



Akdeniz Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Akdeniz Mühendislik Dergisi

Akdeniz Journal of Engineering

YEAR | YIL

2025

VOLUME | CİLT

3

ISSUE | SAYI

1



Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2025

VOLUME | CİLT
3

ISSUE | SAYI
1

OWNER **SAHİBİ**

on behalf of Akdeniz University **Akdeniz Üniversitesi adına**

Rector **Rektör**

Prof. Dr. Özlenen ÖZKAN

EDITOR-IN-CHIEF **BAŞ EDITÖR**

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Akdeniz University **Akdeniz Üniversitesi**

CO-EDITORS **YARDIMCI EDITÖRLER**

Prof. Dr. Ayhan TOPUZ

Doç. Dr. Taner DANIŞMAN

Akdeniz University **Akdeniz Üniversitesi**

Akdeniz University **Akdeniz Üniversitesi**



Akdeniz Mühendislik Dergisi Akdeniz Journal of Engineering (AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2025

VOLUME | CİLT
3

ISSUE | SAYI
1

EDITORIAL BOARD | ALAN EDITÖRLERİ

Prof. Dr. Prof. Dr.	Afşin GÜNGÖR	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Mechanical Engineering Makine Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Ali DANANDEH MEHR	Antalya Bilim University Antalya Bilim Üniversitesi	Civil Engineering İnşaat Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Alper BİLGE	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Computer Engineering Bilgisayar Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Erdal KOŞUN	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Geological Engineering Jeoloji Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Kubilay YILDIRIM	Ondokuz Mayıs University Ondokuz Mayıs Üniversitesi	Molecular Biology and Genetics Moleküler Biyoloji ve Genetik
Prof. Dr. Prof. Dr.	Mehmet Serkan AKKİRAZ	Kütahya Dumlupınar University Kütahya Dumlupınar Üniversitesi	Geological Engineering Jeoloji Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Meltem ASİLTÜRK ERSOY	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Materials Science and Engineering Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Mustafa KILIÇ	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	Mechanical Engineering Makine Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Çiğdem SARAÇ	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Biomedical Engineering Biyomedikal Mühendisliği



Akdeniz Mühendislik Dergisi Akdeniz Journal of Engineering (AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2025

VOLUME | CİLT
3

ISSUE | SAYI
1

EDITORIAL BOARD | ALAN EDITÖRLERİ

Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Emre YALÇIN	Sivas Cumhuriyet University Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	Computer Engineering Bilgisayar Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	İ. Ethem KARADİREK	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Environmental Engineering Çevre Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	H. Feza CARLAK	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Electrical and Electronics Engineering Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Mehmet TORUN	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Food Engineering Gıda Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Rıfat TÜR	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Civil Engineering İnşaat Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Süleyman POLAT	Çukurova University Çukurova Üniversitesi	Food Engineering Gıda Mühendisliği
Asst. Prof. Dr. Dr. Öğr. Üyesi	Cihan ÖZGÜR	Isparta University of Applied Sciences Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	Environmental Engineering Çevre Mühendisliği
Asst. Prof. Dr. Dr. Öğr. Üyesi	Gökem Eğemen GÜLOĞLU	Middle East Technical University Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Aerospace Engineering Havacılık ve Uzay Mühendisliği
Asst. Prof. Dr. Dr. Öğr. Üyesi	Sıtkı GÜNER	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Electrical and Electronics Engineering Elektrik-Elektronik Mühendisliği



Akdeniz Mühendislik Dergisi Akdeniz Journal of Engineering (AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2025

VOLUME | CİLT
3

ISSUE | SAYI
1

ADVISORY BOARD | DANIŞMA KURULU

Prof. Dr. Prof. Dr.	Adnan KAYA	İzmir Kâtip Çelebi University İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Cihan KALELİ	Eskişehir Technical University Eskişehir Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Faruk ŞEN	Muğla Sıtkı Koçman University Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Mecit Halil ÖZTOP	Middle East Technical University Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Mustafa Alper SELVER	Dokuz Eylül University Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Müfit BAHADIR	Technische Universität Braunschweig Braunschweig Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Serdar KARAKURT	Selçuk University Selçuk Üniversitesi
Prof. Dr. Prof. Dr.	Vahid NOURANI	Near East University Yakın Doğu Teknik Üniversitesi
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Volkan TUNALI	University of The West of Scotland Batı İskoçya Üniversitesi



Akdeniz Mühendislik Dergisi Akdeniz Journal of Engineering (AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2025

VOLUME | CİLT
3

ISSUE | SAYI
1

LANGUAGE EDITORS | DİL EDITÖRLERİ

Asst. Prof. Dr.
Dr. Öğr. Üyesi

Joseph William LEDET

Akdeniz University
Akdeniz Üniversitesi

Res. Asst. Dr.
Arş. Gör. Dr.

Koray KOÇ

Akdeniz University
Akdeniz Üniversitesi

TECHNICAL EDITORS | TEKNİK EDITÖRLER

Res. Asst. Dr.
Arş. Gör. Dr.

Fatih UÇAR

Akdeniz University
Akdeniz Üniversitesi

Res. Asst.
Arş. Gör.

Ceyhun ÇELEBİ

Akdeniz University
Akdeniz Üniversitesi

Res. Asst.
Arş. Gör.

Serenay AŞIK-AYGÜN

Akdeniz University
Akdeniz Üniversitesi

Res. Asst.
Arş. Gör.

Taha Yiğit ALKAN

Akdeniz University
Akdeniz Üniversitesi



Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2025

VOLUME | CİLT
3

ISSUE | SAYI
1

CORRESPONDENCE ADDRESS | YAZIŞMA ADRESİ

*Akdeniz University – Faculty of Engineering
Dumlupınar Boulevard, Akdeniz University Campus
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE*

*Akdeniz Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi
Dumlupınar Bulvarı, Akdeniz Üniversitesi Yerleşkesi
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE*

E-MAIL | E-POSTA

journalofeng@akdeniz.edu.tr

WEB PAGE | WEB SAYFASI

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



Akdeniz Mühendislik Dergisi Akdeniz Journal of Engineering (AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2025

VOLUME | CİLT
3

ISSUE | SAYI
1

CONTENTS | İÇİNDEKİLER

PAGE | SAYFA ARTICLES | MAKALELER

1-10

EN YÜKSEK GÜCE BAĞLI OTOMATİK YÖNLENEN ANTEN SİSTEMİ TASARIMI | DESIGN OF A SELF-DIRECTED ANTENNA SYSTEM BASED ON THE MAXIMUM POWER

