerçek sindirim değerleri kıyaslanan YKO ve KO'na göre oldukça yüksek elde edilmiştir. Bu sonuç, EO'nun yapısal karbonhidrat seviyelerindeki farklılıktan kaynaklandığı ve yapısal karbonhidratlardaki farklılıkların in vitro sindirim parametrelerindeki değişimlerde etkili olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, son yıllarda hayvancılığın sürdürülebilirliği açısından kaba yem açığını giderme konusunda doğal yem kaynaklarından umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Bu sayede hayvanlara yönelik dengeli, en az maliyetli diyetlerin verilmesi hayvan besleme açısından oldukça kıymetlidir. Nitekim kaliteli kaba yemlerin geviş getiren hayvanlara düzenli olarak karşılanması gerekmektedir. Bu nedenle, çalışmanın yem materyalini oluşturan evelik otu; HP içeriğinin oldukça yüksek, ADF ve NDF içeriğinin düşük olduğu dikkate alındığında, kaliteli bir kaba yem olarak belirlenmesinin yanı sıra iyi kalitede protein kaynağı olarak da görülebilir. Ayrıca geleneksel kaba yemlere alternatif veya tamamlayıcı olabilecek yem kalitesine sahip olup doğada serbest halde yetişen bu otun kültüre alınarak verim özelliklerinin araştırılması sürdürülebilir bitkisel ve hayvansal üretim açısından önemlidir.

Kaynakça

- AOAC. (2010). *Official methods of analysis* (AOAC-18th Edition). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemistry.
- Ateş, E. (2012). The mineral, amino acid and fiber contents and forage yield of pea (*Pisum arvense* L.), fiddleneck (*Phacelia tanacetifolia* Benth.) and their mixtures under dry land conditions in the Western Turkey. *Romanian Agricultural Research*, 29, 237-244.
- Bilal, Y., Bakır, T., & Selçuk, B. (2023). Evelik otunun (*Rumex Acetosella*) Kuzu rasyonlarına ilavesinin sindirim derecesine ve fermantasyon parametrelerine etkisinin in vitro gaz üretim tekniği ile belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 26(4), 911-918. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1195753>
- Cappellozza, B. I. (2013). *Protein nutrition for cattle*, Beef103. Oregon State University.
- Çelik, H. (2018). *Karambanın fiğ otu ve yonca otu ile farklı oranda karışımlarının in vitro gerçek sindirilebilirliğinin belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Samsun, Türkiye.
- Çelik, H., & Selçuk, Z. (2019). Determination of in vitro true digestibilities of different rates of vetch hay and alfalfa hay with caramba. *Van Veterinary Journal*, 30(3), 145-149. <https://doi.org/10.36483/vanvetj.478518>
- Demircioğlu Topçu, G. (Eds.). (2022). *Alternative forage crops-I*. İksad.
- Gemalmaz, E., & Bilal, T. (2016). Alternatif kaba yem kaynakları. *Lalahan Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 56(2), 63-69.
- Girginer, B. (2023). *Türkiye'nin bölgelerine göre endemik bitki türleri*. Webargon. Erişim tarihi: 04.03.2024. <https://www.webagron.com/turkiyenin-bolgelerine-gore-endemik-bitki-turleri/>
- Kavut, Y. T., & Soya, H. (2012). An investigation on the silage quality characteristics of some maize (*Zea mays* L.) cultivars under aegean region conditions. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 49(3), 223-227. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.69692>
- Keser, F., Karatepe, M., Keser, S., Tekin, S., Türkoğlu, İ., Kaygılı, O., ... & Kırbağ, S. (2022). *Rumex acetosella* L.(Kuzukulağı)'nın İn vitro antiradikal, antimikrobiyal, antikanser ve fitokimyasal özellikleri. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 683-692. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.994208>

- Keskin, M., & Severoğlu, Z. (2023). Distribution of polygonaceae family in Türkiye. *International Journal of Agriculture, Forestry and Life Sciences*, 7(1), 1-5.
- Kılıç, A. (2006). *Kaba yemlerde niteliğin saptanması*. Hasad Yayıncılık.
- Kılıç, Ü., & Abdiwali, M. A. (2016). Alternatif kaba yem kaynağı olarak şarapçılık endüstrisi üzüm atıklarının *in vitro* gerçek sindirilebilirlikleri ve nispi yem değerlerinin belirlenmesi. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 22(6), 895-901.
- Koyuncu, M., & Nageye, F. (2020). İklim değişikliğinin sürdürülebilir hayvancılığa etkileri. *Journal of Animal Production*, 61(2), 157-167. <https://doi.org/10.29185/hayuretim.673145>
- Lardly, G., Anderson, V., Dahlen, C., & Carlson, Z. (2022). *Alternative feeds for ruminants*. NDSU Extension. Erişim tarihi: 04.03.2024. <https://www.ndsu.edu/agriculture/extension/publications/alternative-feeds-ruminants>
- Örün, M., & Erdoğan, S. (2022). Determination of *in vitro* true digestibility and relative feed values of alternative roughage sources. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 32(3), 576-583. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1103508>
- Rivera, D., & Parish, J. (2010). *Interpreting forage and feed analysis report*. Erişim tarihi: 15.05.2024. <http://extension.msstate.edu/publications/publications>
- SAS. (2014). *SAS/STAT Software Hangen and Enhanced* (9.4 version) [Computer software].
- Sevinç, G., Şahin, Z., & Aydoğdu, M. H. (2022). Türkiye'nin küçükbaş hayvan varlığı ile süt üretimindeki gelişmelerin son dönemlerdeki trend analizi. *Academic Social Resources Journal*, 7(35), 377-384. <http://dx.doi.org/10.29228/ASRJOURNAL.57885>
- Tuncay, E., & Karaipçin, M. Z. (2019). Siirt yöresinde sebze olarak tüketilen bazı yabancı otlar. *Ejoms International Journal*, 3(11), 119-134.
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74, 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Weiss, B. (2019). *Feeding high ash forages*. Erişim tarihi: 05.10.2020. <https://www.forages.osu.edu/news/feedinghigh-ash-forages>



Review Article

The Anticancer Potential of Van Lake Basin Plants[†]

Gül GÖRMEZ

Van Yuzuncu Yil University, Health Sciences Faculty, Nutrition and Dietetics Department, 65100, Van, Türkiye
Gül GÖRMEZ, ORCID No: 0000 0001 6980 4988

*Corresponding author e-mail: gulgormez@yyu.edu.tr

Article Info

Received: 16.02.2024
Accepted: 29.05.2024
Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1438150](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1438150)

Keywords.

Anticancer potential,
in vitro-in vivo study,
Medicinal plant,
Van Lake Basin

Abstract: For centuries, people have used plants for various needs, as well as for treating diseases. Due to the fact that synthetic drugs damage other organs of the body while treating diseases, the demand for herbal resources has been increasing in recent years. Cancer, a disease whose cases and death rates are quickly rising, is now and, the second leading cause of death just behind the cardiovascular diseases. The toxicity of modern chemotherapy and the resistance of cancer cells to anticancer agents have led the scientific world to search for new treatments and prevention methods for this insidious disease. The therapeutic properties of plants, which generally do not have significant side effects, are associated with biologically active organic compounds, and the geochemical composition of the region where they grow. Van Lake Basin has a rich plant diversity thanks to its climate, geographical features, and soil content. This region is home to many medicinal plant species used by humans but have not yet been studied, and their phytochemical structures are still not fully elucidated. Although humans have used these plants for centuries, as inherited from ancestors, studies are required to prove their therapeutic effects *in vivo* and *in vitro*. This study presents the anticancer potentials of some crucial plants (*Eryngium billardieri*, *Cichorium intybus*, *Bongardia chrysogonum*, *Bryonia multiflora*, *Euphorbia macroclada*, *Scutellaria orientalis*, *Plantago major*, *Primula auriculata*) reported to be used in treating various diseases in the Van Lake Basin by analyzing the *in vitro* and *in vivo* anticancer studies conducted with the same plants in the literature.

Van Gölü Havzası Bitkilerinin Antikanser Potansiyeli

Makale Bilgileri

Geliş: 16.02.2024
Kabul: 29.05.2024
Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1438150](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1438150)

Anahtar Kelimeler

Antikanser potansiyel,
in vitro-in vivo çalışma,
Tıbbi bitki,
Van Gölü Havzası

Öz: İnsanlar yüzyıllar boyunca bitkileri çeşitli ihtiyaçlarının yanı sıra hastalıkların tedavisinde de kullanmışlardır. Sentetik ilaçların hastalıkları tedavi ederken vücudun diğer organlarına zarar vermesi nedeniyle son yıllarda bitkisel kaynaklara olan talep giderek artmaktadır. Görülme sıklığı ve ölüm oranı hızla artan bir hastalık olan kanser, günümüzde kalp ve damar hastalıklarından sonra ikinci sırada yer almaktadır. Modern kemoterapinin toksisitesi ve kanser hücrelerinin antikanser ajanlara karşı direnç göstermesi, bilim dünyasını bu sinsi hastalık için yeni tedavi ve korunma yöntemleri aramaya yöneltmiştir. Genellikle önemli yan etkileri olmayan bitkilerin tedavi edici özellikleri, biyolojik olarak aktif organik bileşikler ve yetiştikleri bölgenin jeokimyasal bileşimi ile ilişkilidir. Van Gölü Havzası, iklimi, coğrafi özellikleri ve toprak içeriği sayesinde zengin bir bitki çeşitliliğine sahiptir. Bu bölge, insanlar tarafından kullanılan ancak henüz araştırılmamış birçok tıbbi bitki türüne ev sahipliği yapmaktadır ve

[†] Presented at the International Vision Van Congress on 8-9 February, 2024 in Van Yuzuncu Yil University

fitokimyasal yapılarının hala tam olarak anlaşılması gerekmektedir. Her ne kadar insanlar, atalarından gördükleri gibi bu bitkileri yüzyıllardır kullanmış olsalar da, *in vivo* ve *in vitro* terapötik etkilerini kanıtlamak için çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışma, Van Gölü Havzası'nda çeşitli hastalıkların tedavisinde kullanıldığı bildirilen bazı önemli bitkilerin (*Eryngium billardieri*, *Cichorium intybus*, *Bongardia chrysogonum*, *Bryonia multiflora*, *Euphorbia macroclada*, *Scutellaria orientalis*, *Plantago major*, *Primula auriculata*) antikanser potansiyellerini, literatürde aynı bitkilerle yapılan *in vitro* ve *in vivo* antikanser çalışmalarını analiz ederek sunmaktadır.

1. Introduction

Ancient civilizations, which left essential traces on the stage of history, not only used plants for therapeutic purposes but also left this vital knowledge as a rich heritage to the next generations. Archaeological materials and inscriptions show that plants have been used to treat diseases since the Chipped Stone Age. Akkadian, Sumerian, and Assyrian inscriptions, Indian, Chinese, Egyptian, Greek, Seljuk, and Ottoman documents mention using plants for therapeutic purposes. The World Health Organization (WHO) reports that approximately 80% of the world's population tries to solve their health problems with herbal remedies in the first place. While 4,000 of these are widely used, 2,000 medicinal plants are traded worldwide, and 500 are in Western Europe. In the USA, 75 percent of the herbal medicines still traded are obtained from research on plants used by the public (Kaya, 2010). In addition, approximately 25 percent of prescription drugs in developed countries are composed of active ingredients of herbal origin (reserpine, aspirin, quinine, vinblastine, etc.) (Yaşar et al., 2021). Ethnobotanical knowledge from ancient times to modern times comes to the fore in this case, and the use of medicinal plants gains importance. In the Lake Van basin, home to great civilizations that have left their mark on history for thousands of years due to its geographical location, dozens of plant species are used in folk medicine and whose chemical content is waiting to be unearthed. However, scientific studies have not been carried out sufficiently on them.

Cancer is a disease with a rapidly increasing incidence and mortality rate. Although it was ranked 7th-8th in the list of diseases causing death at the beginning of the century, today, it has risen to second place after cardiovascular diseases in many countries (Bozyel et al., 2019). The disease is characterized by the continuous uncontrollable proliferation of cells in the human body. According to the International Agency for Research on Cancer (IARC), there were approximately 10 million new cancer cases in 2020, and one in every six deaths was caused by cancer (Ferlay et al., 2021). The resistance of cancer cells to anticancer drugs and the toxicity of contemporary chemotherapy have led the scientific world to search for novel approaches to treating and preventing this devious sickness. It has been demonstrated that eating plants high in phenolics, which are vital active components, reduces oxidative damage to DNA, which could be an essential initial stage in the development of several cancers (Nichenametla et al., 2006). Today, many drugs such as paclitaxel used in cancer treatment are active ingredients obtained from plant sources. Carcinogen suppression, antiproliferation, cell cycle suspension, apoptosis induction and differentiation, the inhibition of angiogenesis, antioxidation, and a decrease in multidrug resistance are some of the ways that plant compounds demonstrate their anticancer effects (Vauzour et al., 2010). The most current treatments for the disease are chemotherapy, radiotherapy, and chemical drugs. However, chemotherapy causes too many side effects in patients and causes more damage to their health, leading scientists to alternative treatments and therapies against cancer. More than 3000 plants worldwide have been reported to have anti-cancer properties (Seca & Pinto, 2018). Determining the effect of herbal drugs *in vitro* and *in vivo* is recognized as the most effective preliminary study against cancer worldwide.

The climate, geographical characteristics, and soil content provide people living in the Lake Van basin with a rich source of medicinal plants and folk medicine knowledge that they have used for centuries (Özgökçe & Özçelik, 2004). Many plants used in folk medicine in this region and their intended uses have been reported in previous studies (Özgökçe & Özçelik, 2004; Mükemre et al., 2016; Dalar & Mükemre, 2020). The focus of botanical culture research is to contribute to finding solutions to health, hunger, and environmental problems. For this reason, the study should not only be limited to listing the local names and usage patterns of plants used in folk medicine. At the same time, it should

evaluate the wide-range use of plants and their consequences for the benefit of society from a sustainable development perspective. Reviewing the use of plants in traditional medicine and assessing this information with modern scientific insights can yield valuable discoveries (Sharma et al., 2022). Such studies are crucial for identifying potential medicinal sources rather than inventing new drugs. They also play a crucial role in maintaining traditional botanical knowledge within fast-evolving societies and pinpointing plants that could be used for therapeutic purposes in the future.

Studies on randomly selected plants based on biological activity can guide the discovery of effective compounds or extracts (Ashraf et al., 2020). Worldwide success has been achieved in the hunt for natural anticancer drugs; active ingredients have been identified and are currently used to treat human carcinomas (Yu et al., 2016). Understanding herbal medicine helps direct the search for plants that may have cytotoxic properties. In drug development studies, instead of examining plants only in terms of a single activity, investigating them with screening studies in which different activities are monitored shows that they may be effective for treating different unexpected diseases (Deng et al., 2017).

Because the area around Lake Van is surrounded by high mountains and the winter season is long and snowy, hundreds of years ago, the local people could not easily reach health institutions and medical equipment. So, they used the plants around them in the treatment of diseases and created an oral library of medicinal plant use (Tabata et al., 1994). These medicinal plants, which have been unearthed with significant research, need to be supported by *in vivo* and *in vitro* studies on cancer prevention and treatment, which ranks second among the causes of death in the world. Because of their low side effects, plants are the most commonly used materials in drug development studies against cancer. Due to their long-standing use in folk medicine, the plants of the Lake Van basin offer significant potential for cancer disease research.

Lake Van Basin covers 2.5 percent of Turkey's total area, approximately 17.964 km². The elevation of the basin land starts from 1600 m. above the sea and rises to over 4000 m. There are many mountains and hills with peaks between 2000 and 3000 m. Among these mountains, dominated by steppe vegetation, there are plains such as Van, Hoşap, Gürpınar, and Özalp Plain. The region has a continental climate. Summers are especially short, and springs are almost nonexistent (Turkish Ministry of Agriculture and Forestry, 2021).

People living in the Lake Van basin utilize the plants growing around them to treat many diseases, besides cancer. However, no study in the literature reviews the *in vitro* and *in vivo* anticancer potential of the plants used to treat different diseases in folk medicine in the Van Lake Basin. This study will likely fill this literature gap and raise awareness about these valuable plants. In this way, it is also believed that further studies against cancer will be encouraged with these plants, which are abundant in the Lake Van Basin and have the potential to be active ingredients in cancer drugs. Due to their critical active ingredients and mechanisms of action, this study focused on the following plants: *Eryngium billardieri* Delar., *Cichorium intybus* L., *Bongardia chrysogonum* L., Spach, *Bryonia multiflora* Boiss. & Heldr., *Euphorbia macroclada* Boiss., *Scutellaria orientalis* L., *Plantago major* L., and *Primula auriculata* Lam.

2. Some important anticancer plants growing in Lake Van Basin

2.1. *Eryngium billardieri* Delar. (Bull thorn, Apiaceae Family)

Eryngium billardieri Delar. is a perennial herbaceous plant with important hepatoprotective, antitumor, and apoptosis-inducing properties. It belongs to the Apiaceae family, which is one of the most prominent plant families in the world with a wide distribution in Iran, Turkmenistan, Turkey, Lebanon, Syria, Iraq, Afghanistan, and Pakistan (Yeşilada et al., 1989). It contains abundant phytosterols, triterpenoid saponins, flavonoids, ecdysteroids, coumarin derivatives, polyacetylenes, essential oils, and phenolic acids (Kikowska et al., 2022). Phytochemicals obtained from the root and above-ground parts of *Eryngium billardieri* are used against scorpion stings, in the treatment of rheumatism, urinary tract infections, goiter, sinusitis, and diabetes (Heidari et al., 2023), and among the people living in the Van Lake basin, it is used as an anti-inflammatory, in dental abscesses, influenza, gastric pain, wound healing and stomach cancer treatment (Dalar & Mükemre, 2020).

Apoptosis, an essential mechanism regulating pathways that control cell proliferation and death, is considered a targeted treatment strategy for tumor cells. Cyclin D1 gene, concentrated in various

carcinomas, plays a vital role in regulating cell progression of the cell cycle. Increased expression of the proapoptotic Bax gene, which can induce apoptosis via the intrinsic signaling pathway (also known as mitochondrial apoptosis), may cause therapeutic effects in cancer cells (Mohammadi et al., 2016). *Eryngium billardieri* has been reported to stop tumourisation by inducing apoptosis in various cancer cell lines thanks to the essential phytochemicals it contains. It has been reported that extracts prepared from the above-ground parts showed a cytotoxic effect on MCF7 (human breast cancer cell line) (Paşayeva et al., 2017) and significantly induced apoptosis in PANC-1 (pancreatic cancer) cell lines by increasing Bax and decreasing mRNA expression of cyclin D1 (Roshanravan et al., 2018).

2.2. *Cichorium intybus* L. (white chicory, bitter chicory, family Asteraceae)

Cichorium intybus L. (chicory) is a plant belonging to the Asteraceae family. In the Lake Van Basin, this plant is used in traditional medicine for the treatment of epilepsy, kidney stones, asthma, wound treatment, stomach ulcers, digestive system disorders, diuretics, and hypertension due to its numerous biological properties, including those that are antibacterial, antioxidant, and anti-inflammatory effects (Dalar & Mükemre, 2020). In addition to its local use, various *C. intybus* extracts are used worldwide because of their extensive range of health-promoting and pharmacological qualities, which include antibacterial, hepatoprotective, anti-protozoal, anti-hyperuricemia, anti-inflammatory, antioxidant, antinematodal, and antiproliferative effects (Khan et al., 2020).

Cichorium intybus extracts have been used against estrogen-positive breast cancer (MCF-7) (Dahab & Afifi, 2007), amelanotic melanoma (C32), prostate cancer (LNCaP), renal adenocarcinoma (ACHN) (Conforti et al., 2008), leukemia cells (Saleem et al., 2014), Ehrlich ascites carcinoma (Hazra et al., 2002), prostate cancer (PC-3) (Nawab et al., 2011), breast cancer cells (T47D and SKBR3) (Mehrandish et al., 2017) and leukemia (Esmailbeig et al., 2015). In addition, sesquiterpenes obtained from *Cichorium intybus* were reported to have a cytotoxic effect on ovarian cancer cells, and murine lymphoma (Zhou et al., 2012).

2.3. *Bongardia chrysogonum* (L.) Spach (crack grass, family Berberidaceae)

Bongardia chrysogonum L. Spach is a plant belonging to the Berberidaceae family which is reported to be used in treating epilepsy and hemorrhoids among people living in the Lake Van Basin (Dalar & Mükemre, 2020). Due to advances in modern medicine, tubers are used to treat prostatic hypertrophy, diabetes, gastrointestinal disorders, hypercholesterolemia, urinary tract infections, and hemorrhoids (Baydoun et al., 2015; Abuhamdah et al., 2017). This plant's tuber has been shown to have anticancer properties against human glioma, breast, and lung cancer cells. It has also been shown to have in vitro neuroprotective effects by cholinesterase enzyme inhibition (Gezici & Şekeroğlu, 2021). In addition, *Bongardia chrysogonum* (L.) Spach tubers contain phenols (bongardol and benzakalin), alkaloids (isoquinoline, lupine bongardamine, and bongardine), saponins (arabinofuranosyl, glucopyranosyl, hederagenin, leontoside and hederacoside) and triterpenoids (bongardol acetate), which are effective in Alzheimer's and cancer treatment (Baydoun et al., 2015; Ahmad et al., 2019). In a study published by Oran et al. (2022), *Bongardia chrysogonum* extracts showed an antiproliferative effect in human melanoma (WM136-1A) cancer cell lines. Dağlı et al. (2022) reported that *B. chrysogonum* decreased blood sugar levels after diabetes and reduced kidney damage in rats with diabetic nephropathy.

2.4. *Bryonia multiflora* Boiss. & Heldr. (ulongardia, family Cucurbitaceae)

Bryonia multiflora, used in treating diabetes and wounds in the Van region (Dalar & Mükemre, 2020), is an Archaeplastida species belonging to the Cucurbitaceae family. The perennial herbaceous plant *Bryonia multiflora* is dioecious and has a deeply rooted rhizome-shaped root. The roots of the plant contain steroidal saponosides, triterpenic saponosides and fixed oils, brionolic acid, triterpenic acids, cucurbitacin, lectins, flavonoids, and sterols, and hepatoprotective, cytotoxic, anti-inflammatory, purgative, and antitumoral activities have been reported for cucurbitacin (Miro, 1995). Similarly, plants that contain saponin have been shown to have a wide range of biological effects, including anticarcinogenic, hypocholesterolemic, anti-inflammatory, antiprotozoal, antimicrobial,

antihypertensive and antioxidant properties (Fidan & Dündar, 2007). It has been reported that in streptozotocin-induced diabetic rats, *Bryonia multiflora* extract can regenerate β -cells and has a preventive effect against tissue damage (Song et al., 2014), and has antidiabetic and antioxidant activity (Alkan et al., 2023).