Ü. U. GÜNER  Ş. ÖZEN  K. ATEŞ 
Electrical Engineering
Elektrik Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

11-19

MONITORING WETLAND TRANSFORMATIONS IN LAKE EBER OVER A DECADE USING REMOTE SENSING | UZAKTAN ALGILAMA KULLANILARAK EBER GÖLÜ'NDEKİ SULAK ALAN DÖNÜŞÜMLERİNİN ON YIL SÜRE İLE İZLENMESİ

R. U. ACAR  E. ZENGİN 
Geological Sciences and Engineering
Yer Bilimleri ve Jeoloji Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

20-44

UŞAK-ULUBEY KANYONU MİYOSEN ÇÖKELLERİNİN DEPOLANMA ORTAMI ÖZELLİKLERİ | DEPOSITIONAL ENVIRONMENT CHARACTERISTICS OF THE MIOCENE DEPOSITS OF UŞAK-ULUBEY CANYON

M. KABAK  E. KOŞUN 
Geological Sciences and Engineering
Yer Bilimleri ve Jeoloji Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

45-55

DETERMINING CAPTURE CROSS SECTION FROM CAPTURE TRANSIENT SIGNALS | YAKALAMA GEÇİŞ SİNYALLERİNDEN YAKALAMA KESİT ALANINI BELİRLEME

Ö. G. ERBAŞ  Y. G. ÇELEBİ 
Materials Engineering
Malzeme Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

56-62

EFFECT OF FREEZING AND STORAGE ON ASCORBIC ACID AND B-CAROTENE CONCENTRATION OF FROZEN RED PEPPER (CAPSICUM ANNUUM L.) | DONDURMA VE DONDURULMUŞ DEPOLAMANIN KIRMIZI BİBERİN (CAPSICUM ANNUUM L.) ASKORBİK ASİT VE B-KAROTEN KONSANTRASYONU ÜZERİNE ETKİSİ

C. METINOĞLU  E. DEMIRAY  Y. TULEK 
Food Engineering
Gıda Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

YEAR | YIL
2025

VOLUME | CİLT
3

ISSUE | SAYI
1

CONTENTS | İÇİNDEKİLER

PAGE | SAYFA ARTICLES | MAKALELER

63-75

YÜKSEK GERİLİM HATLARINDA TOPRAKLAMA ÇÖZÜMLERİ İLE YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN İNCELENMESİ | INVESTIGATION OF LIGHTNING ELECTROMAGNETIC PULSES WITH GROUNDING SOLUTIONS IN HIGH VOLTAGE LINES

T. ÇAKIL 

Electrical Engineering
Elektrik Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

76-85

ANADOLU SAFRANI (CROCUS SATIVUS L.) SULU EKSTRAKTI İLE GÜMÜŞ NANOPARTİKÜLLERİN (AGNP) YEŞİL SENTEZİ, ANTİOKSİDAN AKTİVİTELERİ VE İNSAN PROSTAT KANSERİ HÜCRELERİ ÜZERİNDEKİ SİTOTOKSİK ETKİLERİ | GREEN SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLES (AGNPS) USING ANATOLIAN SAFFRON (CROCUS SATIVUS L.) AQUEOUS EXTRACT AND THEIR ANTIOXIDANT ACTIVITY AND CYTOTOXIC EFFECTS ON HUMAN PROSTATE CANCER CELLS

T. ÖZKAN 

S. N. ELLİALTIOĞLU 

K. BAŞ 

S. KARAKURT 

Biomedical Engineering
Biyomedikal Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

86-97

FARKLI ÖZELLİKTE KAPLAMALI KUMAŞ İÇEREN SANDVİÇ KOMPOZİT YAPILARIN TERMAL VE AKUSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ | INVESTIGATION OF THERMAL AND ACOUSTIC PROPERTIES OF SANDWICH COMPOSITE STRUCTURES CONTAINING COATED FABRIC WITH DIFFERENT PROPERTIES

S. ARSLAN ATMACA 

Ö. İSKENDER 

Materials Engineering
Malzeme Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

98-111

ERKEN MİYOSEN YAŞLI KÖMÜRLÜ ASPİRAS HAVZASI'NIN (KASTAMONU) JEOLojİK EVRİMİ | GEOLOGICAL EVOLUTION OF THE COAL BEARING EARLY MIOCENE ASPİRAS BASIN (KASTAMONU)

S. D. DURAK 

M. S. AKKİRAZ 

Geological Sciences and Engineering
Yer Bilimleri ve Jeoloji Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

112-121

SIFIR ENERJİ KONSEPTLİ BİNALARDA ENERJİ OPTİMİZASYON | ENERGY OPTIMIZATION FOR NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS (NZEB) CONCEPT

H. GEDİZ TAŞKIN 

H. F. CARLAK 

Electrical Engineering
Elektrik Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

EN YÜKSEK GÜCE BAĞLI OTOMATİK YÖNLENEN ANTEN SİSTEMİ TASARIMI

DESIGN OF A SELF-DIRECTED ANTENNA SYSTEM BASED ON THE MAXIMUM POWER

Ünal Umut GÜNER¹  Şükrü ÖZEN¹  Kayhan ATEŞ^{*1,2} 

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye.

² Telecommunications and Remote Sensing Laboratory, Department of Electrical, Computer and Biomedical Engineering, University of Pavia, Pavia, Italy.

ABSTRACT

In communication systems, the physical alignment of the transmitting and receiving antennas is a critical parameter that affects communication efficiency. This study presents a two-axis rotation system that automates the alignment of the receiver antenna used in wireless communication systems. The aim is to increase the communication efficiency. The system has a mechanical structure that rotates the receiver antenna to obtain the highest signal strength between a receiver and a transmitter antennas. The alignment of the receiver antenna to the highest power is achieved through a vector network analyzer (VNA) controlled by the Python programming language based a graphical user interface based. The developed computer interface allows the user to define the antenna orientation angle. Additionally, the transmitter antenna's scattering parameters are analyzed to automatically direct the receiver to the most efficient angle. With this study, an alternative to antenna measurement systems can be provided to obtain antenna radiation patterns. In this study, the Friis transmission equation were considered, and the system's performance was tested at frequencies of 1.8, 2.5, and 4 GHz. The results demonstrate that the automatic steering system ensures the desired accuracy and efficiency, allowing the antennas to focus on maximum power transmission.

Keywords: Antenna Measurement System, Electromagnetic Fields, Python Programming, Radiation Pattern, Scattering Parameters.