Non-coding RNAs (ncRNAs), especially long non-coding RNAs (lncRNAs), have been shown to play a role in the regulation of most cancers and the control of the autophagy mechanism. *Bryonia multiflora* extract increased autophagy markers and decreased Bcl-2 levels in MDA-MB-231 and MCF-7 cells. Additionally, it has been noted to alter the transcription levels of different lncRNAs associated with autophagy (Zhang et al., 2017a).

2.5. *Euphorbia macroclada* Boiss. (Neblul, euphorbia, milkweed, family Euphorbiaceae)

The family Euphorbiaceae is one of the most prominent flowering plants, comprising more than 300 genera and 8000 species. The species of this genus, as well as the spurge family in general, are characterized by their milky, irritating latex production. *Euphorbia macroclada*, which is reported to be used in the treatment of constipation in the Van region (Dalar & Mükemre, 2020), is a plant frequently used in traditional medicine in different parts of the world thanks to its wide range of chemical compounds, such as oxygenated sesquiterpenes, hydrocarbons, and macrocyclic diterpenoids. *Euphorbia macroclada* is a plant widely used in traditional medicine worldwide because of its wide range of chemical compounds, including macrocyclic diterpenoids, hydrocarbons, and oxygenated sesquiterpenes. It treats constipation in the Van region, according to report (Dalar & Mükemre, 2020). Consequently, outstanding structural diversity of the aforementioned chemical components, as well as their medicinal uses because of their cytotoxic, antitumor, and antiviral properties makes them promising compounds for new drug discovery (Vasas & Hohmann, 2014). Euphorbia species are used for their disinfecting, antiseptic, and emollient qualities, as well as for treating acne, calluses, skin itching, dermatitis, irritation, boils, sunburn, rashes, warts, and hair loss (Ernst et al., 2015). These components are believed to be harmful in various ways, including impacts on angiogenesis, cell death and suppression of metastasis, increased formation of reactive oxygen, proliferation, and differentiation of cells (Diederich & Cerella, 2016). Cancenone isolated from Euphorbia species has been reported to stop cell division in the G0/G1 phase and induce apoptosis by causing mitochondria damage and cell receptor death (Ramsay et al., 2011). It was reported that isolated triterpenoids induced apoptosis in human colon adenocarcinoma cells (Colo320). Euphorbia species have long been used to treat various illnesses, from infectious disorders to long-term conditions like cancer. The chemical diversity of their isoprenoid compounds, such as triterpenoids, has been credited with their effectiveness. This has led to the isolation of various classes of triterpenoids, most of which are, euphane, taxanes, tiricallane, cycloalkanes, oleanane, and cycloalkanes. Additionally, it has been shown that these triterpenoids are cytotoxic through various modes of action, including impacts on apoptosis, angiogenesis, cell division, reactive oxygen generation, transformation, and suppression of excessive metastasis (Kemboi et al., 2020).

2.6. *Scutellaria orientalis* L. (yellow cascade, family Lamiaceae)

Scutellaria orientalis L., which is generally used for pain relief, analgesic, diabetes, hemorrhoids, and cancer treatment in the Van region (Dalar & Mükemre, 2020), belongs to the Lamiaceae family and is a plant distributed in the central Iranian-Turanian part of Asia. Many *Scutellaria* species have long been used as traditional herbal remedies to treat a wide range of illnesses, including infections, malignancies, hepatic and stomach problems, respiratory, neurological, and cardiovascular conditions (Marsh et al., 2014; Wang et al., 2020). Furthermore, contemporary medicine has validated the traditional applications of the therapeutic species of *Scutellaria*. Some of the significant medicinal benefits of this genus include cancer prevention, anti-viral impacts (Ang et al., 2020), reducing inflammation (Cheng et al., 2018), antioxidant activity (Lohani et al., 2013), protective effects on the nervous system (Zhang et al., 2017b), and it also has liver protection (Dong et al., 2011).

Recent studies on cancer therapy have shown that *S. Baicalensis*, another species of *Scutellaria*, suppresses apoptosis and tumor development by PI3K-Akt-mTOR and MAPK pathways, β -related pathways, and tumor-associated macrophages targeting (Parajuli et al., 2011; Tan et al., 2015). Cancer

cells can escape apoptosis or programmed cell death by activating the intrinsic or extrinsic pathway by caspases. Extracts from *Scutellaria baicalensis* cause cleavage of mitochondrial-dependent caspases, decrease Bcl-2 levels, and increase Bax, Cyto-C, and p53 in different human cancer cell lines (Kuo et al., 2009).

2.7. *Plantago major* L. (Vascular herb, Nerve grass, Plantaginaceae family)

Plantago major L. belongs to the *Plantaginaceae* family, which is widespread worldwide and has about 280 species (Beara et al., 2009). In the Van region, the plant leaves are soaked in warm milk or warm water, wrapped around the inflamed wounds, and used to drain the inflammation. It has also been reported that decoction of the leaves is used in laryngeal cancer, stomach pain, body itching, kidney and intestinal treatment, and fungus treatment between the fingers (Dalar & Mükemre, 2020). It is reported that *Plantago major* is used to treat several illnesses, including infections (Jamilah et al., 2012), and has antimicrobial, antidiabetic, antispasmodic, antiviral, anti-inflammatory, and wound healing properties (Akram et al., 2014). A review of the traditional uses of *Plantago major* (Samuelsen, 2000) shows that it is used in treating tumors in some Latin American countries. Soltani et al. (2020), in their study to evaluate the efficacy of *Plantago major* on radiation-induced mucositis symptoms in cancer patients, reported that the severity of mucositis was significantly lower (p-value <0.05) in the intervention group compared to the placebo group. A significant flavonoid found in *Plantago* species, luteolin-7-O- β -glucoside, has shown a lethal effect on tumoral cell lines of melanoma (UACC-62) and breast cancers (MCF-7) (Galvez et al., 2003). Potential anticancer compounds such as stearic acid and benzene dicarboxylic acid found in the root of the above-ground parts of *P. major* have an antiproliferative effect on the colon cancer cell line (HCT-116) (Rahamooz-Haghighi et al., 2021). It has been reported that *P. major* has antibacterial activity (Holetz et al., 2002), antileukemia, anticarcinoma, and antiviral activity and modulates cell-mediated immunity (Chiang et al., 2003), protects against systemic *Streptococcus pneumoniae* infection, prevents breast cancer (Hetland et al., 2000), and significantly inhibits Ehrlich ascites tumors in mice (Ozaslan et al., 2007).

2.8. *Primula auriculata* Lam. (Primrose, family Primulaceae)

It was reported that the extract obtained from the above-ground parts of *P. auriculata* caused pro-apoptotic and antiproliferative effects, caspase activation, and nuclear DNA fragmentation in human colon cancer HT-29 cells (Behzad et al., 2016). Kaempferol and isorhamnetin isolated from the above-ground parts are mainly thought to cause anticancer activity in the plant (Fico et al., 2007). *Primula auricula* shows high antibacterial and antioxidant activity thanks to the abundant amount of saponins and flavonoids it contains. It is used in the treatment of eye diseases such as trachoma and cataracts (Jaberian et al., 2013), colds, flu (Sezik et al., 2001), and digestive system disorders (Altundag & Ozturk, 2011). In the Van region, it is collected before flowering in spring and added to local herbed cheese, and its leaves are used in meals. It is also reported to treat hypertension, diabetes, and inflammation (Mükemre et al., 2016; Dalar & Mükemre, 2020).

3. Conclusion

The primary purpose of research on botanical culture is to contribute to solutions to environmental, hunger, and health problems. In this context, beyond studies that list only the names and ways of using plants among the public, it is essential to evaluate the use of plants from a sustainable development perspective and obtain results for the benefit of society. Research that compiles and evaluates public knowledge of commonly used plants using current information can produce crucial results. Today, most herbal medicines have emerged as a result of compilation studies. Therefore, scientific research on folk herbs can be critical in identifying potential future treatment sources and preventing the loss of traditional botanical cultures. In today's world, where societies are changing rapidly, preserving and making local botanical knowledge available through such research can be crucial in reaching solutions to important issues such as health, hunger, and environmental sustainability.

The limitations of chemotherapy used in cancer treatment today for healing patients have led to the search for alternative sources, such as medicinal plants. This review presents literature findings

regarding the *in vitro* and *in vivo* use of some plants (*Eryngium billardieri* Delar., *Cichorium intybus*, *Bongardia chrysogonum* (L.) Spach, *Bryonia multiflora* Boiss. & Heldr., *Euphorbia macroclada* Boiss., *Scutellaria orientalis* L., *Plantago major* L., and *Primula auriculata* Lam.) in the Lake Van basin to treat or prevent cancer and various diseases among the public. Some substance groups in medicinal plants may be explicitly distributed to a particular species, genus, or family. One of the most important results obtained from this study is that the plants used in treating various diseases in the Van Lake Basin also have unknown anticancer properties in addition to the diseases they treat. Plant extracts cause cancer inhibition through cell cycle arrest at different stages, induction of apoptosis or autophagy, and triggering distinct signaling pathways. Phenolic compounds, in particular, are thought to be the most important active molecules responsible for these anticancer effects. The rich medicinal plant diversity of the Lake Van basin and its herbal practices among the public can be used as potential anticancer treatments due to their synergistic effects. However, more *in vitro* and *in vivo* studies with local plants are required to isolate, identify, and use different phytochemicals to prevent or treat cancer. At the same time, toxicity studies of various herbal products showing anticancer activities regarding human health and their long-term harm should be evaluated.

Following ethnobotanical studies based in the Lake Van basin, conducting phytochemical and biological investigations, one promising therapeutic approach against cancer could be the creation of national databases of natural molecules and the association of herbal products with synthetic drugs. This approach not only preserves traditional botanical knowledge but also facilitates the identification of plants with significant pharmacological potential. By matching herbal products with synthetic drugs, we can explore innovative cancer therapies. Such rigorous scientific investigations are crucial to preserving our botanical heritage and contributing to the discovery of new therapeutic compounds from natural sources.

References

- Abuhamdah, S., Shatarat, A., Al-Essa, M., Al-Ameer, H., Al-Olimat, S., & Chazot, P. (2017). Spasmolytic and antimicrobial activities of crude extract of *Bongardia chrysogonum* L. tubers. *International Journal of Pharmacology*, 14(1), 52-60. <https://doi.org/10.3923/ijp.2018.52.60>
- Ahmad, S. S., Waheed, T., Rozeen, S., Mahmood, S., & Kamal, M. A. (2019). Therapeutic study of phytochemicals against cancer and alzheimer's disease management. *Current Drug Metabolism*, 20(13), 1006-1013. <http://dx.doi.org/10.2174/1389200221666200103092719>
- Akram, M., Hamid, A., Khalil, A., Ghaffar, A., Tayyaba, N., Saeed, A., ... & Naveed, A. (2014). Review on medicinal uses, pharmacological, phytochemistry and immunomodulatory activity of plants. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*, 27, 313-319. <https://doi.org/10.1177/039463201402700301>
- Alkan, E. E., Çelik, İ., & Bati, B. (2023). Antidiabetic and antioxidant effects of *Bryonia multiflora* Boiss. & Heldr. in a rat model of streptozotocin-induced diabetes. *Experimental and Applied Medical Science*, 4(1), 442-459. <https://doi.org/10.46871/eams.1287621>
- Altundag, E., & Ozturk, M. (2011). Ethnomedicinal studies on the plant resources of east Anatolia, Turkey. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 19, 756-777. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.05.195>
- Ang, L., Lee, H. W., Kim, A., Lee, J. A., Zhang, J., & Lee, M. S. (2020). Herbal medicine for treatment of children diagnosed with covid-19: a review of guidelines. *Complementary Therapies in Clinical Practice*, 39, 101174. <https://doi.org/10.1016/j.ctcp.2020.101174>
- Ashraf, K., Halim, H., Lim, S. M., Ramasamy, K., & Sultan, S. (2020). In vitro antioxidant, antimicrobial and antiproliferative studies of four different extracts of *orthosiphon stamineus*, *gynura procumbens* and *ficus deltoidea*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(1), 417-432. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.11.003>
- Baydoun, S., Chalakh, L., Dalleh, H., & Arnold, N. (2015). Ethnopharmacological survey of medicinal plants used in traditional medicine by the communities of Mount Hermon, Lebanon. *Journal of Ethnopharmacology*, 173, 139-156. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.06.052>
- Beara, I. N., Lesjak, M. M., Jovin, E. Đ., Balog, K. J., Anackov, G. T., Orcic, D. Z., & Mimica-Dukic, N. M. (2009). Plantain (*Plantago* L.) species as novel sources of flavonoid antioxidants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(19), 9268-9273. <https://doi.org/10.1021/jf902205m>

- Behzad, S., Ebrahim, K., Mosaddegh, M., & Haeri, A. (2016). *Primula auriculata* extracts exert cytotoxic and apoptotic effects against HT-29 human colon adenocarcinoma cells. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research: IJPR*, 15(1), 311.
- Bozyel, M. E., Bozyel, E. M., Canlı, K., & Altuner, E. M. (2019). Anticancer uses of medicinal plants in Turkish traditional medicine. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 22, 465-484. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdogavi.550334>
- Cheng, C. S., Chen, J., Tan, H. Y., Wang, N., Chen, Z., & Feng, Y. (2018). *Scutellaria baicalensis* and cancer treatment: recent progress and perspectives in biomedical and clinical studies. *The American Journal of Chinese Medicine*, 46(01), 25-54. <https://doi.org/10.1142/S0192415X18500027>
- Chiang, L. C., Chiang, W., Chang, M. Y., & Lin, C. C. (2003). In vitro cytotoxic, antiviral and immunomodulatory effects of *Plantago major* and *Plantago asiatica*. *The American Journal of Chinese Medicine*, 31(02), 225-234. <https://doi.org/10.1142/S0192415X03000874>
- Conforti, F., Ioele, G., Statti, G. A., Marrelli, M., Ragno, G., & Menichini, F. (2008). Antiproliferative activity against human tumor cell lines and toxicity test on Mediterranean dietary plants. *Food and Chemical Toxicology*, 46, 3325-3332. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.08.004>
- Dağlı, Ş. N., Demir, T., Kaplan, D. S., Doğru, N. Ö., Bahar, A. Y., Sarı, İ., & Bağcı, C. (2022). The effects of the *Bongardia chrysogonum* (L) in a rat model of diabetic nephropathy. *Gevher Nesibe Journal of Medical and Health Sciences*, 7(18), 33-41. <https://doi.org/10.46648/gnj.428>
- Dahab, R., & Afifi, F. (2007). Antiproliferative activity of selected medicinal plants of Jordan against a breast adenocarcinoma cell line (MCF7). *Scientia Pharmaceutica*, 75(3), 121-146. <https://doi.org/10.3797/scipharm.2007.75.121>
- Dalar, A., & Mükemre, M. (2020). Traditional medicinal plants of Van Province, Eastern Anatolia. Trine B. Schou (Eds), *Politics and economics of the Middle East-Anatolia; past, present and future perspectives* (pp 25-52). New York: NOVA Science Publishers Inc.
- Deng, Y., Wang, N., Zou, Z., Zhang, L., Xu, K. P., Chen, A. F., ... & Tan, G. S. (2017). Multi-target screening and experimental validation of natural products from selaginella plants against alzheimer's disease. *Frontiers in Pharmacology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00539>
- Diederich, M., & Cerella, C. (2016). Non-canonical programmed cell death mechanisms triggered by natural compounds. *Seminars in Cancer Biology*, 40, 4-34. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2016.06.001>
- Dong, P., Zhang, Y., Gu, J., Wu, W., Li, M., Yang, J., ... & Liu, Y. (2011). Wogonin, an active ingredient of Chinese herb medicine *Scutellaria baicalensis*, inhibits the mobility and invasion of human gallbladder carcinoma GBC-SD cells by inducing the expression of maspin. *Journal of Ethnopharmacology*, 137(3), 1373-1380. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.08.005>
- Ernst, M., Grace, O. M., Saslis-Lagoudakis, C. H., Nilsson, N., Simonsen, H. T., & Rønsted, N. (2015). Global medicinal uses of *Euphorbia* L. (Euphorbiaceae). *Journal of Ethnopharmacology*, 176, 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.10.025>
- Esmailbeig, M., Kouhpayeh, S. A., & Amirghofran, Z. (2015). An investigation of the growth inhibitory capacity of several medicinal plants from Iran on tumor cell lines. *International Journal of Cancer Prevention*, 8(5), e4032. <https://doi.org/10.17795/ijcp-4032>
- Ferlay, J., Colombet, M., Soerjomataram, I., Parkin, D. M., Piñeros, M., Znaor, A., & Bray, F. (2021). Cancer statistics for the year: An overview. *International Journal of Cancer*, 149(4), 778-789. <https://doi.org/10.1002/ijc.33588>
- Fico, G., Rodondi, G., Flamini, G., Passarella, D., & Tomé, F. (2007). Comparative phytochemical and morphological analyses of three Italian *Primula* species. *Phytochemistry*, 68(12), 1683-1691. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2007.04.019>
- Fidan, A. F., & Dündar, Y. (2007). *Yucca schidigera* ve içerdđđi saponinler ile fenolik bileşiklerinin, hipokolesterolemik ve antioksidan etkileri (derleme). *Lalahan Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 47(2), 31-39.
- Galvez, M., Martín-Cordero, C., Lopez-Lazaro, M., Cortes, F., & Ayuso, M. J. (2003). Cytotoxic effect of *Plantago* spp. on cancer cell lines. *Journal of Ethnopharmacology*, 88(2-3), 125-130. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(03\)00192-2](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(03)00192-2)

- Gezici, S., & Şekeroğlu, N. (2021). *Bongardia chrysogonum* (L.) Spach as a potential medicinal plant against cancer and Alzheimer's disease management. *İstanbul Journal of Pharmacy*, 51(3), 319-325. <http://dx.doi.org/10.26650/IstanbulJPharm.2021.892746>
- Hazra, B., Sarkar, R., Bhattacharyya, S., & Roy, P. (2002). Tumour inhibitory activity of chicory root extract against Ehrlich ascites carcinoma in mice. *Fitoterapia*, 73(7-8), 730-733. [https://doi.org/10.1016/S0367-326X\(02\)00232-0](https://doi.org/10.1016/S0367-326X(02)00232-0)
- Heidari, A., Meftahi, G., Bahrami, F., Bahari, Z., Zarei Mahmoudabadi, A., Fallah Huseini, H., & Jangravi, Z. (2023). Anti-adipogenic effects of *eryngium billardieri* extract during 3T3-L1 adipocyte differentiation. *Journal of Advances in Medical and Biomedical Research*, 31(147), 391-397. <http://dx.doi.org/10.30699/jambs.31.147.391>
- Hetland, G., Samuelsen, A. B., Løvik, M., Paulsen, B. S., Aaberge, I. S., Groeng, E. C., & Michaelsen, T. E. (2000). Protective effect of *Plantago major* L Pectin polysaccharide against systemic *Streptococcus pneumoniae* infection in mice. *Scandinavian Journal Immunology*, 52(4), 348-355. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3083.2000.00793.x>
- Holetz, F. B., Pessini, G. L., Sanches, N. R., Cortez, D. A. G., Nakamura, C. V., & Dias Filho, B. P. (2002). Screening of some plants used in the Brazilian folk medicine for the treatment of infectious diseases. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 97(7), 1027-1031. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762002000700017>
- Jaberian, H., Piri, K., & Nazari, J. (2013). Phytochemical composition and in vitro antimicrobial and antioxidant activities of some medicinal plants. *Food Chemistry*, 136(1), 237-244. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.07.084>
- Jamilah, J., Sharifa, A. A., & Sharifah, N. R. S. A. (2012). GC-MS analysis of various extracts from leaf of *Plantago major* used as traditional medicine. *World Applied Sciences Journal*, 17, 67-70.
- Kaya, A. (2010, June). *Tıbbi bitkiler ve etnobotanik çalışmalar*. Bitkilerle Tedavi Sempozyumu, 11-18, Zeytinburnu/İstanbul.
- Kemboi, D., Peter, X., Langat, M., & Tembu, J. (2020). A review of the ethnomedicinal uses, biological activities, and triterpenoids of *Euphorbia* species. *Molecules*, 25(17), 4019. <https://doi.org/10.3390/molecules25174019>
- Khan, M. F., Nasr, F. A., Noman, O. M., Alyhya, N. A., Ali, I., Saoud, M., ... & Hussain, H. (2020). Cichorins D-F: Three new compounds from *Cichorium intybus* and their biological effects. *Molecules*, 25(18), 4160. <https://doi.org/10.3390/molecules25184160>
- Kikowska, M., Chanaj-Kaczmarek, J., Derda, M., Budzianowska, A., Thiem, B., Ekiert, H., & Szopa, A. (2022). The evaluation of phenolic acids and flavonoids content and antiprotozoal activity of *Eryngium* species biomass produced by biotechnological methods. *Molecules*, 27(2), 363. <https://doi.org/10.3390/molecules27020363>
- Kuo, H. M., Tsai, H. C., Lin, Y. L., Yang, J. S., Huang, A. C., Yang, M. D., ... & Chung, J. G. (2009). Mitochondrial-dependent caspase activation pathway is involved in baicalein-induced apoptosis in human hepatoma J5 cells. *International Journal of Oncology*, 35(4), 717-724. https://doi.org/10.3892/ijo_00000384
- Lohani, M., Ahuja, M., Buabeid, M. A., Schwartz, D., Shannon, D., Suppiramaniam, V., ... & Dhanasekaran, M. (2013). Anti-oxidative and DNA protecting effects of flavonoids-rich *Scutellaria lateriflora*. *Natural Product Communications*, 8(10), 1415-1418. <https://doi.org/10.1177/1934578X1300801019>
- Marsh, Z., Yang, T., Nopo-Olazabal, L., Wu, S., Ingle, T., Joshee, N., & Medina-Bolivar, F. (2014). Effect of light, methyl jasmonate and cyclodextrin on production of phenolic compounds in hairy root cultures of *Scutellaria lateriflora*. *Phytochemistry*, 107, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.08.020>
- Mehrandish, R., Awsat-Mellati, A., Rahimpour, A., & Dehghan-Nayeri, N. (2017). Anti-cancer activity of methanol extracts of *Cichorium intybus* on human breast cancer SKBR3 cell line. *Razavi International Journal of Medicine*, 5(1), e38369.
- Miro, M. (1995). Cucurbitacins and their pharmacological effects. *Phytotherapy Research*, 9(3), 159-168. <https://doi.org/10.1002/ptr.2650090302>
- Mohammadi, A., Mansoori, B., Aghapour, M., & Baradaran, B. (2016). *Urtica dioica* dichloromethane extract induce apoptosis from intrinsic pathway on human prostate cancer cells (pc3). *Cellular and Molecular Biology*, 62(3), 78-83.

- Mükemre, M., Behçet, L., & Çakılcıoğlu, U. (2016). Survey of wild food plants for human consumption in villages of Çatak (Van-Turkey). *Indian Journal of Traditional Knowledge IJTK*, 15(2), 183-191.
- Nawab, A., Yunus, M., Mahdi, A.A., & Gupta, S. (2011). Evaluation of anti-cancer properties of medicinal plants from the Indiansub-continent. *Molecular and Cellular Pharmacology*, 3(1), 21-29.
- Nichenametla, S. N., Taruscio, T. G., Barney, D. L., & Exon, J. H. (2006). A review of the effects and mechanisms of polyphenolics in cancer. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(2), 161-183. <https://doi.org/10.1080/10408390591000541>
- Oran, S. A., Yousef, I., & Jaffal, S. M. (2022). Evaluation of the antiproliferative effect of selected plant extracts on colon and skin cancer cell lines. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 12(11), 091-096. <https://dx.doi.org/10.7324/JAPS.2022.121110>
- Ozaslan, M., Didem Karagöz, I., Kalender, M.E., Kilic, I. H., Sari, I., Karagöz, A. (2007). In vivo antitumoral effect of Plantago major L extract on BALB/C mouse with Ehrlich ascites tumor. *American Journal of Chinese Medicine*, 35(5), 841-851. <https://doi.org/10.1142/S0192415X07005314>
- Özgökçe, F., & Özçelik, H. (2004). Ethnobotanical aspects of some taxa in East Anatolia, Turkey. *Economic Botany*, 58(4), 697-704. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2004\)058\[0697:EAOSTI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2004)058[0697:EAOSTI]2.0.CO;2)
- Parajuli, P., Joshee, N., Chinni, S. R., Rimando, A. M., Mittal, S., Sethi, S., & Yadav, A. K. (2011). Delayed growth of glioma by Scutellaria flavonoids involve inhibition of Akt, GSK-3 and NF- κ B signaling. *Journal of Neuro-Oncology*, 101, 15-24. <https://doi.org/10.1007/s11060-010-0221-x>
- Paşayeva, L., Köngül, E., Geylan, R., Karatoprak, G. Ş., & Tugay, O. (2017). Analysis of the cytotoxic effects of Eryngium billardieri Delar. Extracts on MCF7 cell line. *Proceedings*, 1, 1055. <https://doi.org/10.3390/proceedings1101055>
- Rahamooz-Haghighi, S., Bagheri, K., Danafar, H., & Sharafi, A. (2021). Anti-proliferative properties, biocompatibility, and chemical composition of different extracts of plantago major medicinal plant. *Iranian Biomedical Journal*, 25(2), 106-116. <http://dx.doi.org/10.29252/ibj.25.2.106>
- Ramsay, J. R., Suhrbier, A., Aylward, J. H., Ogbourne, S., Cozzi, S. J., Poulsen, M. G., ... & Parsons, P. G. (2011). The sap from Euphorbia peplus is effective against human nonmelanoma skin cancers. *British Journal of Dermatology*, 164(3), 633-636. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10184.x>
- Roshanravan, N., Asgharian, P., Dariushnejad, H., Alamdari, N. M., Mansoori, B., Mohammadi, A., ... & Ostadrahimi, A. (2018). Eryngium Billardieri induces apoptosis via Bax gene expression in pancreatic cancer cells. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*, 8(4), 667-74. <https://doi.org/10.15171/apb.2018.075>
- Saleem, M., Abbas, K., Naseer, F., Ahmad, M., Syed, N. H., Javed, F., ... & Asima, S. (2014). Anticancer activity of n-hexane extract of *Cichorium intybus* on lymphoblastic leukemia cells (Jurkat cells). *African Journal of Plant Science*, 8(6), 315-319. <https://doi.org/10.5897/AJPS2013.1021>
- Samuelsen, A. B. (2000). The traditional uses, chemical constituents and biological activities of Plantago major L. A review. *Journal of Ethnopharmacology*, 71(1-2), 1-21. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(00\)00212-9](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(00)00212-9)
- Seca, A. M. L., & Pinto, D. C. (2018). Plant secondary metabolites as anticancer agents: successes in clinical trials and therapeutic application. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(1), 263. <https://doi.org/10.3390/ijms19010263>
- Sezik, E., Yesilada, E., Honda, G., Takaishi, Y., Takeda, Y., & Tanaka, T. (2001). Traditional medicine in Turkey X. Folk medicine in Central Anatolia. *Journal of Ethnopharmacology*, 75(2-3), 95-115. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(00\)00399-8](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(00)00399-8)
- Sharma, D., Purohit, N., Chaubey, S., Tiwari, M., Bhadauriya, M., Mohit, Bhasker, N., & Kumar, D. (2022). A review on pharmacological and therapeutic potential of aloe barbadensis miller. *European Journal of Medicinal Plants*, 33(6), 23-43. <https://doi.org/10.9734/ejmp/2022/v33i630471>

- Soltani, G. M., Hemati, S., Sarvizadeh, M., Kamalinejad, M., Tafazoli, V., & Latifi, S. A. (2020). Efficacy of the plantago major L. syrup on radiation induced oral mucositis in head and neck cancer patients: A randomized, double blind, placebo-controlled clinical trial. *Complementary Therapies in Medicine*, 51, 102397. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2020.102397>
- Song, J., Ahn, C., Chun, C. H., & Jin, E. J. (2014). A long non-coding RNA, GAS5, plays a critical role in the regulation of miR-21 during osteoarthritis. *Journal of Orthopaedic Research*, 32(12), 1628-1635. <https://doi.org/10.1002/jor.22718>
- Tabata, M., Sezik, E., Honda, G., Yeşilada, E., Fukui, H., Goto, K., & Ikeshiro, Y. (1994). Traditional medicine in Turkey III. Folk medicine in East Anatolia, Van and Bitlis provinces. *International Journal of Pharmacognosy*, 32(1), 3-12. <https://doi.org/10.3109/13880209409082966>
- Tan, H. Y., Wang, N., Man, K., Tsao, S. W., Che, C. M., & Feng, Y. (2015). Autophagy-induced RelB/p52 activation mediates tumour-associated macrophage repolarisation and suppression of hepatocellular carcinoma by natural compound baicalin. *Cell Death & Disease*, 6(10), e1942-e1942. <https://doi.org/10.1038/cddis.2015.271>
- Turkish Ministry of Agriculture and Forestry. (2021). *Van Gölü Havzası tanıtım*. Access date: 13.02.2024. <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/havza%20tan%C4%B1t%C4%B1m%2023.03.2023/t%C3%BCrk%C3%A7e/Van%20G%C3%B6lü%20Havzas%C4%B1%20Tan%C4%B1t%C4%B1m.pdf>
- Vasas, A., & Hohmann, J. (2014). Euphorbia diterpenes: isolation, structure, biological activity, and synthesis (2008-2012). *Chemical Reviews*, 114(17), 8579-8612. <https://doi.org/10.1021/cr400541j>
- Vauzour, D., Rodriguez-Mateos, A., Corona, G., Oruna-Concha, M. J., & Spencer, J. P. E. (2010). Polyphenols and human health: Prevention of disease and mechanisms of action. *Nutrients*, 2(11), 1106-1131. <https://doi.org/10.3390/nu2111106>
- Wang, L., Chen, W., Li, M., Zhang, F., Chen, K., & Chen, W. (2020). A review of the ethnopharmacology, phytochemistry, pharmacology, and quality control of *Scutellaria barbata* D. Don. *Journal of Ethnopharmacology*, 254, 112260. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112260>
- Yaşar, M., Oguzkan, S. B., & Ugras, H. I. (2021). Some bioactive component analysis of herbal capsules. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 17(2), 057-062. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2021.17.2.0271>
- Yeşilada, E., Tanaka, S., Tabata, M., & Sezik, E. (1989). The antiinflammatory activity of the fractions from *Eryngium billardieri* in mice. *Phytotherapy Research*, 3(1), 38-40. <https://doi.org/10.1002/ptr.2650030111>
- Yu, B., Zheng, Y. C., Shi, X. J., Qi, P. P., & Liu, H. M. (2016). Natural product-derived spirooxindole fragments serve as privileged substructures for discovery of new anticancer agents. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*, 16(10), 1315-1324. <http://dx.doi.org/10.2174/1871520615666151102093825>
- Zhang, J., Wang, P., Wan, L., Xu, S., & Pang, D. (2017a). The emergence of noncoding RNAs as Heracles in autophagy. *Autophagy*, 13(6), 1004-1024. <https://doi.org/10.1080/15548627.2017.1312041>
- Zhang, X., Du, L., Zhang, W., Yang, Y., Zhou, Q., & Du, G. (2017b). Therapeutic effects of baicalein on rotenone-induced Parkinson's disease through protecting mitochondrial function and biogenesis. *Scientific Reports*, 7(1), 9968. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07442-y>
- Zhou, C. X., Zou, L., Zhao, Z. Z., Zhu, H., He, Q. J., Yang, B., & Gan, L. S. (2012). Terpenoids from *Cichorium intybus*. *Natural Product Communication*, 7(8), 971-972. <https://doi.org/10.1177/1934578X1200700801>



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Su Dalga Enerjisi Üretimi ve Yapay Zekâ: Asya, Avrupa ve Türkiye'nin Potansiyeli

Selma KAYMAZ*, Tuğrul BAYRAKTAR, Çağrı SEL

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye
Selma KAYMAZ, ORCID No: 0009-0002-6342-871X, Tuğrul BAYRAKTAR, ORCID No: 0000-0001-5620
5804, Çağrı SEL, ORCID No: 0000-0002-8657-2303

*Sorumlu yazar e-posta: kaymazselma@outlook.com

Makale Bilgileri

Geliş: 02.03.2024
Kabul: 04.06.2024
Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1445985](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1445985)

Anahtar Kelimeler

Asya,
Avrupa,
Gelgit enerjisi,
Su dalga enerjisi,
Türkiye,
Yapay sinir ağları

Öz: Son yıllarda, sürdürülebilir bir dünya için yenilenemeyen enerji kaynaklarının kullanımının azaltılması gerekliliği giderek daha belirgin hale gelmektedir. Fosil yakıt tüketiminden, daha temiz bir enerjiye geçiş döneminde, yenilenebilir enerji kaynakları hızla gelişme göstermektedir. Bu gelişmeler ışığında su enerjisi teknolojilerine odak artmaktadır. Enerji potansiyeli için gerekli şartlar karşılandığı sürece; su kaynaklı enerji üretim projelerinin uygulanması ülkelerin refahına katkı sağlama potansiyeli taşımaktadır. Yenilenebilir enerji üretiminde rekabete konu olan su kaynaklı enerji üretimi için; literatürde kıtalar arası enerjinin incelendiği, su potansiyelinin ölçüldüğü, santraller için uygun yer seçiminin yapıldığı, dalga – iklim ilişkisinin incelendiği, okyanus enerjisi teknolojileri konularını içeren çalışmalarda geleneksel teknikler yanı sıra yapay zekâ tekniklerine de yer verilmektedir. Deneysel modelleme saha ölçüm tekniklerinin yüksek maliyetli olduğu, sayısal yöntemlerin parametre ve girdi hazırlık sürecinin zahmetli olması sebebiyle çeşitli yapay zekâ yöntemleri, su kaynaklı enerji üretimi teknolojisinde yoğun şekilde kullanılmaktadır. Yapay sinir ağları da bu alanda karşılaşılan problemlerin çözümünde kullanılan tekniklerden birisi olarak yer almaktadır. Bu derlemede, Asya ve Avrupa kıtasında su kaynaklı enerji üretimi hakkında yapılmış mevcut çalışmalardan bahsedilmekte, Türkiye'nin su enerjisi potansiyelini, mevcut literatür incelenerek ortaya konulmaktadır. Ayrıca yapay zekâ tekniklerinden yapay sinir ağı metodunun su enerjisi teknolojilerinde ne şekilde ve hangi ölçüde kullanıldığı ve kullanılan yöntemlerle ilgili literatüre yer verilmiştir.

Wave Energy Production and Artificial Intelligence: The Potential of Asia, Europe and Türkiye

Article Info

Received: 02.03.2024
Accepted: 04.06.2024
Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1445985](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1445985)

Keywords

Artificial neural network,
Asia,
Europe,
Tidal stream,
Türkiye,
Wave energy converter

Abstract: In recent years, there has been a growing need to reduce our reliance on non-renewable energy sources for a more sustainable world. The use of renewable energy sources is increasing as we move towards cleaner energy options and away from fossil fuels. Wave energy technology is gaining particular attention for generating energy sustainably. Under optimal conditions, wave energy projects have the potential to contribute significantly to a country's well-being. In addition to traditional methods, artificial intelligence techniques are widely used in wave energy technology due to the high costs and labor-intensive nature of experimental field measurements and the preparation of parameters and inputs for numerical methods. One such technique involves artificial neural networks to solve problems in this field. This study examines existing research on water-based energy production in Asia and Europe, evaluates Türkiye's wave energy potential based on the available literature, and discusses the application of artificial neural networks in wave energy technology and the methods employed in the literature.

1. Giriş

İnsan yaşamının sürdürülebilirliğinde enerji kaynakları önemli rol oynamaktadır. Nüfus hareketleri, şehirleşmeler ve makineleşme ile dünyanın sınırlı enerji kaynakları azalmaktadır. Çevresel dengenin bozulması sonucunda ülkelerin enerji politikalarında yenilenebilir enerji kullanımının artırılması amaçlanmaya başlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı çevresel sürdürülebilirlik sağlamak için önemlidir ve her bir kaynağın avantajları olduğu kadar dezavantajları olduğu bilinmektedir (Bak, 2003). Spelta ve De Giuli tarafından 2023'te yapılan çalışmada, Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2026'ya kadar yenilenebilir enerji kapasitesinin genişlemesinin dünyanın toplam güç kapasitesindeki artışın yaklaşık %95'ini oluşturacağını tahmin edildiğinden bahsedilmektedir. Genel olarak dünya çapındaki temiz enerji kapasitesindeki büyümenin %43'ünü oluşturan Çin en büyük pazar olurken, onu Avrupa, Amerika Birleşik Devletleri ve Hindistan izlemektedir. Bu dört bölge, küresel olarak yenilenebilir enerji kapasitesindeki artışın yaklaşık %80'ini sağlamaktadır (Spelta & De Giuli, 2023).

Dalgalar ve rüzgâr, yenilenebilir doğaları ve çevreye verdiği minimum zarar dolayısıyla önemli potansiyele sahip olan enerji kaynaklarıdır. Okyanusları gelen potansiyel enerji, sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçişi kolaylaştırabileceğinden, dalga enerjisi son yıllarda ilgi çekmektedir. 2025 yılına kadar, dünya çapındaki dalga enerjisi yatırımları sonucunda mevcut 47 milyon dolar olan enerji pazarı 107 milyon dolara çıkacaktır (Shadmani ve ark., 2023). Dünya okyanuslarının en az 10 TW (teravat) temiz enerji potansiyeli içerdiği tahmin edilmektedir (Neill, 2022). Bu; dalga ve gelgit enerjisi, deniz termal enerji dönüşümü, deniz akıntısı ve tuzluluk gradyan enerjisi içeren kaynakları içermektedir. Ancak, bu kaynaklar büyük ölçüde kullanılmamış durumda olup, şu anda dünya genelinde yaklaşık 500 MW (megavat) deniz temiz enerji kapasitesi bulunmakta ve bunların büyük bir kısmını gelgit enerjisi oluşturmaktadır (Neill, 2022).

Su enerjisi günümüzde yaygın olarak kullanılan bir enerji kaynağı değildir. Su enerjisi, özel türbinler kullanarak veya suyun yükselip alçılmasıyla mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemler aracılığıyla elde edilir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bir enerji çeşidi değildir. Bunun sebebinin özel türbinlerin kurulumunun oldukça karmaşık ve maliyetli olmasıdır. Ortalama dalga potansiyeli olan denizlerde de maliyetli olması sebebiyle türbinlerin kurulumu göze alınmamaktadır. Kurulum için dalga potansiyeli çok yüksek yerler belirlenmektedir. Diğer sebebi ise kurulum sonrası oluşabilecek fırtınalarda türbinlerin zarar görme ihtimali olarak bilinmektedir. Örneğin Norveç'te kurulan dalga enerjisi türbini uzun süre Norveç'in batı kıyısında bulunan Bergen şehrinin elektrik enerjisini üretmiş fakat bir fırtınada yerle bir olmuştur. Bu sistemin başarısız olması ile ilgili üretici firmanın santrali geliştirme sürecinde yeterince ilgi göstermemiş olması ve tankın toprak dolması sebebiyle büyük hasar aldığı şeklinde yorumlar mevcuttur (Bak, 2003).

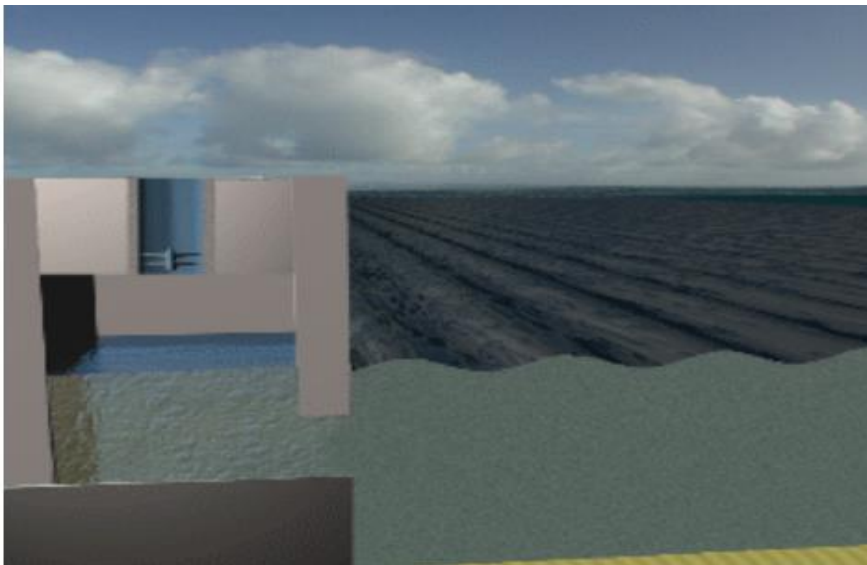
Su dalga enerjisi, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak büyük potansiyele sahiptir. Ancak, bu potansiyeli tam anlamıyla değerlendirebilmek için karmaşık veri analizi, kontrol sistemleri ve optimizasyon tekniklerine ihtiyaç vardır. Yapay zekâ, bu zorlu alanda önemli bir rol oynar. Makine öğrenmesi (Hassan ve ark., 2024), derin öğrenme (Shadmani ve ark., 2023), veri madenciliği (Cao ve ark., 2022), tahmin modelleri (den Bieman ve ark., 2023) ve otomasyon (de Mello ve ark., 2013) su dalga enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırabilir ve kaynak kullanımını optimize edebilir. Bu makale, su enerji çeşitlerini ve kıtalar arasındaki su dalga enerjisi potansiyelini araştırırken aynı zamanda yapay sinir ağlarının dalga potansiyel özelliklerini konu alan makaleleri incelemektedir ve bu alanda kullanılabilir yapay sinir ağları konusunda öneriler sunmaktadır. Bu da henüz gelişmekte olan ve güncel makalelere konu olan su dalga enerjisi teknolojilerinin gelecekteki sürdürülebilir enerji üretimi için daha verimli hale getirilmesine yardımcı olabilir.

Giriş bölümünde; temiz enerji kaynaklarından, su dalga enerjisi potansiyelinin keşfinden ve genel olarak yapay zekâ tekniklerinin bu alandaki rolünden bahsedilmiştir. İlerleyen bölümlerde, Asya ve Avrupa ülkelerinde su dalga enerjisi potansiyeli için yapılmış mevcut çalışmalar incelenmiştir. Türkiye'nin potansiyeli literatürdeki çalışmalar baz alınarak ortaya konulmuştur. Popüler yapay zekâ teknikleri arasında değerlendirilen yapay sinir ağlarının su dalga enerjisi konusunda nasıl kullanılabilirliğini ve yapay sinir ağları için dalga enerjisi sistemlerinin daha verimli ve güvenilir hale getirilmesine katkı sağlayan literatürdeki çalışmalarını incelenmiştir. Son olarak, yapay sinir ağlarının su dalga enerjisi konusundaki rolü vurgulanmış ve gelecekteki çalışmalara öneriler sunulmuştur.

2. Denizlerin ve Okyanusların Enerji Potansiyeli

Gelgit ve dalga enerjisi, okyanus enerjisi teknolojilerinin en gelişmiş iki türünü temsil etmektedir. Dalgalar, deniz yüzeyinde esen rüzgarlarla oluşur. Üretilen dalgaların boyutu, rüzgâr hızına, süresine, üzerine üflendiği suyun mesafesine, deniz tabanının batimetrisine ve akıntılara bağlıdır. Suyun hareketi, dalga enerjisi cihazları tarafından kullanılabilen kinetik enerjiyi taşımaktadır. Gelgit akıntıları ise, ay ve güneşin dünya okyanusları üzerindeki sürekli değişen yerçekimi kuvveti tarafından yaratılır. Gelgitlerin asla durmadığı bilinmektedir. Su önce bir yöne, sonra diğerine, dünyanın her yerine hareket etmektedir. Gelgit akıntısı teknolojileri, gelgit bölgelerine giren ve çıkan akımların kinetik enerjisini yakalar. Güneş ve ayın göreceli konumları tam bir doğrulukla tahmin edilebildiğinden, ortaya çıkan gelgit de tahmin edilebilir. Gelgit enerjisini bu kadar değerli bir kaynak yapan da bu öngörülebilirliğidir (Avrupa Deniz Enerjisi Merkezi, 2024). Düşük gelgitte, su türbinlerden ters yönde çekilir. Bu hareketlerin her ikisi de türbinin kanatlarını döndürür ve elektrik üretir (Crown Estate Scotland, 2024).