ÖZET

Haberleşme sistemlerinde alıcı ve verici antenlerin birbirine karşı fiziksel konumları, haberleşme verimini etkileyen önemli parametrelerden birisidir. Bu çalışmada, kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan alıcı antenin hizalamasını otomatikleştiren iki eksenli bir yönlendirme sistemi sunulmuştur. Bu sayede, haberleşme veriminin artırılması amaçlanmıştır. Sistem, bir alıcı ve bir verici anten arasında en yüksek sinyal gücünü elde etmek için alıcı anteni döndüren mekanik bir yapıya sahiptir. Alıcı antenin en yüksek güce yönleneşi, Python programlama dili temelli geliştirilen bir kullanıcı arayüzü ile kontrol edilen bir vektörel ağ analizörü (VNA) aracılığıyla sağlanmıştır. Geliştirilen bilgisayar arayüzü sayesinde, kullanıcı tarafından anten yönelim açısı belirlenebilmektedir. Ayrıca, verici antenin saçılma parametreleri analiz edilerek en verimli açıya otomatik olarak yönlenebilmektedir. Bu çalışma sayesinde anten ölçüm sistemlerine bir alternatif olması için anten ışıma örüntüsü elde edilebilmektedir. Çalışmada, Friis yayılma formülü göz önünde bulundurulmuş ve sistemin performansı 1,8, 2,5, 4 GHz frekanslarında test edilmiştir. Sonuçlar, otomatik yönlendirme sisteminin istenen doğruluğu ve verimliliği sağlayarak antenlerin maksimum güç iletimine odaklandığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Anten Ölçüm Sistemi, Elektromanyetik Alanlar, Işıma Örüntüsü, Python Programlama, Saçılma Parametreleri.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: kayhanates@akdeniz.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
10.11.2024	02.12.2024	02.01.2025	01.06.2025

1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşmede kullanılan radyo frekansı (RF) ve mikrodalga sistemleri, günümüzün hızla gelişen teknolojik ortamında büyük önem taşımaktadır. Bu alanlardaki sürekli ilerlemeler, haberleşme performansını artırma, veri transfer hızını optimize etme ve kablosuz ağların yaygınlaşmasını sağlama amacını taşımaktadır. Bu bağlamda anten teknolojisi, RF ve mikrodalga uygulamalarında temel bir unsur olarak öne çıkmaktadır [1].

Günden güne artan bilgi miktarıyla birlikte bilginin iletimi de oldukça zorlaşmış, bu da haberleşmenin önemini ortaya çıkarmıştır. Haberleşmenin nasıl iyileştirilebileceğiyle ilgili literatürde farklı alanlarda çalışmalar mevcuttur. İhtiyaç doğrultusunda farklı sistemler için farklı teknikler gözlemlenebilir. Hücrel haberleşme, uydu haberleşmesi, Wi-Fi, radyo ve televizyon yayınları örnek olarak verilebilir. Neredeyse bütün haberleşme sistemleri için anten kavramı kritik bir öneme sahiptir. Hücrel haberleşme için her ne kadar konunun derinliği tartışılabilir olsa da baz istasyonları için farklı açıklıkların haberleşmenin performansını ne ölçüde artırdığı literatürde daha önce çalışılmıştır [2].

Anten ölçüm sistemleri genellikle beş alt sistemden oluşur; alıcı ile verici anten, konumlandırma sistemi, kayıt sistemi ve veri işleme sistemidir [3]. Bu tip anten ölçüm sistemlerinin düşük maliyetli olması önemli bir faydadır. Uzak alan anten ışıma örüntüsü ölçüm sistemleri, çoğunlukla mekanik yapılara ve alıcı-verici bütünlüğüne ihtiyaç duyduğu için pahalı sistemlerdir. Sadece bu yönüyle ucuz ve kolay kullanılabilir bir ölçüm yöntemi, bu tür sistemler için bir ihtiyaçtır.

Anten tasarımlarında kazanç, ışıma davranışı, polarizasyon ve verimlilik incelenmesi gereken önemli parametrelerdendir [4]. Anten prensipleri incelendiğinde genellikle antenlerin tasarımına odaklanılır. Fakat bazı haberleşme sistemlerinde genellikle alıcı-verici anten çiftinden birinin sabit olmadığı gözlemlenir. Bu durum, yönlü antenler için haberleşme verimini düşürür. Literatürde her ne kadar hazır anten ölçüm sistemleri tasarlanmış olsa da tamamen otomatik yönelimli bir anten için kaynaklar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, alıcı antenin en yüksek güce göre verici antene yönelmesi sağlanarak sabit durumda oluşacak olan düşük anten veriminin yükseltilmesi planlanmıştır. Vektörel ağ analizörü temelli tasarlanan sistem sayesinde anten ölçümünden çok antenin yönelimine odaklanılmıştır. Tasarlanan sistemin literatüre katkıları şu şekilde sıralanabilir:

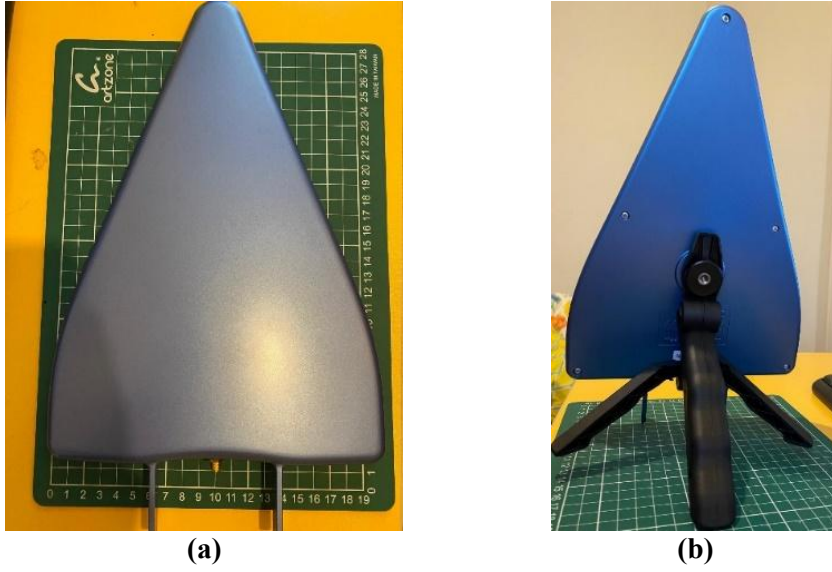
- Alıcı antenin vericiye en yüksek sinyal gücüne göre otomatik yönlendirilmesi sağlanarak, sabit antenlerin düşük verim sorunları minimize edilmiştir.
- Karmaşık ve pahalı sistemlere alternatif olarak, uygun maliyetli bir prototip geliştirilmiştir.
- Yönlü antenlerde yöne bağlı kayıpları azaltan, tamamen otomatik bir yön düzeltici sistem literatüre kazandırılmıştır.
- Vektörel ağ analizörü temelli bir sistemle, anten ölçümünden çok yönetime odaklanan bir yöntem sunulmuştur.
- Literatürde sınırlı olan otomatik yönelimli anten sistemleri için yenilikçi bir tasarım gerçekleştirilmiştir.