Deniz dalgaları veya gel-git hareketleri, türbinler veya salınlı sistemler kullanılarak mekanik enerjiye dönüştürülerek elektrik üretimi için kullanılabilir (Türköz, 2021). Su dalgasından elektrik enerjisi üretme fikri, son dönemde oldukça yaygınlaşsa da bu fikrin 20. yy. başlarına dayanan bir geçmişi vardır. Japon bilim adamı Masuda'nın 1945 yılında yaptığı deneysel inceleme sonrası bu konu ilgi görmeye başlamıştır. Petrol krizi sonrasında araştırmacıların tekrar ilgisini çekmeye başlayan dönüşüm sistemi, 1980'lerin ikinci yarısında prototiplerin oluşturulmasıyla fiilen ortaya konulmuştur (Bak, 2003). 1799 yılında Fransa'da Girard adında bir baba ve oğul (Ross, 1995) tarafından alınan patent, dalga enerjisi dönüştürücülerinin ilk tescilli örneğini temsil ederek, dalga enerjisi kullanımıyla ilgili bilimsel ilginin tarihsel kökenine işaret etmektedir (Foteinis & Emmanuel Synolakis, 2023). Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin; kıyı şeridi, kıyıya yakın ve kıyıdan uzak bölgelerde uygulandığı bilinmektedir. Bu bağlamda dalga enerjisi dönüşüm teknolojileri kıyı şeridinde; salınlı su kolonu, daralan kanal sistemi, pendula gibi sistemler kurulurken, kıyıya yakın sahalarda osprey, oyster, wosp gibi enerji sistemleri kurulmaktadır. Açık denizlerdeki uygulamalar ise McCabe dalga pompası, OPT dalga enerji dönüştürücüsü, Arşimet dalga salınımı ve Pelamis dalga enerji dönüştürücü sistemleridir (Metin, 2023). Kükner (2018)'e göre dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde en çok kullanılan dönüştürücü sistemi salınlı su kolonu enerji sistemidir. Salınlı su kolonu sisteminin kıyı şeride kurulduğu bilinmektedir. Bir kısmı suya batırılmış olan bu sistem Şekil 1'de görüldüğü üzere içi boş bir yapıdır. Bir su sütununun üzerine bir hava sütunu çevreler. Dalgalar, su sütununun yükselmesine ve düşmesine neden olur, bu da hava sütununu sıkıştırır ve genişletir. Bu sıkışmış hava, dönme kabiliyetine sahip olan bir türbin aracılığıyla atmosfere ve atmosferden akmasına izin verilir. Türbinin dönüşü elektrik üretmek için kullanılır (Avrupa Deniz Enerjisi Merkezi, 2024).



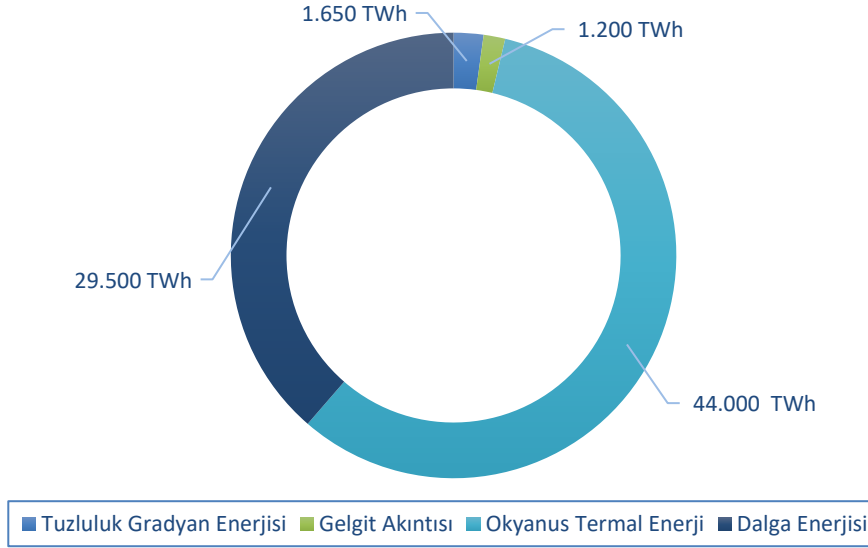
Şekil 1. Salınlı su kolonu enerji sistemi (Avrupa Deniz Enerjisi Merkezi, 2024).

Okyanuslar, sıvı akışı, yüzey dalgaları, termal ve tuzluluk gradyanları şeklinde büyük bir potansiyel enerji kaynağı sağlar. Gelgit akışı enerjisi, son on yılda hem akademi hem de enerji endüstrisinden büyük ilgi görmektedir (Dai ve ark., 2023). Gelgit akımı türbinleri kullanılarak gelgitlerden enerji elde edilmesi, bir dizi çekici özellik nedeniyle giderek daha fazla tercih edilen bir form haline gelmektedir. Gelgit akışı enerjisinin başlıca avantajları olarak; önceden büyük bir hassasiyetle ölçülebilen enerji üretiminin öngörülebilirliği, akışkan özelliklerinden türetilen yüksek yük faktörü (yoğunluğu havanınkinin yaklaşık 1000 katı), düşük görsel, düşük arazi işgali ve ekipmana zarar verebilecek aşırı akış hızlarının olmaması sayılmaktadır. Dezavantajları ise deniz ortamındaki olası bozulmalar ve gelgit enerjisi dönüştürücü teknolojisi hala geliştirilmemiş olmasıdır. Şu ana kadar sadece birkaç gelgit akım türbini ticarileştirilmiştir (Zheng ve ark., 2015). Gelgit akıntısı enerjisi geliştirmekle ilgilenen birçok ülke olduğu bilinmektedir. Bunlar arasında; Birleşik Krallık, Amerika Birleşik Devletleri, Yeni Zelanda, Malezya ve Kanada gibi açık deniz bölgeleri için kaynak değerlendirmeleri yapıldığı bilinmektedir. Avrupa Deniz Enerjisi Merkezi, gelgit akışı enerji gelişiminde aktif bir figürdür (Dai ve ark., 2023). İskoçya, Güney Kore, Fransa, Kanada ve Çin'de ise en önemli gelgit santrallerinin bulunduğu bilinmektedir (Yeni Enerji, 2019).

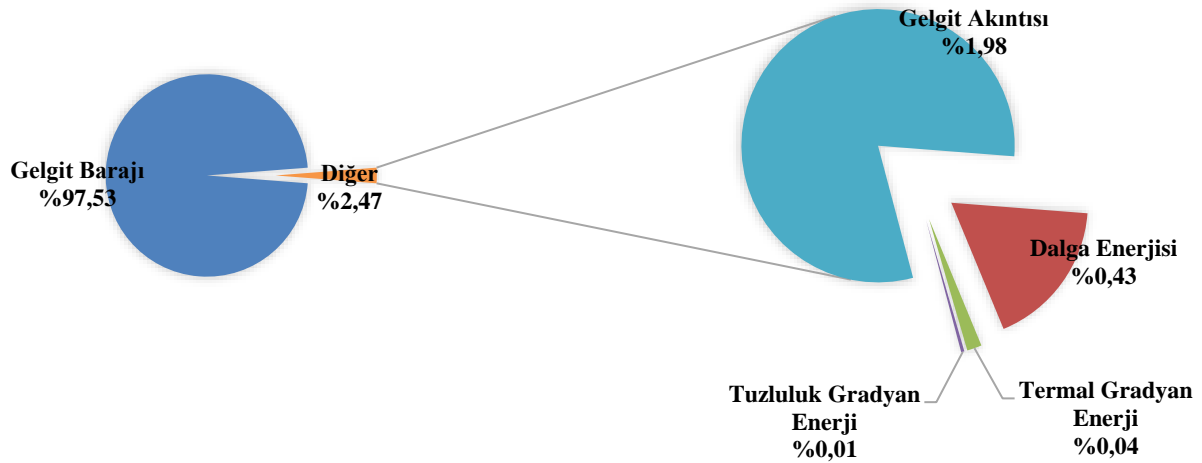
Son yıllarda, ters elektrodializ (RED), düşük ekipman yatırımı ve çevre dostu olma özellikleriyle deniz suyu ve nehir suyu arasındaki tuz farkına uygun yeşil bir enerji üretim teknolojisi olarak ortaya çıkmıştır (Simões ve ark., 2020). Yeni bir temiz enerji türü olarak, tuzluluk gradyan enerjisi, geniş bir depolama aralığı ve neredeyse sıfır çevre kirliliği avantajlarına sahiptir (Tufa ve ark., 2018). Literatürde mavi enerji olarak da adlandırılan tuzluluk gradyan enerjisi, dünya çapında yaklaşık 2.8 TW (teravat) gibi bir enerji kapasitesine sahiptir (Veerman, 2010). Bu enerji, tatlı- tuzlu su arasındaki tuz konsantrasyonu farkından elde edilmektedir (Turkchem, 2022). Literatürde su altı nehirleri (underwater river) olarak geçen deniz altı akışları ise özellikle okyanus ve denizlerde tuzluluk ve sıcaklık farkından meydana gelmektedir.

Nehir akıntıları olarak bilinen enerji türü de su enerji çeşidine dahil edilmektedir. Güneş-Durak & Kapkın (2024)'a göre, okyanusa açık olmayan tıkalı havzalarda tatlı deniz suyu, ağırlaşarak havzaya girdikten sonra buharlaşma yoluyla dibe çöker. Bu ağır su, engeller nedeniyle açık denize gidemez ve bu nedenle üstte normal tuzlu su, altta ise çok tuzlu su oluşturarak tuzluluk farkından dolayı tabakalı bir su yapısı geliştirir. Bu tabakalı yapının literatürdeki adı "haloklin"dir. Bu tuzluluk farklılıkları, deniz tabanı boyunca tortular taşıyan su altı nehirlerinin oluşumuna da katkıda bulunabilir. Örneğin, İstanbul Boğazı'nın altındaki Karadeniz deniz altı nehrinin keşfi, Leeds Üniversitesi'ndeki bilim insanları tarafından 1 Ağustos 2010'da açıklanmıştır. Bu eşsiz nehir, Akdeniz'den gelen tuzlu suyun İstanbul Boğazı aracılığıyla daha düşük tuzluluk oranına sahip Karadeniz'e akmasıyla oluşur.

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), dünya üzerindeki su enerji potansiyeli çeşitlerini (tuzluluk gradyan, gelgit akıntısı, termal ve dalga enerjisi), ürettiği enerji miktarlarına göre Şekil 2'de verildiği üzere sınıflandırmıştır. IRENA'ya göre, dünya üzerinde sırasıyla okyanus termal enerji (44 000 TWh), dalga enerjisi (29 500 TWh), tuzluluk gradyan enerjisi (1 650 TWh) ve gelgit enerjisi (1.200 TWh) potansiyeli bulunmaktadır. IRENA'ya göre dünyadaki su enerji uygulamalarına da Şekil 3'te verilmiştir. Dünya üzerinde kullanılan su enerji çeşidi 521.5 MW (%97.53) bir değerle gelgit barajlarıdır. Diğer mevcut enerji uygulamaları (termal gradyan, tuzluluk gradyan, gelgit akıntısı ve dalga enerjisi) için ise 13.2 MW (%2.47)'lık bir enerji kullanımı söz konusudur (IRENA ve OEE, 2023).



Şekil 2. Dünyadaki su enerji potansiyeli (IRENA ve OEE, 2023).



Şekil 3. Mevcut su enerjisi uygulamaları (IRENA ve OEE, 2023).

2.1. Avrupa ülkelerinde su enerjisi potansiyeli

Avrupa'nın temiz enerji için ciddi projeler yaptığı ve karbon emisyonunu kontrol etmede Asya'dan daha iyi olduğu söylenebilir (Chiu ve ark., 2012). Avrupa'nın su dalga enerjisi teknolojilerine bakışı 1991 yılında Avrupa Komisyonu'nun temiz enerjiler konusundaki Ar-Ge programlarına dalga enerjisini dahil etme kararıyla önemli ölçüde değişmiştir. Projelerin başlangıç tarihinin 1992 olduğu bilinmektedir. O zamandan beri, Avrupa'da aktif olan çok sayıda ekibi içeren Avrupa Komisyonu tarafından dalga enerjisi üzerine yaklaşık otuz proje finanse edilmiştir. Dalga enerjisine yönelik çalışmalar, kullanımı göz önünde bulundurularak, dalga enerjisi teknolojisinin Avrupa'da ilk kez kullanan Birleşik Krallık'ta yoğunluk kazanmaktadır (Pontes ve ark., 1993). Avrupa kıtasında yapılan çalışmaların baz alındığı literatür taraması özeti Tablo 1'de yer almaktadır.

Atlantik Okyanusu'nda yapılan çalışmalar, bölgede rüzgâr ve dalga enerjisi potansiyelini değerlendirmek için çeşitli araştırmaların yapıldığını göstermektedir. Gonçalves ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada Kanarya Adalarında bulunan su dalga enerjisi potansiyeli araştırılmış, dalgaların dönüşüm modeli için SWAN modeli kullanılmıştır. Kanarya Adalarının genel olarak potansiyelinin yüksek olduğu ama kuzey kıyılarında dalga enerjisinin daha yoğun olduğu

gözlemlenmiştir. Rusu & Onea (2016) tarafından yapılan çalışmada Atlantik Okyanusu dalga dönüşüm verimliliği tahmin edilmiştir. 4 test alanında yapılan bu çalışmada (İzlanda, Azor Takımadaları, Madeira Takımadaları ve Kanarya Adaları) İzlanda bölgesinin en önemli dalga enerjisi potansiyelini sunduğu sonucuna varılmaktadır. Lavidas ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada İskoç kıyı şeridinden alınan 2004- 2014 verileri, dalga tahminleri ve haritaları incelenmiştir. Çalışmaya göre İskoçya, dalga enerjisi için en umut verici ülkelerden biridir. Choupin ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada dalga enerjisi üretimi için yüksek potansiyele sahip Kanarya Adalarında su dalga enerjisi kaynak ve kurulum fizibilitesi yapılmaktadır. Çalışma, İspanya'daki Yedi Adalar bölgesindeki Atlas Okyanusunda gerçekleştirilmiştir. Çevresel ve diğer kısıtlamalar da çalışmaya dahil edilerek tüm adaların santral kurulumu için uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Kuzey Denizi'nde yapılan çalışmalar, bölgede rüzgâr ve dalga enerjisi potansiyelini değerlendirmek için çeşitli araştırmaların yapıldığını göstermektedir. Rusu & Rusu (2021) tarafından yapılan çalışmada Kuzey Denizi dalga enerjisi potansiyeli 1989-2018 yılları arasına ait 30 yıllık verilerle dalga gücü değerlendirilmiştir. Bu kapsamda denizin kuzey kesiminin su dalga enerjisi potansiyelinin oldukça güçlü olduğu sonucuna varılmıştır. Alday & Lavidas (2024) tarafından yapılan çalışmada Hollanda kıyılarının gel-git enerjisi değerlendirilmiştir. Bu çalışma Hollanda gel-git enerjisi için yapılmış ilk örnek olarak kabul edilmektedir. Kuzey Denizi'nde gerçekleştirilen çalışmada, 1 yıllık akım ve yükseklik veri tabanı oluşturulmuş, mevsimsel olarak da değerlendirilmiştir. Hollanda kıyıları için; Den Helder, De Cocksdorp, Oost Vlieland ve Hollum potansiyel alanlar olarak belirlenmiştir. Genel olarak Hollanda kıyılarının gel-git kaynağı düşük yoğunluklu olarak sınıflandırılmış ve türbinlerin bu yönde geliştirilmesi için öneriler sunulmuştur.

Akdeniz'de yapılan çalışmalar, bölgede rüzgâr ve dalga enerjisi potansiyelini değerlendirmek için çeşitli araştırmaların yapıldığını göstermektedir. López-Ruiz ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada Akdeniz'de kıyıya yakın dalga enerji kaynağını orta ve uzun vadeli zamansal ölçeklerde tahmin etmek amaçlanmıştır. Sonuçlar, dalga gücünün en yüksek ortalama ve uç değerlerine sahip yerlerin Punta del Santo çevresindeki en derin yerler olduğunu göstermiştir. Foteinis & Emmanuel Synolakis (2023) tarafından yapılan çalışmada ise tek bir saha (Girit Adası- Henya Körfezi) üzerinden Akdeniz su dalga enerjisi potansiyeli tahmini yapılmaktadır. Bu tahmin sonucunda dalga potansiyeli okyanuslara kıyasla yetersiz görülmüş, Akdeniz'de dalga enerjisinin başarılı bir şekilde kullanılmasının Avrupa Birliği'nin karbon nötr 2050 hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olabileceği ihtimal verilmiştir. Daha fazla vaka çalışmalarına ihtiyaç olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürde Avrupa kıtası için yapılmış diğer su enerjisi çalışmaları ise şu şekildedir: Jakimavičius & Akstinas (2023) tarafından yapılan çalışmada Litvanya'da su dalga enerjisi kaynakları incelenmiş ve rüzgâr – iklim etkileri araştırılmıştır. Çalışma, rüzgâr hızı ile dalga yüksekliği arasında güçlü bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Baltık Denizi, onu Atlantik Okyanusu'na bağlayan dar bir boğaza sahip oldukça kapalı bir denizdir. Bu nedenle rüzgâr, dalgaların oluşumu için ana kaynak olmaya devam etmektedir. Greaves ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada Avrupa dalga enerjisi test merkezlerinden çevresel etkileri değerlendirmek adına deneyimler toplanmıştır. Sosyo-ekonomik, fiziksel ve biyolojik etmenler tartışılmıştır. O'Hagan ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada Avrupa kıtasında dalga enerjisi konusunda bugüne kadar yapılmış deneyimler ve ilerlemeler üzerine bir çalışma yapılmıştır. Test alanından alınan verilerle mevzuatlar incelenmiş, eksik mevzuatlara deniz yenilenebilir enerji konusu eklenmiştir. Dalga enerjisi konusunda en büyük engelin karmaşık planlama sistemi olduğu ortaya konmuştur. Kalogeri ve ark. (2017) ifade ettiği üzere Avrupa'da en yüksek rüzgâr ve dalga enerjisi Kuzey Denizi'nin kuzey kesimindedir. Kapalı havzalar olduğundan Akdeniz, Karadeniz ve Baltık Denizi'nin dalga güç yoğunluğu düşüktür. Çalışmada amaç dalga – rüzgâr enerjisinin beraber kullanımının verimliliği olduğundan korelasyon ile en güçlü alanlar Aslan Körfezi, Ege Denizi ve Baltık Denizi olarak belirlenmiştir. Atlantik Okyanusu'nda bulunan Kanarya Adaları'nın güçlü potansiyeline de değinilmektedir. Rusu & Onea (2022) tarafından yapılan çalışmada Avrupa su-rüzgâr dalga enerjisi projelerine olumsuz hava koşullarının etkisi incelenmektedir. Okyanus alanlarından gelen rüzgâr koşullarının kapalı denizlerden gelenlerden önemli ölçüde daha yüksek olduğu kanısına varılmaktadır.

Su dalga enerjisi teknolojileri, genellikle okyanustan gelen enerjiyi çoğunlukla dalga yoğunluğundan dolayı tercih etmektedir. Bu alanda Avrupa kıtası, özellikle Atlantik Okyanusu'na kıyısı olan ülkelerin bulunmasından kaynaklanan avantajlarla öne çıkmaktadır. Özellikle Atlantik kıyısı boyunca kaynakların mevcudiyeti ve zenginliği sayesinde dalga ve gelgit enerjisinin bu konumdaki gelişmeleri oldukça hızlı devam etmektedir. Atlantik Okyanusuna kıyısı olan Avrupa kıtası ülkeleri:

İngiltere, Fransa, İspanya, Portekiz, Norveç, İzlanda, İrlanda olarak sayılabilmektedir. Literatürde bu ülkelerin deniz enerjisi ile adı çoğu zaman yan yana geçmektedir. Yani söz konusu ülkeler Atlantik Okyanusu potansiyelinin farkında ve bu konuda projelerini sürdürmektedir.

AB'de amaç, 2050 yılına kadar kurulu 100 GW birleşik dalga ve gelgit kapasitesine ulaşmaktır (Magagna & Uihlein, 2015). Avrupa gelgit enerji projelerine ait verilerin çok az bir kısmının kamuya açık olduğu bilinmektedir. İlk projeler tam olarak bilinemese de Lamy & Azevedo (2018)'e göre, Eday Adasında bulunan "Fall of Warness" adlı test tesisinin ilk tesis olduğu tahmin edilmektedir. Pentland Firth'de bulunan "Meygen" adlı tesisin ise Avrupa'da kurulan ikinci gelgit tesisi olduğu tahmin edilmektedir. Şu anda Avrupa Birliği okyanus enerjisi teknolojisi gelişimi için genel itibariyle ön safhada aşamasında olduğu söylenebilir. Gelgit enerjisinin %50'sinden fazlasına, dalga enerjisi geliştiricilerinin ise yaklaşık %45'ine Avrupa ev sahipliği yapmaktadır. Bugüne kadar, okyanus enerjisi test merkezleri ve dağıtım sahaları gibi okyanus enerjisi altyapısının çoğunluğu da Avrupa sularında bulunmaktadır. Okyanus enerjisinde gerekli teknolojik altyapı için Avrupa, birçok politika ve Ar-Ge faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Bunlardan bazıları; OceaneraNET Ar-Ge çalışması, MariNet Avrupa deneysel tesis test çalışması ve 135 eyaletin dahil edildiği küresel IRENA politikasıdır (Magagna & Uihlein, 2015).

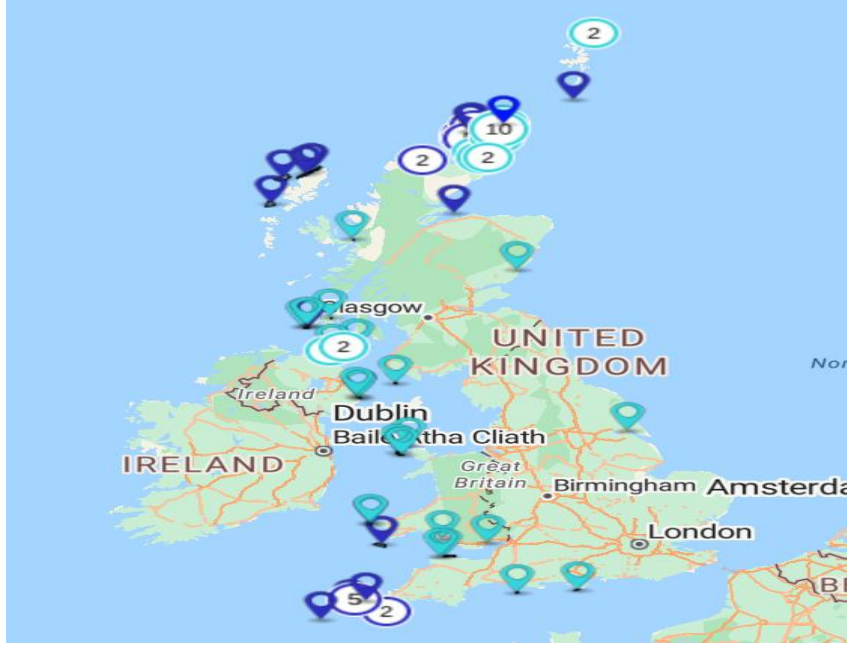
Tablo 1. Avrupa kıtasında yapılmış su enerjisi çalışmaları

Literatürdeki Çalışmalar	Çalışma Alanları				
	Atlantik Okyanusu	Baltık Denizi	Kuzey Denizi	Karadeniz	Akdeniz
Gonçalves ve ark. (2014)	√				
Greaves ve ark. (2016)	√	√	√		√
Rusu & Onea (2016)	√				
O'Hagan ve ark. (2016)	√	√	√		√
López-Ruiz ve ark. (2016)					√
Lavidas ve ark. (2017)	√				
Kalogeri ve ark. (2017)	√	√	√	√	√
E. Rusu & L. Rusu (2021)			√		
Rusu & Onea (2022)	√	√	√	√	√
Choupin ve ark. (2022)	√				
Foteinis & Emmanuel Synolakis (2023)					√
Jakimavičius & Akstinas (2023)		√			
Alday & Lavidas (2024)			√		

Avrupa kıtası, Atlantik Okyanusunun dışında; Baltık Denizi, Akdeniz, Karadeniz ve Kuzey Denizini barındırmaktadır. Kalogeri ve ark. (2017)'na göre Akdeniz, Karadeniz ve Baltık Denizi kapalı havzalar olması sebebi ile bu denizlerde dalga güç yoğunluğu düşüktür. Kuzey Denizi'nin ise kıyı çevresi, deniz yenilenebilir enerjisinin toplanması açısından dünyanın en önemli alanları arasındadır. (Rusu & Rusu, 2021). Akdeniz, yıllık ortalama dalga gücüne sahip düşük enerjili bir denizdir. Akdeniz dalga iklimi, Karadeniz gibi diğer düşük enerjili denizlerle karşılaştırılabilir, nispeten enerji alanları ise Yunanistan'da bulunmaktadır (Foteinis & Emmanuel Synolakis, 2023). Genellikle, deniz alanlarından elde edilen doğal kaynaklar karadan daha önemlidir ve Karadeniz veya Hazar denizleri gibi bazı kapalı deniz havzaları bile belirli yerlerde uygulanabilir deniz enerjisi projeleri geliştirmek için uygun koşullar sağlayabilir (Rusu & Onea, 2022).

Su enerjisi teknolojileri, Dünya bazında çok yeni bir teknoloji olmasına rağmen, Avrupa bu konuda birçok projeye öncülük etmektedir. Son zamanlarda Avrupa Birliği tarafından finanse edilmiş Ocean DEMO projesinin başarısından sıkça söz edilmektedir. Bu proje; tek makineden çok cihazlı çiftliklere geçişi desteklemektedir. Proje kapsamında; Fransa, Hollanda ve Birleşik Krallık'taki Ocean DEMO ulusal elçileri, endüstri için destekleyici bir politika ortamı yaratmak için kendi ülkelerindeki

okyanus enerjisi paydaşlarıyla yakın bir şekilde çalışmıştır. Bu çalışmalar sayesinde, Hollanda siyasi destek, Birleşik Krallık ise gelgit enerjisi için hatırı sayılı maddi destek sağlamıştır. Aynı zamanda Fransız Hükümeti dünyanın en büyük gelgit çiftliği projesinin geliştirilmesine desteğini açıklamıştır (Avrupa Deniz Enerjisi Merkezi, 2024).



Şekil 4. Birleşik Krallık'a ait akıntı ve gelgit projeleri (RenewableUK Marine Energy Database, by eSpatial Mapping Software).

Dalga ve gelgit enerjilerine olan yatırımları ile bilinen Birleşik Krallık'a ait tüm akıntı ve gelgit projeleri hakkında bilgi sağlayan veri tabanı oluşturulmuştur. Şekil 4'te turkuaz pinler gelgit enerji projelerini, mavi pinler ise dalga enerji projelerini sembolize etmektedir. Haritadan da anlaşılacağı üzere; Birleşik Krallık, iklim hedefleri, gelişmiş teknoloji düzeyi, yatırım ve araştırma potansiyeli ve en önemlisi de okyanus potansiyeline sahip olması nedeniyle Avrupa'da okyanus enerjileri kapsamında öncü kabul edilmektedir. Birleşik Krallıkla bağlantısı olan ve Atlas Okyanusu'na kıyısı bulunan ülkelerin de bu konuda gelişmekte olduğu incelenen kaynaklar sonucunda anlaşılmaktadır. İklim planları doğrultusunda; İrlanda 2030 yılına kadar 30MW, 2040 yılına kadar ise 110 MW deniz enerjisi hedeflemektedir. Portekiz, 2030 yılına kadar 70 MW; İspanya ise 2030 yılına kadar 40-60 MW deniz enerjisi hedeflemektedir (IRENA, 2023).

2.2. Asya ülkelerinde su enerjisi potansiyeli

Literatürdeki çalışmalara göre Asya bölgesinde gelişmişlik düzeyi fazla olan ülkeler baz alınarak Tablo 2 oluşturulmuştur.

Çin Denizi'nde yapılan çalışmalar, bölgedeki rüzgâr ve dalga enerjisi potansiyelini değerlendirmek için çeşitli araştırmaların yapıldığını göstermektedir. Bu çalışmalardan bazıları şunlardır: Zheng ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada, 1988 – 2009 yılları arasına ait 20 yıllık rüzgâr ve dalga enerjisi verileri kalibre edilmiş ve rüzgâr-dalga enerjisi yoğunluğu simülasyon programları kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda Çin Denizinde söz konusu enerjilerin değerlendirilebilir olduğu ve en yoğun bölgenin ise Güney Çin Denizi olduğu ortaya konmuştur. Qiu ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada ise Çin'in deniz yenilenebilir enerji potansiyeli için yaptığı çalışmalar ve ortaya koyduğu sonuçlar incelenmiştir. Çin denizlerinde (Doğu Çin Denizi, Gelgel Denizi, Güney Çin Denizi) genel olarak dalga periyodu küçük ve dalga boyu kısa olmasına rağmen ülke bazında ciddi çalışmalar ve yatırımların yapıldığı ortaya konmuştur. Kamranzad & Lin (2020) tarafından yapılan çalışmada Güney Çin Denizine ait 55 yıllık veriler ve SWAN modeli kullanılarak bölgedeki su dalga enerjisinin potansiyeli ve sürdürülebilirliği üzerine bir çalışma yapılmıştır. Çalışma sonucunda kıyıya

yakın olan Luzon Boğazı, Vietnam Güneydoğusu ve Güney kıyılarında potansiyelin fazla olduğu sonucuna varılmıştır. [Dai ve ark. \(2023\)](#) tarafından yapılan çalışmada gelgit çiftlikleri arasında en umut verici su kaynağı olan Çinde'ki Zhoushan takımadalarında gelgit enerji potansiyeli araştırılmıştır. Gelgit hareketi simülasyonu için üç boyutlu sayısal model oluşturulmuştur. Model sonuçlarına göre güç yoğunluğuna sahip alanlar belirlenmiştir. Bunlar: Guishan, Guanman, Xihoumen ve Luotou kanallarıdır.

Japonya Denizi'nde yapılan çalışmalar, bölgedeki rüzgâr ve dalga enerjisi potansiyelini değerlendirmek için çeşitli araştırmaların yapıldığını göstermektedir. [Bricker ve ark. \(2017\)](#) tarafından yapılan çalışmada, Japonya'nın nükleer felaket sonrasında yenilenebilir enerji kaynaklarından su dalga enerjisi potansiyeli üzerinde yeteri kadar durulmadığından ötürü, söz konusu makalede dalga ve gelgit verileri kullanılarak Japonya'da su dalga enerjisi potansiyeli araştırılmıştır. Çalışma sonucunda Kuzey Japonya'da kullanılan salınlı su dalga dönüştürücüleri mevcut elektrik fiyatına yakın maliyetler gösterdiği ortaya konmuştur. Bu bölgede su dalga enerjisi konusunda gelişimin mantıklı olduğu sonucuna varılmıştır. [Wang \(2020\)](#) tarafından yapılan çalışmada ise Japonya Denizinden alınan veriler ile dalga enerji dönüştürücünün güç performansı araştırılmıştır. Yükseklik verileri ultrasonik tip dalga ölçerler ile ölçülmüştür. Japonya Denizi gibi dalgaları doğrusal olmayan denizler için, yeni bir metodoloji önerilmiştir.

Su enerjisi araştırmaları; Pasifik Okyanusu, Japonya ve Çin Denizi'nde ilgi görmektedir. Söz konusu bölgelerin hepsini kapsayan çalışmalardan bazıları şunlardır: [Kamranzad & Takara \(2020\)](#) tarafından yapılan çalışmada Kuzeydoğu Asya bölgesinin elli yıllık dalga iklimi simülasyonu ile dalga potansiyelleri araştırılmıştır. Enerji potansiyeli uygun alanların tespiti için sürdürülebilirlik endeksi kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre doğu Pasifik bölgesinde kış ve ilkbahar mevsimlerinde mevsimsel değişkenlik fazladır. Batı Pasifik için sonbaharda değişkenliğin yüksek olduğu görülmüştür. Japonya'nın kışın dalga gücünün yüksek olduğu görülmüştür. Simülasyona göre Japonya doğu pasifik okyanus dalgalarından enerji sağlamak için en uygun alan olarak belirlenmiştir. [Webb ve ark. \(2020\)](#) tarafından yapılan çalışmada Japonya'nın dalga gücü değerlendirmek amacıyla 21 yıllık dalga simülasyonu oluşturulmuştur. Simülasyona göre Japonya'nın dalga gücü, 70 nükleer santrale eşdeğer ve yaklaşık olarak 70 GW bulunmuştur.

Literatürde Asya bölgesinde yapılmış diğer çalışmalar ise şunlardır: [Chen ve ark. \(2023\)](#) tarafından yapılan çalışmada Tayvan'ın Kuzeydoğu bölgesi için dalga potansiyeli araştırılmıştır. 4 sahada 10-14 yıl boyunca oluşan dalga verilerinin saatlik ölçümleri baz alınmıştır. Santral tasarımı için ise Pasifik okyanusunda yapılmış önceki çalışmalarla kıyaslanmıştır. Tayvan için dalga potansiyeli orta dereceli olarak belirlenmiştir. Muson ve tayfunlardan önemli ölçüde etkilenildiği bildirilmiştir. [Harameen & Akman \(2023\)](#) tarafından yapılan çalışmada ise Asya kıtası ülkelerindeki yenilenebilir elektrik üretim sektörü ele alınmış ve bu ülkeler toplam elektrik üretimlerine göre kümeleme analizi ile kümelere ayrılmıştır. Asya bölgesindeki karbon emisyonu miktarını ölçmek için çoklu regresyon modeli oluşturulmuştur. Veriler 2019 yılı toplam elektrik üretimlerine göre gruplandırılmıştır. GSYİH'nin yenilenebilir enerjiye etkisini incelemek için korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Tüm bu analiz ve modellemeler için SPSS paket programı kullanılmıştır. Kümeleme analizi sonucunda Çin, Japonya, Hindistan ve Türkiye'nin yenilenebilir enerji konusunda öncü kümede olduğu, Arap körfezi kıyılarının ise kaynaklarını verimli kullanmadığı ortaya çıkmıştır. GSYİH'nin ise elektrik üretimi ile güçlü bir ilişkisi olduğundan bahsedilmektedir.

Tablo 2. Asya Kıtası'nda yapılmış su enerjisi çalışmaları

Literatürdeki Çalışmalar	Çalışma Alanları							
	Pasifik Okyanusu	Hint Okyanusu	Japonya Denizi	Filipin Denizi	Karadeniz	Arap Denizi	Çin Denizi	Basra Körfezi
C. Zheng ve ark. (2013)							√	
Bricker ve ark. (2017)			√					
Qiu ve ark. (2019)							√	

Tablo 2. Asya Kıtası'nda yapılmış su enerjisi çalışmaları (devam)

Literatürdeki Çalışmalar	Çalışma Alanları							
	Pasifik Okyanusu	Hint Okyanusu	Japonya Denizi	Filipin Denizi	Karadeniz	Arap Denizi	Çin Denizi	Basra Körfezi
Kamranzad & Takara (2020)	√		√				√	
Kamranzad & Lin (2020)							√	
Wang (2020)			√					
Webb ve ark. (2020)	√		√				√	
Chen ve ark. (2023)	√			√			√	
Dai ve ark. (2023)							√	
Harameen & Akman (2023)	√	√	√	√	√	√	√	√

Asya bölgesinde gelişmişlik düzeyi yüksek olan ülkelerden birisi olarak gösterilen Japonya, 2011'de yaşadığı deprem, tsunami ve Fukuşima Nükleer Santral kazası sonrası tüm nükleer üretim santrallerini kapatmak zorunda kalmıştır. Aynı zamanda ithal enerjiye bağımlı hale gelmiştir. Bu felaketten önce nükleer santrallerin Japonya'nın elektrik üretiminin %27'sini oluşturmakta olduğu bilinmektedir. Kazanın bir sonucu olarak da Japonya, yenilenebilir enerji konusunda çalışmalarını geliştirmeye başlamıştır. Japonya'nın bir ada olması sebebiyle deniz kaynaklarının bol olduğu bilinmektedir (Bricker ve ark., 2017). Japonya'nın batısı Doğu Çin Denizi, güneydoğusu Filipin Denizi, batı kıyıları Japon Denizi ve doğu kıyıları Pasifik Okyanusu ile çevrilidir. Japonya su dalga enerjisi konusunda öncü ülkelerden birisi olarak gösterilmektedir. Yoshio Masuda, 1940'lardan beri Japonya'da dalga enerjisi teknolojisinin ilk çalışmalarını yapan kişi olarak kabul edilmektedir. Japonya, salınımlı su sütunu dönüştürücüleri ile okyanus dalgalarından kullanılabilir güç elde etmek için teknolojinin saha test liderlerinden biridir. 1970'lerden 1980'lere kadar, Japon araştırmacılar "Kaimei" (1976-1986) ve "Mighty Whale" (1987-2004) geliştirdiler. Japonya'da bilinen salınımlı su sütunu dönüştürücülerinden ilki 1983 yılında inşa edilmiş, 40 kw kurulu güce sahip Sanze salınımlı su sütunu dönüştürücüleridir. 1988 yılında 30 kw kurulu kapasiteye sahip Kujukuri- Japonya bölgesinde inşa edilmiştir. 1989'da ise 60 kw kurulu güce sahip Sakata- Japonya bölgesinde inşa edilmiştir. Bu tesisler Pasifik Okyanusuna kıyısı olan yerlerde kurulmuştur. Ayrıca Japonya Denizinde inşa edilmiş Niigata tesisi de yer almaktadır (Molina ve ark., 2022). Wang (2020)'e göre Japonya Denizi'ne ait dalgalar, karmaşık ve düzensizdir. Buna rağmen Japonya'nın denize bir tesis kurmuş olması Japonya'nın dalga enerjisini ciddiye aldığı ve denize santral kurmak konusunda başarılı olduğunu göstermektedir. Su dalga enerjisi konusunda Japonya'nın öncü olduğu aynı zamanda ciddi yatırımlarına ve çalışmalarına devam ettiği görülmektedir.

Asya ülkeleri arasında gelişmişlik düzeyi yüksek olan ülkelerden bir diğeri ise Çin'dir. Çin, şu anda dünyanın en büyük enerji tüketen ülkesidir ve dünyanın toplam enerji tüketiminin yaklaşık beşte birini oluşturmaktadır. 2030 yılına kadar Çin'in enerji tüketiminin %60 oranında artması beklenmektedir (IRENA, 2015). Çin'de dalga enerjisi dönüştürücü araştırma ve mühendislik uygulamasının başlaması 1970'lerin sonlarına kadar uzanmaktadır. Çin'de, genel olarak bakıldığında dalga periyodu nispeten küçüktür ve dalga boyu kısadır. Çin'in düşük dalga güç yoğunluğuna uygun dönüştürücüler tasarlamak için farklı araçlar kullanılmalıdır. Çin'deki dönüştürücüler ilgili bilgi ve uzmanlık düzeyi, Batı ülkelerine kıyasla olgunlaşmamıştır, ancak bu konuda ilgi son derece yüksektir (Qiu ve ark., 2019) ve kurulu bir tesisin varlığı bilinmektedir (Astariz & Iglesias, 2015). İlgili tesis, Güney Çin Denizine kıyısı olan Shanwei şehrinde (Molina ve ark., 2022). Genel olarak Asya bölgesi için su dalga enerjisi konusunda çalışmaların fazla olduğu ülkelere birisi Çin'dir. Bu konuda ciddi yatırımlar yapıldığı görülmektedir.

Asya ülkeleri açısından bakıldığında gelişmişlik düzeyi ile su dalga enerjisi potansiyeli arasında ilişki olduğu taranan literatür sonucunda ortaya konulmaktadır. Japonya ve Çin'in kıyısı olduğu deniz ve okyanuslar bu konuda şanslıdır. Araştırmalar sonucunda şu an Kuzey Amerika ve Avrupa'da oldukça popüler olan su dalga enerjisi teknolojilerine öncü olan ülkenin bir Asya ülkesi olarak Japonya olduğu anlaşılmıştır. Zaman zaman okyanus teknolojileri olarak da adlandırılan su dalga enerjisi teknolojilerini

denizlerde de kullanmayı başarmışlardır. Japonya ve Çin yenilenebilir enerjinin dünya çapında önemsenmesiyle birlikte ciddi yatırımlarına ve çalışmalarına devam etmektedir.

2.3. Türkiye'de su enerjisi potansiyeli

Asya ile Avrupa arasında kritik bir nokta olan Türkiye, enerji kullanım seviyesi ve kritik konumu sebebiyle enerji politikaları açısından oldukça önemli bir konumdadır (Es ve ark., 2014). Enerji kullanım seviyesi, toplumların gelişmişlik düzeyinin gösterilmesinde kullanılan önemli parametrelerden bir tanesidir (Altaş & Şahin, 2019). Türkiye elektrik sektörü açısından son yirmi yılda hızlı bir büyüme göstermiş; üretim miktarı iki kattan, kurulu kapasite ise üç kattan fazla artmıştır. Sektörün ithal fosil yakıtlara olan yüksek bağımlılığı, yenilenebilir kaynakların kullanımındaki önemli gelişmeler nedeniyle yavaşlama eğilimindedir (Önenli ve ark., 2023). Söz konusu gelişmeler, CO₂ emisyonunun azalmasına katkı sağlamanın yanı sıra çevreye zarar veren etkilerin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır (Yücel ve ark., 2021).

Son dönemde, Türkiye enerji sektöründe büyük bir dönüşümü gerçekleştirme gayretindedir. Öne çıkan gelişmeler arasında, güneş enerjisi teknolojilerinde artan faaliyetler göze çarpmaktadır. Türkiye, güneş enerjisi alanındaki bu hızlı ilerleme ile fosil yakıtlardan daha temiz ve çevre dostu bir enerji kaynağına geçiş yapma vizyonunu güçlendirmiştir. Bu adımlar, Türkiye'nin sadece kendi enerji altyapısını güçlendirmekle kalmayıp aynı zamanda küresel çapta bir liderlik rolü üstlenmeye hazırlandığını göstermektedir.

NATO TU WAVES projesi ile Türkiye; 1994-2000 yılları arasında, dalga iklimini incelemek için Karadeniz'e kıyısı olan tüm ülkelerin bilimsel kurumlarını içeren ilk uluslararası araştırmayı yapmıştır (Abdalla & Özhan, 1999). Bu kapsamda Gelendzhik, Hopa ve Sinop'taki üç yönlü dalga şamandıralarından dalga kayıtları toplanmıştır. Gelecekteki çalışmalar için uygun model verileri ve simülasyonlar belirlenmiştir (Çalışır & Akpınar, 2020). Türkiye, 2016'da imza attığı Paris antlaşması ile Avrupa Yeşil Mutabakatı koşul ve sonuçlarını kabul etmiştir (Kocalar, 2022). Bu koşullara göre yenilenebilir enerji konusunda faaliyetlerini hızlandırmaktadır. Bu kapsamda Türkiye'de önde gelen yenilenebilir enerji kaynakları olarak güneş enerjisi, jeotermal enerji, rüzgâr enerjisi, hidro enerji, biyokütle enerjisi sayılmaktadır (Özdemir, 2019).