Çalışma boyunca oluşturulan sistem ve program için “EYGOYA” kısaltması kullanılacaktır. Makalenin gidişatı şu şekilde planlanmıştır: Öncelikle, geliştirilen sistemin temel aldığı teorik altyapı ve kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Ardından, bilgisayar tabanlı tasarlanan kullanıcı arayüzü ve donanım açıklanmıştır. Farklı frekanslarda hesaplama algoritması sayesinde elde edilen anten ölçüm bulguları belirtilmiştir ve tartışılmıştır. Sonuç kısmında ise çalışmanın literatüre katkısı sunulmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Sistem ve Anten Özellikleri

Bu çalışmada alıcı ve verici antenler olarak referans değerleri bilinen log-periyodik antenler (HyperLOG-6080 ve HyperLOG-7060, Aaronia, Almanya) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan antenler Şekil 1’de verilmiştir. Antenlerin özellikleri, Tablo 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma Kapsamında Kullanılan Antenler: (a) Hyperlog-6065; (b) Hyperlog-7060

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Antenlerin Özellikleri [5, 6]

Özellikler	HyperLOG-6080	HyperLOG-7060
Frekans Aralığı	680 MHz - 8 GHz	700 MHz – 6 GHz
Anten Kazancı (dBi)	5 dBi	5 dBi
Anten Tasarımı	Log-Periyodik	Log-Periyodik
Anten Fiziksel Boyutları	340 × 200 × 25 mm	340 × 200 × 25 mm

Antenlerin ölçüm aşamasında karşılaşılan ilk kriterlerden birisi, antenler arası mesafedir. Bu durum, uzak alan kavramına göre incelenir. Uzak alan, bir antenden yeterince uzak mesafede elektromanyetik dalgaların yayıldığı veya bir alıcıya yeterince uzak mesafeden alındığı bölgeyi ifade eder [7]. Bu bölgede, elektromanyetik dalgalar serbest uzay koşullarında yayılır ve dalga şeklinde ilerler. Uzak alanın belirlenmesi için yayılma mesafesi veya dalga boyuna bağlı olarak farklı formüller kullanılabilir. Uzak alan hesabı, şu şekildedir:

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

Burada, R uzaklık, D antenin en büyük fiziksel boyutu ve λ ise dalga boyunu temsil eder. Bu formül, antenin uzak alanını belirlemek için kullanılan bir kriterdir.

Antenlerin tasarımı ve performansı, uzak alanın önemli bir faktörü olarak dikkate alınmalıdır. Uzak alandaki elektromanyetik dalgaların genlik, faz ve polarizasyon özellikleri, antenin verimliliği, kazancı ve ışıma örüntüsü üzerinde belirleyici bir rol oynar. Antenin uzak alan performansı, elektromanyetik dalgaların yeterli uzaklıkta doğru bir şekilde yayılması için önemlidir [8].

Çalışmada kullanılan çalışma frekansları, kullanılan antenlerin kataloglarında belirtilen referans değerlere göre seçilmiştir. Çalışmada karşılaştırmalı analiz yapılabilmesi için çalışmalar 1,8, 2,5, 4 GHz frekansları baz alınarak yapılmıştır.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Çalışmada kullanılan frekanslar için dalga boyları $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, Denklem 2 yardımıyla sırasıyla 0,167, 0,120 ve 0,075 m olarak bulunur. Hesaplanan dalga boyları ile alıcı ve verici antenlerin en uzun dipolünün 20 cm olduğu bilinerek uzak alan sınırları Denklem 1 ile hesaplanabilir.

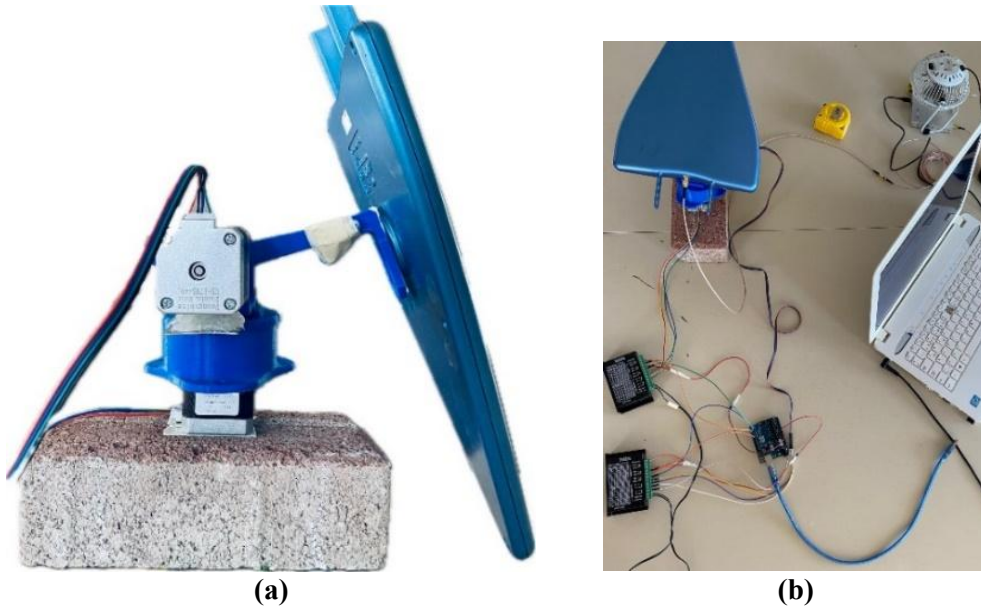
Bu durumda uzak alan sınırları R1, R2, R3 için sırasıyla 0,48, 0,67 ve 1,06 m'dir. R3'ün aralarında en uzak alana sahip olduğu düşünülürse ölçüm sisteminde antenler arası mesafe minimum 1,06 m olacak şekilde konumlandırılmalıdır. Hata paylarının minimize edilmesi için bu mesafe çalışmada 1,1 m olarak ayarlanmıştır. Bu hesaplamaların doğruluğunun teyit edilmesi için antenler arası serbest uzay yayılımını modelleyen Friis iletim denklemi kullanılmıştır. Friis denklemi, alıcı antene ulaşan gücü verici antenin gücü, anten kazançları ve aralarındaki mesafeye bağlı olarak hesaplar [9].

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (3)$$

Burada P_r , alıcı antende ölçülen güç, P_t verici antenin gücü, G_t verici anten kazancı, G_r alıcı anten kazancı, λ dalga boyu ve R antenler arası mesafedir. Bu formül, ideal bir serbest uzay ortamında sinyal kayıplarını belirlemekte ve ölçümlerin doğruluğunu artırmak amacıyla referans olarak kullanılmaktadır.

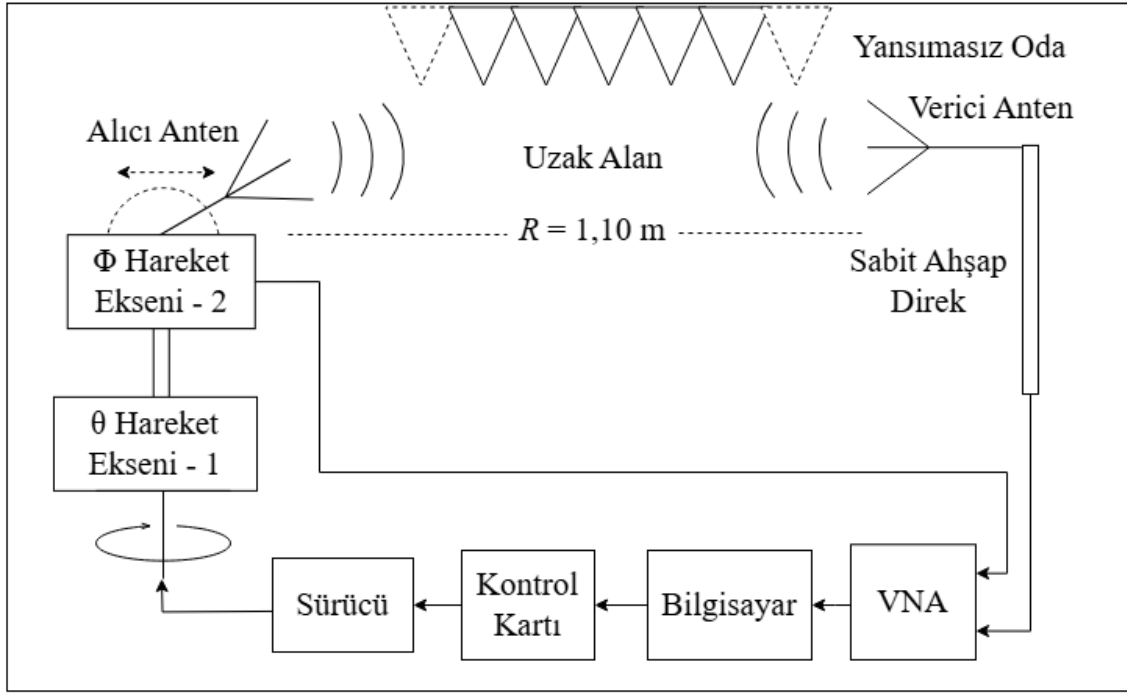
Anten kazançlarının her iki anten için de 5 dBi olduğu ve VNA aracılığıyla iletilen gücün 0 dBm olduğu bilindiğine göre uzak alan sınırlarında konumlandırılan antenler için ölçülen güç P_r , 1,8 GHz, 2,5 GHz ve 4 GHz frekansları için sırasıyla -28,35, -31,23, -35,31 dBm olarak hesaplanabilir. Hesaplamalarda da görülebileceği üzere frekans arttıkça artan uzak alan sınırı alıcı anten tarafından ölçülen gücü büyük oranda düşürmektedir. Bu durum, çalışmada yüksek frekans için ölçüm sorunu doğuracaktır ve ilerleyen bölümlerde detaylıca incelenmiştir.

Hedef şema ve uygulanmaya çalışan adımlar doğrultusunda kurulan EYGOYA tasarımı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Gerçekleşmiş Anten Ölçüm Sistemi: (a) Alıcı Anten; (b) Ölçüm Sistemi

Ölçüm ortamının hazırlanması aşamasında dikkat edilmesi gereken birkaç husus vardır. Elektromanyetik girişim ve yansımaları minimize etmek amacıyla yansısız oda ortamı seçilmiştir. Kalibrasyon ve referans ölçümleri sırasında ölçüme olumsuz etkisi olduğu tespit edilen tüm girişim yaratan cihazlar mümkün olduğunca uzaklaştırılmıştır. Bununla beraber, alıcı ve verici antenler arasındaki mesafe yaklaşık 1,1 m'ye ayarlanarak 4 GHz frekansı için antenin uzak alanda kalması sağlanmış ve ölçümler 10° çözünürlükle gerçekleştirilmiştir. Ölçüm ortamı için hedefler doğrultusunda en uygun görülmüş olan ölçüm sistemi şeması Şekil 3'teki gibidir.