Türkiye'nin kıyı uzunluğunun yaklaşık 8210 km (Hepbaşlı ve ark., 2001) olduğu bilindiği halde su dalga enerjisini kullanmıyor olması, araştırmacıların ve deniz bağlantısı olan diğer ülkelerin dikkatini çekmektedir. Zira ülkede henüz dalga enerjisi kullanılmıyor olması birkaç faktöre bağlanabilir. Bu durumun temel sebepleri arasında, dalga enerjisi teknolojilerinin maliyeti, altyapı eksiklikleri ve Türkiye'nin iç denizlerinin deniz akısının düşük yoğunluğa sahip olması gibi etkenler ön plana çıkmaktadır. Türkiye'de henüz su dalga enerjisi kullanılmıyor olsa bile bu konu hakkında çeşitli çalışmalar bulunmaktadır ve konuyla ilgili geçmişte yapılmış prototipler de mevcuttur. Dalga enerjisine yönelik çalışmalar Türkiye'de genellikle pilot proje konumundadır. Türkiye'de yenilenebilir enerji kapsamında su dalga enerjisi üzerinde yapılmış çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

Literatürde Türkiye'nin Karadeniz sahilinde yapılan çalışmalar diğer bölgelere nazaran fazladır. Karadeniz sahilindeki su enerjisi çalışmalar şu şekildedir: Uygur ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmada, Düzce'nin Akçakoca ilçesindeki sahillerinin dalga potansiyeli ölçülerek Türkiye'deki denizlerin güç potansiyeli açısından su dalga enerjisi santral teknolojisine uygunluğu araştırılmıştır. Araştırma, Akçakoca rasathanesinden belli saat aralıklarında alınmış 5 yıllık veriler içermektedir. 1996 yılından 2000 yılına kadar yapılan dalga yükseklikleri ölçümleri incelendiğinde, Akçakoca sahillerinin ortalama dalga yükseklikleri 0,55 m olarak ölçülmüştür ve dalga gücü potansiyeli yarı ampirik bir şekilde hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda hesaplanan güç potansiyelinin söz konusu bölgede yeterli düzeyde olduğunu, ancak maliyetler açısından zorlayıcı olduğu belirtilmektedir. Jafalı (2019) tarafından yapılan çalışmada, Karadeniz'in güney-batı kıyılarının dalga enerjisi potansiyeli açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu kapsamda SWAN modeli kullanılmıştır. Çalışma için, 1979- 2009 yılları arasında Sinop, Karaburun ve Filyos'un yıllık ortalama dalga enerji akısı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda Filyos'un ortalama dalga enerjisi 3-7 s, Karaburun için bu değer 2-5 s ve Sinop için ise 2.5-6.5 s'dir. Güngör (2019) tarafından yapılan çalışmada, iç denizlerden sağlanacak dalga enerjisi üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Karadeniz'e uygun dalga üretim sistemi üzerinde çalışılmıştır. Bu kapsamda salınlı su sütunu sistemi ve deniz dalga dönüştürücü sistemi modeli kullanılmıştır. Trabzon Araklı sahilinde test edilmiştir. Verim açısından, deniz dalga dönüştürücü sisteminin salınlı su sütunu

sistemine göre daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır. Halihazırda var olan herhangi bir sistemin Türkiye'nin iç denizlerine entegre edilemeyeceği konusunda bir sonuca varılmıştır. Yeni bir sistem için ise Ar-Ge çalışmaları geliştirilmelidir. [Erselcan & Kükner \(2020\)](#) tarafından yapılan çalışmada, Karadeniz kıyılarında en uygun dalga dönüştürücüsünü seçmek amacıyla bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Sonuç olarak dalga enerjisi dönüştürücülerinin farklı şamandıra geometrilerinin üzerinde fark yarattığı, her dönüştürücünün dalgayı yakalama potansiyelinin farklı olduğu sonucuna varılmış, uygun geometri şamandıralardan bahsedilmiştir. [Özbek & Ergül \(2022\)](#) tarafından yapılan çalışmada, Karadeniz'de kurulabilecek su dalga enerjisi santrali için en uygun yeri belirlemek amaçlanmıştır. Bu kapsamda çok kriterli karar verme yöntemlerinden ANP yöntemi kullanılmıştır. Çalışma için dikkate alınan şehirler: Samsun, Sinop, Trabzon, Ordu ve Giresun'dur. Kriterlerin 3 uzman tarafından sıralandığı bilinen çalışmada en uygun yer seçim sırasıyla: Sinop, Ordu, Samsun, Giresun, Trabzon'dur.

Literatürde Türkiye'nin su dalga enerjisi potansiyelini genel olarak değerlendiren ve dönüştürücülere yönelik laboratuvar çalışmalarını içeren diğer çalışmalar şu şekildedir: [Sağlam ve ark. \(2010\)](#) tarafından yapılan çalışmada, dalga enerjisinin Türk sularında kullanılma potansiyeli araştırılmaktadır. Türkiye'nin dalga enerjisi kaynakları gözden geçirilmiş, ardından saha seçimi hakkında çalışılmış ve Türkiye'nin güneybatısında bir vaka incelemesi yapılmıştır. NATO'nun TU-WAVES projesi kapsamında Türkiye'de Karadeniz, Marmara, Ege ve Akdeniz sahilleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda Batı Karadeniz, İstanbul Boğazı'nın kuzeyi, Ege bölgesinin güneybatısı ve batısındaki kıyılar ülkedeki diğer bölgelere nazaran dalga enerji potansiyelinin yüksek olduğu yerler olarak belirlenmiştir. Türkiye'nin dalga enerjisini hayata geçirebilmek adına yeni teknolojilere ihtiyaç duyduğu kanısına varılmıştır. [Mert \(2012\)](#) tarafından yapılan çalışmada, dünyada ve Türkiye'de su dalga enerji potansiyeli üzerinde durulmuş, aynı zamanda iki farklı dalga dönüşüm sistemi tasarlanmıştır. Model geliştirilmesi cam dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen model verimsiz bulunmuş ve geliştirilmesi için öneriler sunulmuştur. Potansiyel olarak Türkiye'nin potansiyelinin değerlendirilebilir olduğunu, ama henüz teknik olarak yeteri kadar veriye sahip olmadığını belirtmiştir. [Kapluhan \(2014\)](#) tarafından yapılan çalışmada, dalga enerjisi konusu Türkiye ve dünya potansiyeli ele alınarak araştırılmıştır. Potansiyel alanların olduğundan fakat bu konuda Ar-Ge çalışmalarının artırılması gerektiğinden söz edilmektedir. [Özdamar ve ark. \(2016\)](#) tarafından yapılan çalışma, su dalga enerjisi türbinlerinin verimliliği değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, salınan su sütunu tipi türbinleri incelenmiştir. ANSYS fluent paket programında analizi gerçekleştirilen türbinin verimi negatif yönde %40'a varan sonuçlara yaklaşmıştır. [Kıldiran \(2018\)](#) tarafından yapılan çalışmada, Antalya ili için dalga potansiyeli araştırılmıştır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan saatlik rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü araştırmada kullanılmıştır. Dalga yükseklikleri Wilson metodu ile belirlenmiştir. Antalya'nın 11 bölgesi için yapılan bu çalışmada, Kaş'ın yatırım yapılabilir bir alternatif olduğu ortaya çıkmıştır. [Özdemir \(2019\)](#) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'nin alternatif yenilenebilir enerji potansiyeli kaynakları çok kriterli karar verme yöntemlerinden PROMETHEE ile kıyaslanmıştır. Belirlenen kriterlere göre, alternatif sıralamasına göre 7 enerji kaynağından dalga enerjisi, PROMETHEE akış tablosunda son sırada yer almıştır. [Altaş & Şahin \(2019\)](#) tarafından yapılan çalışmada dalga enerji potansiyeli Türkiye ve Dünya açısından ele alınmaktadır. Aynı zamanda dönüştürücü sistemleri incelenmektedir. Türkiye potansiyeli Ar-Ge çalışmalarına destek verilmesi kanısına varılmaktadır. Türkiye ve su dalga enerjisi potansiyeli konusunda Batı Karadeniz ve Ege kıyıları hakkında olumlu yargılara varılmıştır. [Demirok & Koçer \(2020\)](#) tarafından yapılan çalışmada, dalga enerjisinden elektrik üretmek için Wells türbinli bir cam hazne sistemi kurulmuştur. Cam hazneye manuel dalgalar gönderilmiştir. Kurulan sistemde 120 saniyede 13.5 voltluk elektrik üretilmiştir. [Öztunalı Özbahçeci ve ark. \(2020\)](#) tarafından yapılan çalışmada, ekstrem dalga analizinde kullanılmak üzere ilk kez Türkiye kıyıları boyunca en uzun ve tutarlı dalga verilerini elde etmek için yüzyıl bazında dalga verilerinin kalibre edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veri seti ile ilerleyen dönemde Türkiye kıyılarında yapılacak çalışmaların desteklenmesi öngörülmektedir. [Gülçelik & Diri \(2021\)](#) tarafından yapılan çalışmada dalga enerjisi kullanılarak çalışan jeneratör önerisi sunulmuştur. Bunun için pilot sistem kurulmuştur. Çevresel teorik hesaplamalar, enerji hesabı ve yıllık enerji üretimi ortaya koyulmuş, kurulan sistemin başarılı olacağına ve Karadeniz konumunun bunun için en iyi alternatif olduğu sonucuna varılmıştır. [Aydiner & Öztürk \(2021\)](#) tarafından yapılan çalışmada, rüzgâr ve dalga enerji sistemleri kurulumu için en uygun alanı seçmek amaçlanmıştır. Bu kapsamda Ege denizi sahilleri baz alınmıştır. Yer seçimi coğrafi bilgi sistemi tabanlı analitik hiyerarşi prosesi ile yapılmıştır. Kriterler literatür taraması baz alınarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre Ege Denizi için, Bozcaada en uygun alandır. [Karaköse & Koca \(2022\)](#)

tarafından yapılan çalışmada potansiyeli düşük su dalgalarından yüksek enerji verimi alabilmek üzere Fırat Üniversitesi Enerji Laboratuvarında bir prototip hazırlanmıştır. Bu prototip için dalga periyot aralığı 2-6 saniye, dalga yüksekliği 2-7 cm olarak belirlenmiştir. Sonuç başarılı olmuştur. Deniz dalgaları okyanus dalgalarından daha zayıf olduğu için üç tarafı denizlerle çevrili Türkiye'de bu sistem uygulanabilir kanısına varılmıştır. [Türker & Aydın \(2022\)](#) tarafından yapılan çalışmada Türk mevzuatının Avrupa yeşil mutabakatına ne kadar hazır olduğu üzerine bir araştırma yapılmıştır. Çalışmaya göre Türkiye; mevzuattaki ilkeler açısından değerlendirildiğinde, ortalama bir konumdadır. [Önenli ve ark. \(2023\)](#) tarafından yapılan çalışmada Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli araştırılmıştır. Doğrusal programlama ile elektrik tüketimi için makul bir model oluşturulmuştur. Analiz sonucunda bu konunun öneminden ve Türkiye'nin 2030'dan 2040 yılına kadar yenilenebilir paya, sırasıyla %53.3, %67.3 ile ulaşabileceği tahmininde bulunmuştur.

Dalga enerjisinin, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi popüler enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında öne çıkan en önemli özelliği, en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır ([Altaş & Şahin, 2019](#)). Türkiye ise enerji yoğunluğu konusunda bu denli verimli bir kaynak için henüz somut adımlar atamamıştır. Bunun sebeplerinin irdelendiği çalışmada literatürdeki kaynaklar incelenmiş, aynı hedeflere yönelik olarak su ve dalga enerjisinin Türkiye kıyılarındaki potansiyelini değerlendiren çeşitli çalışmalar analiz edilmiştir. Ayrıca, su dalga enerjisi dönüştürücülerini inceleyen ve kurulum için en uygun yer seçimlerini tartışan çalışmalar da bu analizin temelini oluşturmuştur.

Kıyı uzunluğu yaklaşık olarak 8210 km bilinen Türkiye'nin toplam sahil uzunluğunun yaklaşık beşte biri 18.5 TW saat/yıl (yaklaşık 2.11 GW) dalga enerjisi teknik potansiyeline sahiptir ([Hepbaşı ve ark., 2001](#)). [Sağlam ve ark. \(2010\)](#)'na göre ise ülkemizin dalga enerjisi potansiyeli yaklaşık 10 TW saat/yıl olarak belirtilmiştir. Ülkemiz iç denizlere sahip bir ülke olarak, çoğunlukla okyanus enerjilerinde kullanılan ve son derece teknolojik altyapı isteyen su dalga enerjisi teknolojisi konusunda henüz adım atmamış olması son derece olağandır. Fakat son dönemde artan yenilenebilir enerji politikaları ile bu konuda yeni adımlar atıldığı gözlemlenmektedir.

Söz konusu politikalarla ilgili çalışmalarda su dalga enerjisi potansiyeli için uygun yer seçimi çalışmalarına da yer vermektedir. Bu kapsamda [Sağlam ve ark. \(2010\)](#)'na göre İstanbul Boğazının kuzeyi, Marmaris- Finike kıyıları arası ve Batı Karadeniz bölgesi su dalga enerjisi potansiyeli açısından uygun yerler olduğu üzerinde durmuştur. [Altaş & Şahin \(2019\)](#)'e göre Ege ve Batı Karadeniz bölgelerinde yadsınamayacak kadar dalga enerjisi potansiyeli vardır. [Gülçelik & Diri \(2021\)](#)'e göre ise toplam enerji analizi yapıldığında Karadeniz'in su dalga enerjisi potansiyeli diğerlerine nazaran yüksektir. Mevcut çalışmalar incelendiğinde Karadeniz'in potansiyeli üzerinde durulmuştur. Konumu nedeniyle Karadeniz, enerji arzı açısından dört farklı avantaja sahiptir. Birincisi, bol miktarda rüzgâr ve dalga enerjisine sahiptir. İkincisi, önemli hidrojen sulfür rezervlerine sahiptir. Üçüncüsü hidrojen üretimi için avantajlı olan düşük tuz içeriğine sahiptir ve dördüncüsü, politik olarak istikrarlı bir fikir birliğine sahip bir bölgede yer almaktadır ([Güneş-Durak & Kapkın, 2024](#)).

Son dönemde Karadeniz'de su enerji dönüşüm sistemleri üzerinde çalışmalar da yapılmaya başlanmıştır ([Özbek & Ergül, 2022](#)). [Çokan \(2004\)](#) tarafından yapılan ve Karadeniz Ereğli kıyılarında denenen su dalga dönüştürücü prototipi KOSGEB ve TÜBİTAK destekleri ile hayat bulmuştur. Fakat prototipin dalgalara yenilmesi ile Ar-Ge çalışmalarının genişletilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Çokan, su dalga enerjisi üzerine kurduğu web sitesinde çalışmanın detaylarından bahsederken, verilen desteğin yetersiz kaldığı ve prototipin de bu sebeple deniz dalgalarına yenilecek kadar güçsüz olduğunu belirtmektedir. Prototip için seçilen yerin Batı Karadeniz olması, bu bölgenin dalga potansiyeli konusunda umut vadettiği kanısına varmamıza sebep olmaktadır. Söz konusu konu ile ilgili atılan bir diğer adım ise Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü ve Türkiye Elektromekanik A.Ş. iş birliği ile 2008'de yapılan prototiptir. Sakarya'nın Karasu ilçesinde gerçekleştirilen model 4 adet duba, şamandıra ve jeneratörden oluşturulmuştur ([Kaplukan, 2014](#)). Son dönemde konuşulan bir proje ise Ordu OREN Enerji dalga enerji projesidir. Batı Karadeniz Kalkınma Ajansı (BAKKA)'nın 2023'te yayımlanmış olduğu Kilimli Teknoloji ve Yatırım Üssü ön faaliyet raporunda bu pilot projeden de bahsedilmektedir ([BAKKA, 2023](#)).

Su dalga enerjisi, sağladığı avantajlar nedeniyle bazı ülkelerin elektrik enerjisi üretimi için kullandığı yenilenebilir bir enerji türüdür ve Türkiye için potansiyel yenilenebilir enerji kaynağı alternatifini kabul edilebilir. Ancak maliyetler, deniz ekosistemine olan etkileri ve kurulum altyapısının olmaması gibi sebeplerle, ülkemizde su dalga enerjisi dönüştürücülerinin Ar-Ge faaliyetlerine dayalı olarak geliştirilmesi gerektiği görülmektedir. Yapılan incelemede, özellikle

Karadeniz bölgesinin su dalga enerjisi potansiyeli konusunda umut verici olduğunu göstermiştir fakat Karadeniz adına yapılan çalışmalar oldukça kısıtlı ve azdır. Ayrıca denizlerin tuzluluk ve termal gradyan enerjileri için de yapılmış çalışmalara rastlanılmamıştır. Mevcut çalışmaların bir araya getirilmesiyle ortaya çıkan bilgiler, “Bu alanda daha fazla araştırma ve geliştirme faaliyetine yönlendirebilir.” olduğunu göstermektedir. Türkiye, söz konusu enerji için öncü olan ülkelerin yol haritalarını izlemelidir. Paydaşlarının yaptığı çalışmaları da yakından izlemeli ve iş birliği yapmalıdır.

3. Su Dalga Enerjisi Potansiyelini Tahmininde Kullanılan Yapay Zekâ Teknikleri

Babarit (2017) kitabında dalga enerjisi dönüştürücülerinin en fazla sayıda patentin bulunduğu teknolojik alan olduğundan bahsetmektedir. Henriques ve ark. (2016) ise çalışmasında binlerce su dalga enerjisi dönüştürücü patentlerine rağmen ana sorunun cevapsız kaldığından bahseder. Henriques ve ark. (2016)'e göre dalga enerjisi ile ilgili ana sorun: dalga döngülerine dayanabilecek ve rekabetçi bir fiyatla elektrik üretecek bir cihazın tasarlanmasının mümkün olup olmadığıdır. Henriques ve ark. (2016) tasarlanan çoğu dönüştürücünün tasarımlarına özgü çok büyük torklar nedeniyle ticari aşamaları geçemediğinden bahsetmektedir. Dalga tahminleri ise, dalga enerjisi cihazlarının tasarım ve kontrol stratejilerini optimize etmeye yardımcı olabilir. Örneğin, dalga koşullarını doğru tahmin etmek, cihazın maksimum verimlilikle çalışması için latching kontrol gibi stratejilerin uygulanmasına olanak tanır. Bu, dalgaların enerjisini daha etkili bir şekilde yakalayarak kuvvet ve tork taleplerini azaltabilir. Doğru dalga tahminleri, cihazın aşırı dalga ve değişen hava koşullarında nasıl davranacağını önceden belirlemeye yardımcı olabilir. Çalışmanın önceki bölümünde de bahsi geçen Bergen Şehrindeki fırtınada yıkılan dönüştürücüler gibi birkaç dönüştürücü prototipi büyük dalgalar tarafından tahrip edilmiştir (Babarit, 2017). Doğru dalga tahminleri dönüştürücülerin hayatta kalmasına da yardımcı olabilmekte ve olası fırtınalardan dönüştürücülerini koruyabilmektedir.

Dalga periyodunun önceden tahmin edilmesi, yüzey dalgaları hakkında bilgi sağlayarak açık deniz uygulamalarının optimizasyonu için önem taşır. Son yıllarda, makine öğrenimi ve hesaplama yeteneklerindeki gelişmeler, veriye dayalı dalga tahmin yöntemlerine ilgiyi artırmıştır. Bu yöntemler, doğrusal olmayan okyanus koşullarının getirdiği zorlukları aşarak daha verimli ve etkili tahminler sağlamaktadır (Chen ve ark., 2024). Öte yandan bu çalışmalarda genelde derin öğrenme, makine öğrenimi, yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi çeşitli yapay zekâ tekniklerinden faydalandığı görülmektedir. Birçok alandaki mühendislik çalışmalarında olduğu gibi su dalga enerjisi çalışmalarında da yapay zekâ teknikleri tahmin yaklaşımı olarak oldukça faydalı olabilmektedir. Söz konusu enerji çeşidi ile yapay zekâ konularının multidisipliner işlendiği çalışmalarda genel olarak yapay zekâ tekniklerinin birbirleri ile karşılaştırıldığı ve en cazip olan tekniğe karar verildiği görülmektedir.

3.1. Dalga enerjisi tahmini ve dönüştürücülerin optimizasyonunda makine öğrenmesi ve derin öğrenme uygulamalarının gözden geçirilmesi

Literatüre göre, dalga enerjisi tahmini ve dönüştürücülerin optimizasyonunda makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknikleri, enerji üretiminde verimliliği artırma potansiyeli sunmaktadır. Dalga enerjisi tahmininde, makine öğrenmesi algoritmaları regresyon modelleri, zaman serisi analizi ve karar ağaçları gibi yöntemler kullanılarak dalga yüksekliği, periyodu ve rüzgâr hızı gibi verilerden gelecekteki enerji üretimi tahmin edilebilmektedir. Derin öğrenme teknikleri, özellikle Yapay Sinir Ağları (ANN), Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) modelleri, bu tahminlerin doğruluğunu artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Aynı zamanda, dalga enerjisi dönüştürücülerinin optimizasyonunda genetik algoritmalar, evrimsel hesaplama yöntemleri ve takviyeli öğrenme teknikleri, dönüştürücülerin parametrelerini optimize ederek enerji verimliliğini maksimize etmektedir. Derin güçlendirme öğrenmesi ve kapsayıcı ağlar gibi ileri seviye derin öğrenme uygulamaları, dönüştürücü sistemlerinin performansını daha da iyileştirebilmektedir. Bu alandaki başarılı uygulamalar ve örnek çalışmalar, yapay zekâ tekniklerinin dalga enerjisi sektöründe ne kadar etkili olabileceğini göstermektedir.