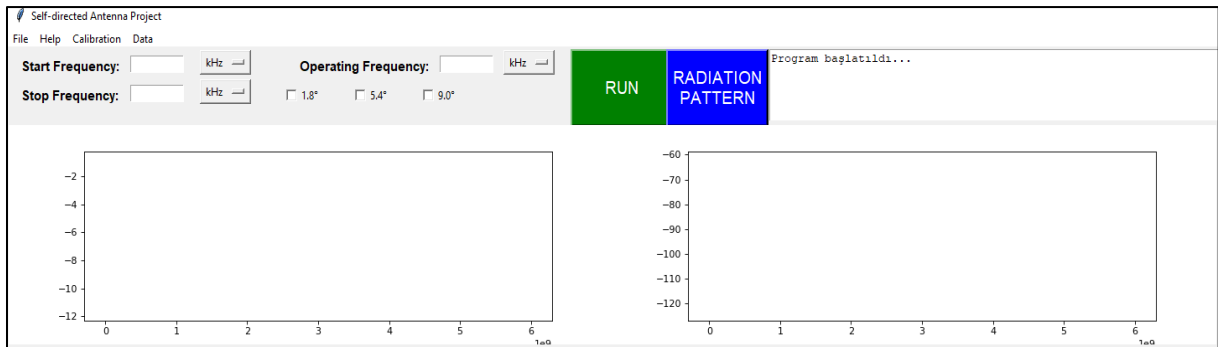


Şekil 3. Anten Ölçüm Sistemi Şeması

2.2. Kullanıcı Yazılımı Arayüzü

Bu çalışmada, ölçüm cihazı olarak 2 portlu VNA (LibreVNA, 100 kHz-6 GHz) kullanılmıştır. Cihaz, Python tabanlı bir kullanıcı arayüzü yazılımı aracılığıyla Programlanabilir Enstrümantasyon için Standart Komutlar (SCPI) protokolü ile denetlenmiştir. SCPI, ölçüm cihazlarının yazılım tabanlı kontrol edilmesini sağlayan standart bir komut setidir ve bu çalışmada ölçümler için efektif ve performanslı bir çözüm sağlamıştır. SCPI protokolü, Python arayüzü ve VNA arasında veri aktarımını sağlamıştır. Arayüzden girilen ölçüm frekans aralığı gibi bilgiler protokol sayesinde VNA'da tanımlanır. VNA, SCPI sorgusuna göre saçılma parametrelerini ölçer ve verileri geri göndermiştir. Veriler, analiz ve kaydetme yeteneği gibi belirli bir işlem için kullanılmıştır. Kullanılan protokol, cihazın farklı ölçüm ihtiyaçlarına uyum sağlamasını kolaylaştırmakta ve ölçüm işlemlerinin doğruluğunu artırmaktadır. Çalışmada bu protokolün kullanılması, ölçümlerin güvenilir ve tekrarlanabilir olmasına katkıda bulunmuştur.

EYGOYA'nın ana menüsü başlangıç frekansı, bitiş frekansı, çalışma frekansı, üç ayrı çözünürlük seçeneği, S_{11} ve S_{21} parametrelerinin anlık grafikleri, kalibrasyon menüsü, bilgilendirme sohbet kutusu, ışıma örüntüsü butonu ve başlat butonundan oluşmaktadır. Kullanıcı arayüzünün genel görünümü, Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. EYGOYA Arayüzü

Arayüz, kullanıcıya kalibrasyon için esneklik sağlamaktadır. Kalibrasyon metodu olarak kısa-açık-yük-geçiş (SOLT) yöntemi kullanılmıştır [10, 11]. Bunun yanında kullanıcı cihaz kalibrasyonunu kendisi yapabilmekte veya hazır kalibrasyon dosyasını programa yükleyerek tamamlayabilmektedir.

Literatürde, anten tasarımları ve uygulamalarına yönelik farklı çalışmalar bulunmaktadır [12-14]. Söz konusu tasarımlarda saçılma parametreleri önemlidir. Bu çalışmada tasarlanan sistemde saçılma parametrelerinin anlık grafiklerini görüntülemek, birçok durumda ihtiyaçtır. Bu yüzden EYGOYA'da S_{11} ve S_{21} parametrelerinin anlık grafikleri ana menü üzerinde sürekli olarak izlenebilmektedir. Ayrıca kullanıcı, dilediği zaman saçılma parametrelerini gerçek, sanal, genlik ve faz bilgisiyle beraber kaydedebilmektedir.

Işıma örüntülerinin anten ölçüm sistemlerinde ne kadar kritik bir yeri olduğundan daha önce bahsedilmişti. Bu çalışmanın ana amacı en yüksek güce ulaşmak olsa da ışıma örüntüsü çıkarabilme kabiliyeti sayesinde bir anten ölçüm sistemi olarak kullanılabilmesi de mümkündür. EYGOYA ölçümler tamamlandıktan sonra θ açısı eksenindeki iki boyutlu ışıma örüntüsünü görüntüleyebilmeye olanak sağlayan bir arayüze sahiptir. Yönlendirme işlemi tamamlandıktan sonra, her açı için ayrı sonuç metniyle birlikte ışıma örüntüsü ve diğer sonuçlar bir Excel dosyasına kaydedilir.

2.3. Donanım Tasarımı

θ eksenindeki hareket, alıcı antenin 360° bir döngü içinde en yüksek sinyal gücüne yönelmesini sağlamıştır. Motor kontrolü için Arduino Uno kontrol kartı, belirlenen açılara göre adım sinyalleri göndermiştir ve bu sinyaller TB6600 sürücü ile her bir darbe için $1,8^\circ$ hareket sağlamıştır. Üç farklı açısal çözünürlük seçeneği sunulmuş olup her adımdaki darbe sayısı buna göre belirlenmiştir. Darbe sayısı kullanıcının arayüzden belirleyeceği çözünürlüğün motor mikro adımına oranıyla hesaplandığında 3,6, 5,4 ve 9 çözünürlükleri için sırasıyla 2, 3 ve 5 sonuçlarına ulaşılmıştır. Motorun hedef açısını tarayabilmesi için ihtiyacı olan döngü sayısı da 360 ile çözünürlük açılarının oranlanmasıyla 100, 50 ve 40 tur olarak hesaplanmıştır. Tur sayıları göz önüne alındığında, sistemin pratikliğinde çözünürlüğün doğrudan etkisi olduğu unutulmamalıdır. 100 tur ve 40 tur döngüleri EYGOYA'nın çalışma süresini ciddi biçimde etkilemektedir.

Kontrol kartı, motorun her adımı tamamlayıp tamamlamadığını geri besleme döngüsü ile EYGOYA arayüzü yazılımına bildirir. Böylece her adımda yalnızca tek bir ölçüm alınarak konum doğruluğu sağlanmış olur. 360° dönüş tamamlandığında kontrol kartı, arayüz yazılımına bitiş mesajını iletir; bu durumda yazılım ve donanım çalışması tamamlanır.

θ eksenindeki her adımda, anten tarafından ölçülen S_{21} parametresi kaydedilir ve en yüksek sinyal gücü değeri tespit edilir. Bu değer motor adımı karşılığı konumu, çeşitli algoritmalar kullanılarak hesaplanır ve sistem en yüksek güç için motora gerektiği kadar darbe gönderir, anten en yüksek güce göre konumlanır. Farklı açısal çözünürlükler için programda üç ayrı koşul tanımlanarak, her açı için optimum dönüş pozisyonu belirlenir.