Bu bölümde, literatürde su dalga enerjisi teknolojileri için kullanılan yapay sinir ağları ile ilgili çalışmalar derlenmiştir. Yapay sinir ağı ile ilgili çalışmaların üzerinde durulmasının nedeni, bu tekniklerin başarılı bulunması ve dalga enerjisi tahmininde diğer tekniklere nazaran yüksek doğruluk sağlamasıdır. Asma ve ark. (2012) çalışmasında dalga yüksekliğini tahmin etmek için yapay sinir

ağlarını ve doğrusal regresyon modellerini kullanmıştır. Batı Hindistan kıyılarında kurdukları bu tahmin modelinde yapay sinir ağı modellerinin ve çoklu doğrusal regresyon modellerinin de doğru tahminler sağladığını ortaya koymuşlardır. Yapay sinir ağları daha küçük hata oranına sahipken, çoklu doğrusal regresyon daha az parametre ile tahmin modeli kurar. O yüzden uygun modelin seçimi araştırmacıya ve araştırmanın özelliklerine bağlı olduğu kanısına varmışlardır. Yine de öneri vermeleri gerekirse bunun yapay sinir ağlarından yana olacağını bunun sebebinin ise yapay sinir ağlarının daha küçük ortalama kare hatası elde etmesinden dolayıdır. [Ali ve ark. \(2021\)](#) tarafından yapılan çalışmada tepe dalga enerjisi periyotlarını tahmini için kullanılan yapay sinir ağları ve makine öğrenimi teknikleri karşılaştırılmıştır. Avustralya'nın kıyı bölgelerinde yapılan bu çalışmada kullanılan makine öğrenimi tekniği (aşırı öğrenme makinesi) yapay sinir ağlarına göre daha iyi bir sonuç vermiştir. [Bento ve ark. \(2021\)](#) tarafından yapılan çalışmada yapay sinir ağı modelleri ile doğrudan dalga enerji akışını tahmin etme ve dolaylı yoldan dalga gücünün tahmin etmek amaçlanmıştır. Dalga yüksekliklerini mevsimsel olarak ortaya koymuş, aynı zamanda kış ve sonbaharda bu yüksekliklerin diğer mevsimlere oranla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. İleri beslemeli sinir ağlarının, dalga potansiyel enerjisinin tahmini için önemli olduğunu gösteren çalışmalardan biridir. [Rodriguez-Delgado & Bergillos \(2021\)](#) tarafından yapılan bu çalışmada yapay sinir ağlarının iklim değişikliğinin etkilerini de dikkate alarak uzun vadede dalga enerjisi potansiyelini optimize etmek amaçlanmıştır. Bu çalışma, su derinliği arttıkça enerji kullanılabilirliğinin de arttığını göstermektedir. Aynı zamanda oluşturulan yapay sinir ağı modeliyle hesaplama maliyeti oldukça azalmıştır. [Aylak \(2022\)](#) yaptığı çalışmada denizcilik lojistiğinde kullanılan derin öğrenme çalışmalarını derlemeyi amaçlamış, enerji verimliliği ve yapay zekâ konusunda literatürü eksik bulmuştur. Gemi rotalama problemleri için derin öğrenme çalışmalarına rastlanılmaktadır fakat harici denizcilik faaliyetleri için yapılmış derin öğrenme çalışmalarına literatürde az yer verilmiştir. [Zhang ve ark. \(2023\)](#) çalışmasında su dalga enerjisi dönüştürücülerinin karmaşık modellemeleri sebebiyle yapay zekâ teknikleri kullanarak kurulan modellerin performansları değerlendirilmiştir. Yakın zamanda oluşturulan derin operatör ağı ile yapay sinir ağları karşılaştırılmıştır. Plymouth Üniversitesi okyanus havzasında yapılan modelleme ve analiz sonucunda derin operatör ağı tabanlı dönüştürücü modeli veri gereksinimi, tahmin doğruluğu ve sürekli zamanı destekleme açısından yapay sinir ağlarından üstün bir performans sergilemiştir. [Ahmed ve ark. \(2023\)](#) çalışmasında yapay sinir ağlarını kullanarak dalga yüksekliğini tahmin etmek amacıyla model oluşturulmuştur. Avustralya'da bulunan birkaç dalga üretim tesisinde oluşturulan bu hibrit modelin hayata geçirilmesinin dalga enerjisi dönüştürücüleri için faydalı olacağına dair bir sonuca varmıştır. [Mahdavi-Meymand & Sulisz \(2023\)](#) çalışmasında dalga yüksekliğini tahmin etmek amacıyla kullanılan yapay sinir ağlarının ve diğer makine öğrenimi tekniklerinin performanslarını karşılaştırılmıştır. Uyarlamalı Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu algoritması, İç İç Geçmiş çok katmanlı yapay sinir ağı algoritması düğümleri için transfer fonksiyonları olarak kullanılmıştır. Kuzey Denizde yapılan bu çalışmada diğer makine öğrenimi modellerinin doğruluğunun ileri beslemeli yapay sinir ağlarından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. İç içe geçmiş çok katmanlı yapay sinir ağlarının muadillerinden daha başarılı olduğu kanısına varılmıştır. [Shadmani ve ark. \(2023\)](#) çalışmasında su dalga dönüştürücüleri tasarımı optimizasyonu için makine öğrenmesi ve derin öğrenme açısından literatürü incelemiştir. İncelediği literatür sonucunda optimizasyon çalışmalarının çoğunda yapay sinir ağlarının kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışma ile ileri beslemeli ağlar ve evrişimli sinir ağlarının karmaşık ve veri problemleri olan soruları çözmenin uygun olduğu kanısına varılmıştır. [Sareen ve ark. \(2023\)](#) tarafından yapılan bu çalışmada okyanus dalgası enerjisini tespit etmede uzun kısa dönemli bellek modelinin etkilerini incelenmiştir. Uzun vadeli sorunlar için geri beslemeli sinir ağı önerilmez. Önerilen yeni uzun kısa vadeli bellek modeli diğer tahmin algoritmalarını performans açısından geride bırakmaktadır (Ülke genelinde kullanılmayan okyanus dalgası enerjisi üretim potansiyelini etkin bir şekilde keşfetmede önemli ölçüde yardımcı olacaktır). [Bagheri ve ark. \(2023\)](#) tarafından yapılan çalışmada sudaki karmaşık sorunları ele alma potansiyellerini aydınlatmak amacıyla makine öğrenmesi tekniklerinin uygulamalarını derinlemesine tartışılmıştır. Su ortamındaki teknik sorunların tespitinin temel veri yaklaşımları için kolay olmadığı vurgulanmıştır ve hatanın ayıklanmasının ve onaylanmasının hatayı tespit etmekten daha kolay olduğu iddia edilmiştir. Çalışmaya göre evrişimli sinir ağları, su ortamlarındaki sorunları çözmek için en çok kullanılan görüntü tanıma algoritmalarından biridir. Uzun kısa vadeli bellek modeli ise atıksu arıtma ünitelerinde arıza tespiti için optimal bir modeldir. [Zheng ve ark. \(2023\)](#) yapılan bu çalışmada geri beslemeli yapay sinir ağları ile dalga yüksekliğinin tahmin modeli oluşturulmuştur. Kapılı yinelemeli model geri beslemeli diğer yapay sinir ağları modellerinden uyum

iyiliği ölçümlerine dayalı olarak daha yüksek doğruluk elde ettiğini göstermektedir. Önerilen model; hidroloji, atmosfer bilimleri, kuraklık, yağış ve tarım sektörlerinde uygulanabilir. Kim ve ark. (2023) yapılan bu çalışmada evrişimli sinir ağı ve uzun kısa dönemli bellek modeli ile birleştirilmiş algoritma kullanarak dalga yüksekliklerini sınıflandırmak amaçlanmaktadır. Kore'nin güneybatı kıyı bölgesinden anlık görüntüler toplandı ve bunlar daha sonra kategorize edildi ve eğitildi. Evrişimli sinir ağına dayalı deniz durumları sınıflandırması ve ortalama dalga yükseklikleri, özellikle bazı dalga yükseklikleri için tatmin edici olmayan performans göstermiştir.

Konuyla ilgili incelemesi yapılan literatürdeki çalışmalar için Tablo 3 oluşturulmuştur. Sınıflandırma yapay sinir ağı modellerinin türlerine göre yapılmıştır.

Tablo 3. Yapay sinir ağlarını baz alan su enerjisi çalışmaları

Literatürdeki Çalışmalar	Çalışmanın Amacı	Yöntem		
		İleri Beslemeli Sinir Ağı	Geri Beslemeli Sinir Ağı	Evrişimli Sinir Ağı
Asma ve ark. (2012)	Dalga yüksekliği tahmini için yapay sinir ağları ve çoklu regresyon modellerinin karşılaştırılması.	√	√	
Ali ve ark. (2021)	Tepe dalga enerjisi periyotlarını tahmin etme yeteneği açısından makine öğrenimi alanında kullanılan bir model ile yapay sinir ağlarının karşılaştırılması.	√	√	√
Bento ve ark. (2021)	Yapay sinir ağı modelleri ile doğrudan dalga enerji akışını tahmin etme ve dolaylı yoldan dalga gücünün tahmini.	√		
Rodriguez-Delgado & Bergillos (2021)	Yapay sinir ağlarının iklim değişikliğinin etkilerini de dikkate alarak uzun vadede dalga enerjisi potansiyelini optimize edilmesi.	√	√	
Aylak (2022)	Denizcilik lojistiğinde kullanılan derin öğrenme çalışmalarının derlenmesi.	√	√	√
Zhang ve ark. (2023)	Su dalga enerjisi dönüştürücülerinin karmaşık modellemeleri sebebiyle yapay zekâ teknikleri kullanarak performans değerlendirmesi.		√ (Kapılı Yinelemeli Birim Modeli ve Uzun Kısa Dönemli Bellek)	√
Ahmed ve ark. (2023)	Yapay sinir ağlarını birlikte kullanarak dalga yüksekliğini tahmin etmek amacıyla modelinin oluşturulması.		√ (Kapılı Yinelemeli Birim Modeli ve Uzun Kısa Dönemli Bellek)	√

Tablo 3. Yapay sinir ağı baz alan su enerjisi çalışmaları (devam)

Literatürdeki Çalışmalar	Çalışmanın Amacı	Yöntem		
		İleri Beslemeli Sinir Ağı	Geri Beslemeli Sinir Ağı	Evrışimli Sinir Ağı
Mahdavi-Meymand & Sulisz (2023)	Dalga yüksekliğini tahmin etmek amacıyla kullanılan yapay sinir ağlarının ve diğer makine öğrenimi tekniklerinin performanslarının karşılaştırılması.	√ (İç İçe Geçmiş Yapay Sinir Ağı Modeli)		
Shadmani ve ark. (2023)	Su dalga dönüştürücüleri tasarımı optimizasyonu için makine öğrenmesi ve derin öğrenme açısından mevcut literatürün incelenmesi.	√	√	√
Sareen ve ark. (2023)	Okyanus dalgası enerjisini tespit etmede uzun kısa dönemli bellek modelinin etkilerinin incelenmesi.		√	
Bagheri ve ark. (2023)	Sudaki karmaşık sorunları ele alma potansiyellerini aydınlatmak amacıyla makine öğrenmesi tekniklerinin uygulamalarını derinlemesine tartışılması.		√	√
Kim ve ark. (2023)	Evrışimli sinir ağı ve uzun kısa dönemli bellek modeli ile birleştirilmiş algoritma kullanarak dalga yüksekliklerini sınıflandırılması.		√ (Uzun Kısa Dönemli Bellek)	√
Zheng ve ark. (2023)	Geri beslemeli yapay sinir ağları ile dalga yüksekliğinin tahmini.		√ (Kapılı Yinelemeli Birim Modeli ve Uzun Kısa Dönemli Bellek)	

Yapay sinir ağları genellikle giriş katmanı, orta katman ve çıktı katmanı olmak üzere üç ana katmandan oluşmaktadır. Her katmanın birkaç nörondan oluşur ve bu nöronlar matematiksel işlemler gerçekleştirilmekte, çıktıları hesaplamaktadır. Bu işlemlerin türüne bağlı göre farklı yapay sinir ağları geliştirilmektedir (Mahdavi-Meymand & Sulisz, 2023). Çalışmada yapay sinir ağları, işlem türlerine göre ileri beslemeli sinir ağları, geri beslemeli ağları olarak sınıflandırılmışlardır. Ayrıca görüntü tanıma teknolojisine dayanan evrışimli sinir ağları bulunmaktadır. Evrışimli sinir ağları, çok katmanlı sinir ağı modelinin katman sayısının artırılarak daha iyi sonuçlar vermesi için geliştirilmiştir ve filtrelemeye dayalı bir modeldir. Filtreleme ile görüntünün özelliklerini belirgin hale getirir. Belirgin hale getirilen özellikleri sınıflandırmada oldukça iyi olduğu bilinen bu model, farklı boyut ve değerlerde kullanılarak araştırmalarda baskınlık düzeyi az olan özelliklerin de ortaya çıkmasını sağlar (Simard ve ark., 2003).

İleri beslemeli ağlar, girdi verilerinin çıktı verilerine doğru ilerleyen ağ modellerini baz alan matematiksel modellerdir. Bu ağ yapısında geri besleme bulunmamaktadır (Yüksel, 2023). İç içe geçmiş yapay sinir ağı modelinin ana fikri, makine öğrenimi modelleri tarafından gerçekleştirilen işlemlere benzer doğrusal olmayan işlemler gerçekleştirmektir (Mahdavi-Meymand & Sulisz, 2023). Su dalga

teknolojilerinde dalga yüksekliklerini tahmin etmek için ileri beslemeli sinir ağları araştırmacıların tercih ettiği bir model olmuştur. İç içe geçmiş yapay sinir ağ modelleri de bunlardan biridir. Modellerin ana fikri, makine öğrenimi modelleri tarafından gerçekleştirilen işlemlere benzer doğrusal olmayan işlemler gerçekleştirmektir (Mahdavi-Meymand & Sulisz, 2023).

Geri beslemeli ağlar (tekrarlayan sinir ağları), girdi veri akışlarının ileri akışa ek olarak geriye doğru olabildiği ağ yapılarını baz alan matematiksel modellerdir. Bu modelde çıktıların girdi olarak da kullanılabilirdiği bilinmektedir (Yüksel, 2023). Geri beslemeli ağ adı altında kullanılan modeller, uzun kısa dönemli bellek ve kapılı yinelemeli birim olarak tanımlanmaktadır. Uzun kısa dönemli bellek modeli, tekrarlayan sinir ağlarının belleğini genişleten bir mimaridir. Tipik olarak, tekrarlayan sinir ağları, mevcut sinir ağında kullanılmak üzere kalıcı önceki bilgileri kullanmaları nedeniyle "kısa süreli hafızaya" sahiptir. Bu modelin görevi önceki bilgileri de kullanmasıdır (Alpay, 2020) ve yine Alpay (2020)'a göre bu model el yazısı tanıma, zaman serisindeki anormallikleri tespit etmek, konuşma tanıma, müzik bestelemek gibi araştırmalarda kullanılabilir. Bu çalışmada bu modelin, daha çok dalga tanklarının kurulumu için geçmişe dayalı verileri de kullanarak dalga yüksekliği tahmini yaptığı görülmektedir. Aynı zamanda bir başka tekrarlayan ağ olan kapılı yinelemeli model ile kullanıldığı çalışmalar da olmuştur. Bu bütünleşmiş modelde maksimum dalga yüksekliği, dalga periyodu, tepe enerji dalga periyodu, deniz yüzeyi sıcaklığı ve önemli dalga yükseklikleri dahil olmak üzere tarihsel dalga özellikleri analiz edilmek için kullanılmıştır. Araştırmacıların bu hibrit modeli sıkça kullanması ve başarılı bulması, gelecekteki çalışmalar için fikir vermektedir.

Bir diğer yapay sinir ağ türü ise evrişimli (konvansiyonel) sinir ağıdır. Derin öğrenme yapıları içerisinde en çok kullanılan sinir ağı olduğu bilinmektedir (Doğan & Türkoğlu, 2019). Bu sebeple çalışmaya dahil edilen evrişimli sinir ağının filtrelemeye dayalı görüntü tanıma teknolojisi olduğu bilinmektedir. Dalga görüntülerinin analiz edilip filtrelenmesi su enerjisi teknolojilerini bir adım daha öteye taşımaktadır. Ayrıca literatürde türbin arıza sistemleri için evrişimli sinir ağlarının da hibrit modelde yer aldığı diğer derin öğrenme teknikleriyle gürültü bağışıklığı analizi yapılarak su dalga dönüştürücülerin arızalarını tespit eden modeller geliştirilmiştir (Bao ve ark., 2024).

Araştırmacılar ve mühendislerin en uygun yenilenebilir enerji dönüşüm sistemlerini tasarlamaları için dalga yüksekliklerinin doğruya en yakın tahminlerine ihtiyaçları vardır (Mahdavi-Meymand & Sulisz, 2023). Dalga yüksekliğini tahmin etmek, mühendisler için oldukça zor konulardan biridir. Bu çıkarım, öngörülebilirliği ile gelgit enerjisinin en çok kullanılan su enerji çeşidi olduğu ile de yapılabilir. Deniz lojistiği, kıyı şeridi ve açık denizlerin yapısı gibi okyanus ortamını etkileyen fırtınalar için öngörülebilirlik oldukça önemlidir. Dalga özelliklerinin tahmin etmek fırtınada oluşabilecek tüm zararları engellemek adına çok önemlidir. Bu nedenle, okyanus yüzey dalgalarının doğru tahmini çok önemlidir ve zorlu bir iştir (Asma ve ark., 2012). Bunun için henüz geliştirilen ve güçlü bir tahmin modeli olan yapay sinir ağlarını kullanmak su kaynaklı enerji önem taşımaktadır. Mevcut çalışmalar ile yapılan bu değerlendirmede; dalga yüksekliğini, dalga periyodu, tepe enerji dalga periyodu, deniz yüzeyi sıcaklığı, rüzgâr yönü ve vb. etkileri tahmin etmek için okyanus enerji çalışmalarında yapay sinir ağı modellerinin kullanıldığı görülmüştür. Araştırmacıların daha çok bütünleşmiş modelleri kullanmayı tercih ettiği ve yapay sinir ağlarının, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında daha başarılı sonuçlar verdiği kanısına yazın taraması sonucunda varılmaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Su enerji potansiyeli yüksek okyanuslara sahip ülkeler, yenilenebilir enerji çalışmaları kapsamında suyun enerjisini elektriğe dönüştüren projeler üzerinde yoğunlaşmaktadır. Henüz yeni sayılabilecek bu enerji çeşidi için özellikle gelişmişlik düzeyi yüksek olan ülkeler, pilot projelerle okyanuslarda yerini almışlardır. Bu enerji türünün kullanılabilmesi için başta maddi zorluklar olmak üzere, teknolojik ve fiziksel altyapı kurulum karmaşıklığı gibi zorluklarla karşı karşıya kalınmaktadır. Bu tür projeler ile ilgilenen ülkenin öncelikle şebeke-teknolojik altyapısının yeterli seviyede olması ve projelerin uygulanması için fizibilite çalışmalarına önem verilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Asya-Avrupa kıtası ülkelerinin ve Türkiye'nin su enerji potansiyeli, incelenen literatür sonucunda ortaya koyulmuştur. Tablo 4, mevcut literatür incelemesi sonunda okuyuculara özet bilgi vermek amacıyla hazırlanmıştır.

Tablo 4. Su dalga enerjisi: Türkiye, Asya ve Avrupa karşılaştırılması

Özellik	Türkiye	Asya	Avrupa
Potansiyel	Düşük	Yüksek	Yüksek
Teknoloji	Gelişmekte	Gelişmekte	Gelişmekte
Yatırımlar	Artan	Yüksek	Yüksek
Kaynaklar	Mevcut literatüre göre Karadeniz ve Ege Denizi dalga enerjisi potansiyellerinin diğer bölgelere nazaran daha yüksek olduğu saptanmıştır.	Japonya Çin	Birleşik Krallık İrlanda İspanya Portekiz
Mevcut Projeler	Birkaç pilot projenin bahsi geçmektedir.	Projeler mevcut	Geniş ölçekli projeler

Yapılan çalışmalarda, gelişmişlik düzeyi ile bilinen ülkelerin adı çoğu zaman su enerjisi teknolojileri ile yan yana gelmektedir. Asya kıtasında Japonya ve Çin bu konuda öncüdür. Asya kıtasında okyanusa kıyısı olan Rusya, Hindistan ve Endonezya gibi ülkelerin henüz okyanus potansiyeli üzerinde yapılmış çalışmalarına rastlanmamıştır. Su enerjisi teknolojileri, Dünya bazında çok yeni bir teknoloji olmasına rağmen, Avrupa kıtası bu konuda birçok projeye öncülük etmektedir. Literatür taraması sonucunda Avrupa kıtasının bu konuda Asya'ya göre gelişmişlik düzeyinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Avrupa kıtası ülkeleri arasında ise Birleşik Krallık bu konuda öncüdür. Dalga ve gelgit enerjisi projeleri ile bilinen Birleşik Krallık paydaşlarıyla birlikte birçok ortak projeleri yürütmektedir. Avrupa kıtası için Atlantik Okyanusuna kıyısı olan İngiltere, Fransa, İspanya, Portekiz, Norveç, İzlanda, İrlanda okyanustan elde edebilecekleri potansiyel enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek için çalışmalarını sürdürmektedirler. Asya ve Avrupa kıtasında kapalı havzaları ile bilinen Türkiye'nin ise su dalga enerjisi alanında görece olarak daha başlangıç seviyesinde olduğu söylenebilir. Türkiye'nin kapalı havzaları olması su kaynakları için bir handikap (denizlerin enerji potansiyelinin okyanuslara nazaran düşük olması) olsa da denizlerin potansiyeli hususunda araştırmalara devam edilmektedir. Karadeniz ve Ege Denizinin dalga potansiyeli bakımından diğer iç denizlere nazaran daha iyi konumda olduğu söylenebilir. Araştırmacıların bu bölgeler üzerinde yoğunlaşması gerekebilir. Denizlerin dalga potansiyelini arttırmak için yapılan çalışmalarda maliyet, teknoloji gibi faktörlerin de hesaba katılması bu enerji türünün uygulanabilirliği açısından önem arz etmektedir. Henüz dünya çapında çok yeni bir teknoloji olduğu için ülkelerin bu teknolojiye attıkları adım gelişmişlik düzeylerini arttırmak için fırsat yaratabilir. Söz konusu enerji çeşidinde öncü olan ülkelerin yol haritaları incelenmeli, paydaşların yaptığı çalışmalar yakından izlenmeli ve iş birliği yapılmalıdır. İstanbul Boğazı ve Karadeniz arasındaki tuzluluk farkından ortaya çıkan enerji literatüre az da olsa konu olmuştur. Denizlerin tuzluluk gradyan enerji potansiyeli araştırmalarına ağırlık verilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Su dalga enerjisi alanında Ar-Ge çalışmaları için özellikle başlangıç aşamasında ekipman ve finans desteğinin eksik tutulmaması önem arz etmektedir. Öte yandan projeler ve prototipler dalgalara yenilmemek için sağlam altyapıya ihtiyaç duymaktadır. Birleşik Krallıktaki yıllanmış projelerin hala sürdürülüyor olması altyapının oldukça güçlü oluşturulduğunu göstermektedir.

Okyanusa kıyısı olan ülkeler enerji potansiyelleri dolayısıyla su dalga enerjisi için projeler yapmaktadır. Hali hazırdaki projelerin çoğu pilot proje konumundadır. Bu yüzden ülkeler bu konuda kendini geliştirirken, dünya çapında da bu teknoloji adına keşifler yapabilir. Söz konusu teknoloji için santral kurulumu gereklidir. Bu santrallerin kurulumu için planlamalar oldukça titiz yapılmaktadır. Dalgaların öngörülebilirliği, yükseklik tahmini, fırtına durumunda olabilecek zararların hesaplanması ve önlemlerin alınması önemlidir. Suyun getirebileceği tüm iyi ve kötü faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Dalga enerjisinin kesintili ve düzensiz özelliği, güç sisteminin kararlılığı için bir endişe nedenidir. Bu yüzden dünya çapında öngörülebilir olduğu için en fazla gelgit enerji türbinleri kullanılmaktadır. Tahmin yöntemlerinin bu konuda çözüm aracı olarak kullanılması ön plana çıkmaktadır. Son zamanlarda kullanılan makine öğrenimine ve yapay sinir ağlarına dayanan tahmin yöntemleri su enerji konularında da bu tarz araçlar olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda literatürde dalga yüksekliğini, dalga periyodu, tepe enerji dalga periyodu, deniz yüzeyi sıcaklığı, rüzgâr yönü ve vb. etkileri tahmin etmek için okyanus enerji çalışmalarında yapay sinir ağı modellerinin yaygın olarak

kullanıldığı görülmektedir. Yapay sinir ağları da hala geliştirilen bir model olduğu için dalga tahminlerinde güçlü bir model oluşturmak için bütünleşmiş modeller kullanılmaktadır.