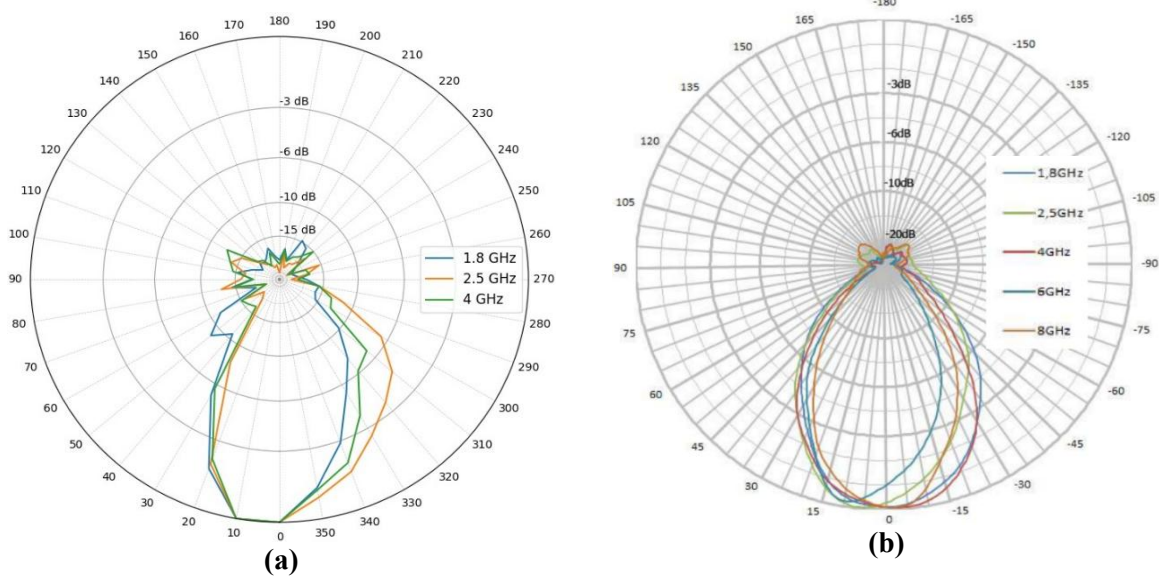
ϕ eksenini için kontrol fonksiyonu, θ eksenini fonksiyonuna benzer şekilde çalışmakla birlikte, bu ekseninde motor 180 derecelik bir dönüş gerçekleştirmektedir. Başlangıçta 180° tarama yapıldıktan sonra, anten en yüksek sinyal gücü konumuna göre ters yönlendirilerek bu açıda maksimum sinyale yönelecek şekilde konumlanır. Bu hareket, θ ekseninde olduğu gibi Python'dan gelen sinyal komutları ile yönetilir ve ölçüm sonuçları SCPI protokolü ile kaydedilir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada geliştirilen otomatik anten yönlendirme sistemi, antenlerin en yüksek sinyal gücünü alacak şekilde konumlanmasını sağlamış ve yapılan ölçümler bu sistemin performansını desteklemiştir. Sistem, θ ekseninde 360° ve ϕ ekseninde 180° dönüş hareketleri boyunca S_{21} parametresiyle ölçülen sinyal gücü değerlerine dayalı olarak test edilmiştir. Bu süreçte alıcı anten, en yüksek sinyal gücünü elde edecek açıyı belirlemiş ve bu açıya otomatik olarak yönlendirilmiştir.

Test sonuçları, farklı frekans aralıklarında (1,8 GHz, 2,5 GHz ve 4 GHz) en yüksek sinyal gücünün elde edildiği açının doğruluğunu ve tutarlılığını göstermektedir. Elde edilen ışıma örüntüleri, log-periyodik alıcı anteninin 1,8 GHz ile 4 GHz frekans aralığındaki üretici firmanın referans değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, sistemin özellikle düşük frekanslarda daha kararlı ve hedefe uygun sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, 4 GHz'de yapılan ölçümlerde ışıma örüntüsünde bazı bozulmalar gözlemlenmiştir.

Antenler arası mesafe analizlerinde, uzak alan sınırının altında yapılan ölçümlerde sinyal kayıplarının arttığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda, 4 GHz frekansı için antenler 1,1 m mesafede konumlandırılmıştır. Yüksek frekanslı ölçümlerde ise mesafe artırılmasına rağmen ışıma örüntüsünde bozulmalar meydana gelmiş, bu nedenle 6 GHz ölçümleri çalışmaya dahil edilmemiştir. Şekil 5'te çalışma sonucu oluşan anten ışıma örüntüleri ve referans anten ışıma örüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 5. Farklı Frekanslardaki Alıcı Anten Işıma Örüntüleri: **(a)** EYGOYA Ölçümleri; **(b)** Anten Üretici Kataloglarındaki Referans Değerler [5]

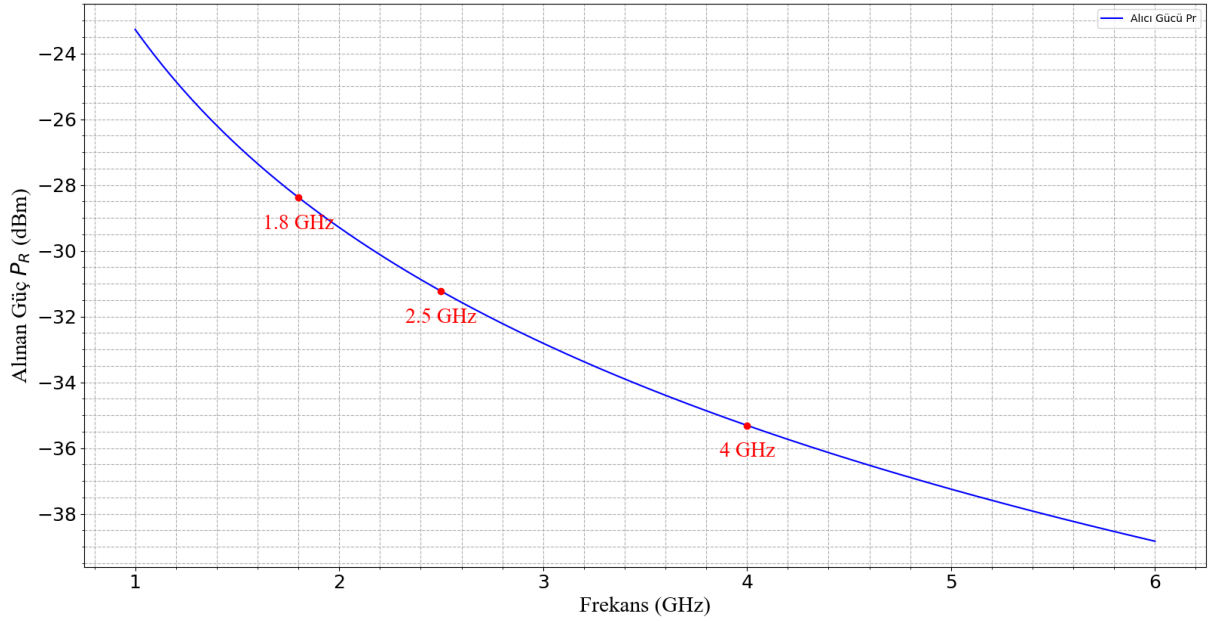
Sistem, en verimli olması gereken 0° konumundaki en yüksek güç değerini ışıma örüntüsü üzerinde de göstermektedir. Bu bilgi antenin en yüksek güce yönelebilmesi için yeterli bir bilgidir.