Gelecek çalışmalarda santral türlerine değinerek ülkemizdeki dalga çeşidine uygun santral seçimi yapılabilir. Sualtı betonlama yöntemlerinin maliyetleri hesaplanabilir, kurulum yapılacak yerler uzmanların çerçeveleriyle belirlenip yer seçimi çalışmaları ve fizibilite çalışmaları yapılabilir. Kurulumda kullanılan ekipman ve malzemelerin suya ve çevreye etkisi incelenmelidir. Örneğin, türbinler için kauçuk türleri kullanıldığı ve kauçuğun çevreye zararının olduğu bilinmektedir. Akdeniz ve Karadeniz kıyılarındaki diğer ülkelerin konuyla ilgili çalışmalar yoğunlaştırılarak yalnızca Türkiye kıyılarına dair kapsamlı bir çalışma yapılabilir. Ülkemizde su enerjisi kurulması için engel olan darboğaz faktörler incelenip, irdelenmelidir. Bu yönde karşılaşılan problemleri çözmeye yönelik yaklaşımlar çeşitlendirilebilir. Bu çalışma yalnızca Asya- Avrupa kıtalarındaki ülkeler için sınırlı kalmıştır. Yükseklik vb. tahminleri için son zamanlarda tahmin çalışmalarında kullanılan ve başarılı sonuç alınan bulanık mantık çalışmaları da gelecek çalışmalarda yapay sinir ağları ile incelenebilir.

Kaynakça

- Abdalla, S., & Özhan, E. (1999, Nisan). *Wind and wave climate of the mediterranean and the black sea*. Proceedings of the International MEDCOAST Conference, Antalya.
- Ahmed, A. A. M., Jui, S. J. J., AL-Musaylh, M. S., Raj, N., Saha, R., Deo, R. C., & Saha, S. K. (2024). Hybrid deep learning model for wave height prediction in Australia's wave energy region. *Applied Soft Computing*, 150, 111003. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111003>
- Alday, M., & Lavidas, G. (2024). Assessing the Tidal Stream Resource for energy extraction in The Netherlands. *Renewable Energy*, 220, 119683. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119683>
- Ali, M., Prasad, R., Xiang, Y., Sankaran, A., Deo, R. C., Xiao, F., & Zhu, S. (2021). Advanced extreme learning machines vs. deep learning models for peak wave energy period forecasting: A case study in Queensland, Australia. *Renewable Energy*, 177, 1031-1044. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.052>
- Alpay, Ö. (2020). LSTM mimarisi kullanarak USD/TRY fiyat tahmini. *European Journal of Science and Technology*, 452-456. <https://doi.org/10.31590/ejosat.araconf59>
- Altaş, İ. H., & Şahin, E. (2019). Dünyada ve Türkiye'de dalga enerjisi. *Elektrik Mühendisliği*, 465, 43-53.
- Asma, S., Sezer, A., & Ozdemir, O. (2012). MLR and ANN models of significant wave height on the west coast of India. *Computers & Geosciences*, 49, 231-237. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.032>
- Astariz, S., & Iglesias, G. (2015). The economics of wave energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 397-408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.061>
- Avrupa Deniz Enerjisi Merkezi. (2024). *Sektör raporları: EMEC*. Avrupa Deniz Enerjisi Merkezi. Erişim tarihi: 16.01.2024. <https://www.emec.org.uk/marine-energy/industry-reports/>
- Aydıner, İ. & Öztürk, D. (2021). Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı analitik hiyerarşi yöntemi kullanılarak Ege Denizi'nde rüzgâr ve dalga enerji sistemleri için yer seçimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 217-232. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236719>
- Aylak, B. L. (2022). The impacts of the applications of artificial intelligence in maritime logistics. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 34, 217-225. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1079206>
- Babarit, A. (2017). *Ocean Wave Energy Conversion: Resource, Technologies and Performance*. Elsevier.
- Bagheri, M., Farshforoush, N., Bagheri, K., & Shemirani, A. I. (2023). Applications of artificial intelligence technologies in water environments: From basic techniques to novel tiny machine learning systems. *Process Safety and Environmental Protection*, 180, 10-22. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.09.072>
- Bak, U. (2003). *Dalga enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm sistemleri*. (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- BAKKA. (2023). BAKKA Kütüphane. Erişim tarihi: 04.02.2024. <https://bakkakutuphane.org/>

- Bao, X., Huang, G., Liu, M., Sun, H., & Iglesias, G. (2024). Turbine fault diagnosis of the oscillating water column wave energy converter based on multi-lead residual neural networks. *Ocean Engineering*, 291, 116429. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116429>
- Bento, P. M. R., Pombo, J. A. N., Mendes, R. P. G., Calado, M. R. A., & Mariano, S. J. P. S. (2021). Ocean wave energy forecasting using optimised deep learning neural networks. *Ocean Engineering*, 219, 108372. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108372>
- Bricker, J. D., Esteban, M., Takagi, H., & Roeber, V. (2017). Economic feasibility of tidal stream and wave power in post-Fukushima Japan. *Renewable Energy*, 114, 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.049>
- Cao, F., Han, M., Shi, H., Li, M., & Liu, Z. (2022). Comparative study on metaheuristic algorithms for optimising wave energy converters. *Ocean Engineering*, 247, 110461. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110461>
- Chen, J., Hlophé, T., Gunawan, D., Taylor, P. H., Milne, I. A., & Zhao, W. (2024). Phase-resolved wave prediction with varying buoy positions in the field using machine learning-based methods. *Ocean Engineering*, 307, 118107. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118107>
- Chen, Y. L., Lin, C. C., Chen, J. H., Lee, Y. H., & Tzang, S. Y. (2023). Characteristics of wave energy resources on coastal waters of northeast Taiwan. *Renewable Energy*, 202, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.058>
- Chiu, Y.-H., Lee, J.-H., Lu, C.-C., Shyu, M.-K., & Luo, Z. (2012). The technology gap and efficiency measure in WEC countries: Application of the hybrid meta frontier model. *Energy Policy*, 51, 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.026>
- Choupin, O., Del Río-Gamero, B., Schallenberg-Rodríguez, J., & Yáñez-Rosales, P. (2022). Integration of assessment-methods for wave renewable energy: Resource and installation feasibility. *Renewable Energy*, 185, 455-482. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.035>
- Crown Estate Scotland. (2024). *Wave and tidal*. Erişim tarihi: 28.01.2024. <https://www.crownstatescotland.com/scotlands-property/marine/wave-and-tidal>
- Çalışır, E., & Akpınar, A. (2020). ERA5 ve ERA-INTERIM rüzgarları ile çalıştırılan SWAN model sonuçlarının performans analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(1), 65-80. <https://doi.org/10.17482/uumfd.688805>
- Çokan, M. (2004, Mayıs). *Dalga enerjisi (dalga elektrik santralleri)*. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul.
- Dai, P., Huang, Z., & Zhang, J. (2023). A modelling study of the tidal stream resource around Zhoushan Archipelago, China. *Renewable Energy*, 218, 119234. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119234>
- de Mello, P. C., Carneiro, M. L., Tannuri, E. A., Kassab, F., Jr., Marques, R. P., Adamowski, J. C., & Nishimoto, K. (2013). A control and automation system for wave basins. *Mechatronics*, 23(1), 94-107. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.11.004>
- Demirok, H. D., & Koçer, H. E. (2020). Generation of electrical energy from owc based wave motion. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 202-206. <https://doi.org/10.31590/ejosat.804135>
- den Bieman, J. P., de Ridder, M. P., Iriás Mata, M., & van Nieuwkoop, J. C. C. (2023). Hybrid modelling to improve operational wave forecasts by combining process-based and machine learning models. *Applied Ocean Research*, 136, 103583. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103583>
- Doğan, F., & Türkoğlu, İ. (2019). Derin öğrenme modelleri ve uygulama alanlarına ilişkin bir derleme. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(2), 409-445. <https://doi.org/10.24012/dumf.411130>
- Erselcan, İ. Ö., & Kükner, A. (2020). A parametric optimization study towards the preliminary design of point absorber type wave energy converters suitable for the Turkish coasts of the Black Sea. *Ocean Engineering*, 218, 108275. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108275>
- Es, H., Kalender, F. Y., & Hamzaçebi, C. (2014). Yapay sinir ağları ile Türkiye net enerji talep tahmini. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3).
- Foteinis, S., & Emmanuel Synolakis, C. (2023). Field based estimates of wave power at a nearshore Mediterranean locale for sustainable wave energy harnessing. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 59, 103410. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103410>
- Gonçalves, M., Martinho, P., & Guedes Soares, C. (2014). Assessment of wave energy in the Canary Islands. *Renewable Energy*, 68, 774-784. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.017>

- Greaves, D., Conley, D., Magagna, D., Aires, E., Chambel Leitão, J., Witt, M., ... & Marina, D. (2016). Environmental impact assessment: Gathering experiences from wave energy test centres in Europe. *International Journal of Marine Energy*, 14, 68-79. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2016.02.003>
- Gülçelik, S., & Diri, C. (2021). Alternative energy usage types in buildings and a proposal for a generator working with wave energy. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 6(1), 1-10. <https://doi.org/10.30785/mbud.808924>
- Gunes-Durak, S., & Kapkin, S. (2024). Overview of hydrogen energy production in the Black Sea for the disposal of potentially hazardous hydrogen sulfide. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 706-714. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.141>
- Güngör, F. (2019). *İç denizlere uygun dalga enerjisi üretim sistemi*. (Yüksek Lisans Tezi). Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu, Türkiye.
- Harameen, H. M. A., & Akman, G. (2023). A cluster analysis of renewable electricity generation policies in Asian Region countries using SPSS software. *Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi*, 6(2), 357-375. <https://doi.org/10.33712/mana.1104853>
- Hassan, M. K., Youssef, H., Gaber, I. M., Shehata, A. S., Khairy, Y., & El-Bary, A. A. (2024). A predictive machine learning model for estimating wave energy based on wave conditions relevant to coastal regions. *Results in Engineering*, 21, 101734. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101734>
- Henriques, J. C. C., Gato, L. M. C., Falcão, A. F. O., Robles, E., & Faÿ, F. X. (2016). Latching control of a floating oscillating-water-column wave energy converter. *Renewable Energy*, 90, 229-241. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.065>
- Hepbaşlı, A., Özdamar, A., & Özalp, N. (2001). Present status and potential of renewable energy sources in Turkey. *Energy Sources*, 23, 631-648. <https://doi.org/10.1080/00908310118259>
- IRENA. (2023). *Global geothermal market and technology assessment*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi; International Geothermal Association, The Hague. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_Global_geothermal_market_technology_assessment_2023.pdf
- IRENA. (2015). *Renewable power generation costs in 2014*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf
- IRENA and OEE (2023). *Scaling up investments in ocean energy technologies*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_OEE_Scaling_up_investment_ocean_energy_2023.pdf
- Jafalı, H. (2019). *Karadeniz'de dalga gücü potansiyeli yüksek alanların dalga enerji içeriğinin uzun dönemli zamansal ve alansal analizi*. (Yüksek Lisans Tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- Jakimavičius, D., & Akstinas, V. (2023). Projections of wind climate and wave energy resources in Lithuanian territorial waters of the Baltic Sea in the 21st century. *Oceanologia*, 65(4), 534-547. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2023.06.004>
- Kalogeri, C., Galanis, G., Spyrou, C., Diamantis, D., Baladima, F., Koukoula, M., & Kallos, G. (2017). Assessing the European offshore wind and wave energy resource for combined exploitation. *Renewable Energy*, 101, 244-264. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.010>
- Kamranzad, B., & Lin, P. (2020). Sustainability of wave energy resources in the South China Sea based on five decades of changing climate. *Energy*, 210, 118604. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118604>
- Kamranzad, B., & Takara, K. (2020). A climate-dependent sustainability index for wave energy resources in Northeast Asia. *Energy*, 209, 118466. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118466>
- Karaköse, P., & Koca, A. (2022). A novel rotor type wave energy converter design for maximum energy captured in low wave heights. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 12(2), 136-153. <https://doi.org/10.55024/buyasambid.1131891>
- Kapluhan, E. (2014). Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: dalga enerjisinin dünyadaki ve Türkiye'deki kullanım durumu. *Uluslararası Avrasya Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(17), 65-86.

- Kıldırın, E. (2018). *Antalya sahili dalga enerji potansiyelinin belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, Türkiye.
- Kim, Y.-H., Cho, S., & Lee, P.-S. (2023). Wave height classification via deep learning using monoscopic ocean videos. *Ocean Engineering*, 288, 116002. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116002>
- Kocalar, A. C. (2022). The effects of the EU green deal harmonization policies in Turkey. *Advanced Engineering Science*, 2, 109-117.
- Kükner, A. (2018). Study of the oscillating water column (owc) which is one of the most used systems in converting wave energy into electrical energy. *Turkish Journal of Engineering*, 2(2), 88-93. <https://doi.org/10.31127/tuje.329295>
- Lamy, J. V., & Azevedo, I. L. (2018). Do tidal stream energy projects offer more value than offshore wind farms? A case study in the United Kingdom. *Energy Policy*, 113, 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.030>
- Lavidas, G., Venugopal, V., & Friedrich, D. (2017). Wave energy extraction in Scotland through an improved nearshore wave atlas. *International Journal of Marine Energy*, 17, 64-83. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.01.008>
- López-Ruiz, A., Bergillos, R. J., & Ortega-Sánchez, M. (2016). The importance of wave climate forecasting on the decision-making process for nearshore wave energy exploitation. *Applied Energy*, 182, 191-203. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.088>
- Magagna, D., & Uihlein, A. (2015). Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives. *International Journal of Marine Energy*, 11, 84-104. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2015.05.001>
- Mahdavi-Meymand, A., & Sulisz, W. (2023). Application of nested artificial neural network for the prediction of significant wave height. *Renewable Energy*, 209, 157-168. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.118>
- Mert, S. (2012). *Dalga enerjisi dönüşüm sistemi tasarımı ve deneysel çalışması*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Metin, K. (2023). *Türkiye'nin dalga enerjisi potansiyeline coğrafi bir bakış: muhtemel sahaların değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Karabük Üniversitesi, Coğrafya Anabilim Dalı, Karabük, Türkiye.
- Molina, A., Jiménez-Portaz, M., Clavero, M., & Moñino, A. (2022). The effect of turbine characteristics on the thermodynamics and compression process of a simple OWC device. *Renewable Energy*, 190, 836-847. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.106>
- Neill, S. P. (2022). Introduction to ocean renewable energy. In T. M. Letcher (Ed.), *Comprehensive renewable energy* (2. ed, pp. 1-9). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00081-9>
- O'Hagan, A. M., Huertas, C., O'Callaghan, J., & Greaves, D. (2016). Wave energy in Europe: Views on experiences and progress to date. *International Journal of Marine Energy*, 14, 180-197. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2015.09.001>
- Onenli, O., Ercan, H., Acikgoz, S., & Kat, B. (2023). Emission reduction pathways for satisfying Türkiye's future electricity demand: A cross-country dynamic panel analysis with linear programming scenarios. *Cleaner Energy Systems*, 6, 100085. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2023.100085>
- Oztunali Ozbahceci, B., Turgut, A. R., Bozoklu, A., & Abdalla, S. (2020). Calibration and verification of century based wave climate data record along the Turkish coasts using satellite altimeter data. *Advances in Space Research*, 66(10), 2319-2337. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.02.021>
- Özbek, T., & Ergül, E. U. (2022, Mart). *Çok kriterli karar verme ile dalga enerjisi santrali sahası ve dönüştürücü tipi seçimi*. İnşaat Mühendisleri Enstitüsü Bildirileri.
- Özdamar, G., Mut, M., Pekbey, Y., & Özdamar, A. (2016). Bir wells dalga türbininin hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 569-576.
- Özdemir, D. (2019). *Promethee yöntemi ile türkiye'de yenilenebilir enerji alternatiflerinin sıralanması*. (Yüksek Lisans Tezi), Akdeniz Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Antalya, Türkiye.
- Pontes, M. T., Mollison, D., Cavaleri, L., Athanassoulis, G. A., & Nieto, J. C. (1993). *Wave studies and development of resource evaluation methodology*. Final Report.

- Qiu, S., Liu, K., Wang, D., Ye, J., & Liang, F. (2019). A comprehensive review of ocean wave energy research and development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109271. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109271>
- Renewable UK Marine Energy Database. (2024). *eSpatial*. Erişim Tarihi: 31.01.2024. https://maps.esp.tl/maps/pages/map.jsp?geoMapId=19671&TENANT_ID=115744
- Rodriguez-Delgado, C., & Bergillos, R. J. (2021). Wave energy assessment under climate change through artificial intelligence. *Science of The Total Environment*, 760, 144039. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144039>
- Ross, D. (1995). *Power from the waves*. Oxford University Press.
- Rusu, E., & Onea, F. (2016). Estimation of the wave energy conversion efficiency in the Atlantic Ocean close to the European islands. *Renewable Energy*, 85, 687-703. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.042>
- Rusu, E., & Onea, F. (2022). Evaluation of the adverse weather conditions associated to some significant European marine renewable energy projects. *Energy Reports*, 8(16), 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.205>
- Rusu, E., & Rusu, L. (2021). An evaluation of the wave energy resources in the proximity of the wind farms operating in the North Sea. *Energy Reports*, 7(3), 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.058>
- Sağlam, M., Sulukan, E., & Uyar, T. S. (2010). Wave energy and technical potential of Turkey. *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 6(2), 34-50.
- Sareen, K., Panigrahi, B. K., Shikhola, T., & Nagdeve, R. (2023). An integrated decomposition algorithm based bidirectional LSTM neural network approach for predicting ocean wave height and ocean wave energy. *Ocean Engineering*, 281, 114852. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114852>
- Shadmani, A., Nikoo, M. R., Gandomi, A. H., Wang, R.-Q., & Golparvar, B. (2023). A review of machine learning and deep learning applications in wave energy forecasting and WEC optimization. *Energy Strategy Reviews*, 49, 101180. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101180>
- Simard, P. Y., Steinkraus, D., & Platt, J. C. (2003, September). Best practices for convolutional neural networks applied to visual document analysis. *Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition, 2003. Proceedings*, 958-963. <https://doi.org/10.1109/icdar.2003.1227801>
- Simões, C., Pintossi, D., Saakes, M., Borneman, Z., Brilman, W., & Nijmeijer, K. (2020). Electrode segmentation in reverse electrodialysis: Improved power and energy efficiency. *Desalination*, 492, 114604. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114604>
- Spelta, A., & De Giuli, M. E. (2023). Does renewable energy affect fossil fuel price? A time-frequency analysis for the Europe. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 626, 129098. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.129098>
- Tufa, R. A., Pawlowski, S., Veerman, J., Bouzek, K., Fontananova, E., di Profio, G., ... & Curcio, E. (2018). Progress and prospects in reverse electrodialysis for salinity gradient energy conversion and storage. *Applied Energy*, 225, 290-331. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.111>
- Turkchem. (2022). *Mavi enerji*. Erişim Tarihi: 11.02.2024. <https://www.turkchem.net/mavi-enerji.html>
- Türker, Y. Ö., & Aydın, A. (2022). How ready is the Turkish Legislation for the green deal? *Energy and Climate Change*, 3, 100084. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2022.100084>
- Türköz, K. (2021). Türkiye'de sektörel enerji kullanımındaki değişimlerin itici güçleri: Ayrıştırma analizi. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 10, 1038-1052. <https://doi.org/10.33206/mjss.853348>
- Uygur, İ., Demirci, R., Saruhan, H., Özkan, A., & Belenli, İ. (2006). Batı Karadeniz bölgesindeki dalga enerjisi potansiyelinin araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(1), 7-13.
- Veerman, J. (2010). *Reverse electrodialysis: Design and optimization by modeling and experimentation*. (Thesis fully internal (DIV)), University of Groningen.
- Wang, Y. (2020). Predicting absorbed power of a wave energy converter in a nonlinear mixed sea. *Renewable Energy*, 153, 362-374. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.031>

- Webb, A., Waseda, T., & Kiyomatsu, K. (2020). A high-resolution, long-term wave resource assessment of Japan with wave-current effects. *Renewable Energy*, 161, 1341-1358. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.030>
- Yeni Enerji. (2019). *Gelgit enerjisi ve başarılı örnekleri*. Erişim tarihi: 31.01.2024. <https://www.yenienerji.com/mercek-alti/gelgit-enerjisi-ve-basarili-ornekleri>
- Yücel, U., Özdemir, E., & Ayaz, M. (2021). Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi teşvik yöntemlerinin incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), 774-790. <https://doi.org/10.29130/dubited.774963>
- Yüksel, F. Ş. (2023). *Türkiye'nin havayolu taşıyıcı modellerine göre yolcu talebinin çoklu doğrusal regresyon, anfis ve yapay sinir ağı teknikleri ile tahminlenmesi*. (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Zhang, J., Zhao, X., Greaves, D., & Jin, S. (2023). Modeling of a hinged-raft wave energy converter via deep operator learning and wave tank experiments. *Applied Energy*, 341, 121072. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121072>
- Zheng, C.-w., Pan, J., & Li, J.-x. (2013). Assessing the China Sea wind energy and wave energy resources from 1988 to 2009. *Ocean Engineering*, 65, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.03.006>
- Zheng, J., Dai, P., & Zhang, J. (2015). Tidal stream energy in China. *Procedia Engineering*, 116, 880-887. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.377>
- Zheng, Z., Ali, M., Jamei, M., Xiang, Y., Abdulla, S., Yaseen, Z. M., & Farooque, A. A. (2023). Multivariate data decomposition based deep learning approach to forecast one-day ahead significant wave height for ocean energy generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185, 113645. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113645>