Antenlerin ölçümünde önemli bir parametre olan duran dalga oranı (VSWR), bu çalışma kapsamında incelenmiştir. VSWR seviyeleri Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Frekanslara Göre VSWR Ölçümleri

Frekans	VSWR
1,8 GHz	1,040
2,5 GHz	1,027
4 GHz	1,032

Şekil 6, Denklem 3 yardımıyla alıcı antendeki gücün frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Burada, frekansın ölçülen güç üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 1,8, 2,5 ve 4 GHz frekans noktalarında anten kazançları 5 dBi ve verici gücü 0,001 W olarak kabul edilmiştir. Yapılan hesaplamalarda sabit uzaklık koşulu için frekans arttıkça ölçülen gücün azaldığı gözlemlenmiştir. Hesaplamalar Friis denklemiyle yapılmıştır. İlgili frekanslar için hesaplar daha önce yapılmış ve sırasıyla -28,35, -31,23, -35,31 dBm sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu durum, yüksek frekanslarda dalga boyunun küçülmesine bağlı olarak serbest uzay yol kaybının artması ile açıklanabilir. 1,8 GHz’de ölçülen güç dBm olarak en yüksek değerini alırken, 4 GHz’de minimum seviyeye düşmüştür. Bu veriler, frekans arttıkça güç kaybının arttığını ve uzak mesafelerde düşük frekansların tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir. Yapılan ölçümler sonucunda ilgili frekanslar için sırasıyla -34,32, -37,51 ve -35,94 dBm değerlerine ulaşılmıştır. Ölçümlerle teorik hesaplamalar arasındaki farklılıklar düşük frekanslarda daha belirgindir. Bu durumun birden fazla sebebi olabilir. Bu frekanslarda Wi-Fi ve mobil telefonların kullanıldığı bilinmektedir.



Şekil 6. Alıcı Antendeki Güç (P_R) – Frekans İlişkisi

Bu bulgular ışığında düşük frekanslarda elde edilen daha yüksek güç değerleri, haberleşme mesafelerinin artırılması açısından avantaj sağlamaktadır. Özellikle 1,8 GHz gibi düşük frekanslarda daha az yol kaybı gözlenmiş olması, bu frekansların uzak mesafeli haberleşme sistemleri için uygun olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte, frekans arttıkça daha büyük kayıpların yaşanması, kısa mesafeli ancak yüksek veri hızına ihtiyaç duyulan sistemlerde yüksek frekansların kullanılabileceğini göstermektedir. Frekans ve yol kaybı arasındaki bu ilişki, haberleşme sistemlerinin tasarımında önemli bir parametre olarak değerlendirilmelidir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanan EYGOYA'nın güncel literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslama sonuçları, Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Literatürdeki Benzer Çalışmalar ve Özellikleri

Benzer Çalışmalar	Çalışma Frekansı	Uzaklık	Elektromanyetik Kaynak	Kullanım Alanı
Olencki ve ark. [15]	1,5 – 5,5 GHz	Uzak Alan	VNA	Anten Ölçümü
Rehman ve ark. [16]	0,6 – 10 GHz	Uzak Alan	VNA	Anten Ölçümü
Zhang ve ark. [17]	2,4 GHz	Uzak Alan	Gerilim Kontrollü Osilatör	Anten Ölçümü
Fontá ve ark. [18]	8,2 – 67 GHz	Uzak alan	VNA	Anten Ölçümü
EYGOYA	1,6, 2,5, 4 GHz	Uzak Alan	VNA	Anten Ölçümü / Otomatik Yönlenme

4. SONUÇ

Bu çalışmada, kablosuz haberleşme sistemlerinde anten hizalama ve sinyal optimizasyonu için alternatif bir otomatik yönlendirme sistemi tasarımı sunulmuştur. Tasarlanan sistem, antenlerin maksimum sinyal gücünü elde edecek şekilde yönlendirilmesini sağlayarak haberleşme verimliliğini artırmaktadır. Alıcı antenin θ ve ϕ eksenlerinde bağımsız olarak dönmesi, S_{21} 'e dayalı en yüksek sinyal gücünün ölçülmesini sağlamış, böylece hedeflenen haberleşme doğruluğu ve kararlılığı optimize edilmiştir.

Çalışmada kullanılan Python tabanlı arayüz, kullanıcıların sistem ayarlarını kolaylıkla yapmalarına olanak tanırken, SCPI protokolü ile sağlanan otomatik kontrol yetenekleri, anten ölçüm sistemlerinin

pratikliğini artırmaktadır. Bu özellikler, kullanıcıların cihazı çeşitli frekans aralıklarında yönetebilmesi ve ölçüm süreçlerini gerçek zamanlı olarak takip edebilmesi açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Geliştirilen EYGOYA sistemi sayesinde test ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Test ölçümlerine göre alıcı antenin verici antene göre yönelimi gözlenmiştir. Bunun yanında, davranışı bilinen antenlerin örüntüsü, VSWR ve ölçülen güç değerleri 1,8, 2,5 ve 4 GHz frekanslarında incelenmiştir. Ölçüm sonuçları, kullanılan antenlerin kataloglarında belirtilen referans değerleriyle uyumludur.

Literatürde anten optimizasyonuna dair çeşitli çalışmalar bulunsa da bu çalışmanın literatüre katkısı, sistemin otomatik yönlendirme yeteneği ve yüksek sinyal gücüne odaklanmasıdır. Tasarlanan sistem, haberleşme sistemlerinde anten verimliliğini artırmak için pratik bir çözüm sunmaktadır. Geliştirilen yönlendirme mekanizması ve VNA tabanlı ölçüm arayüzü, diğer RF ve mikrodalga sistemlerine entegre edilebilecek esneklikte olup gelecekteki araştırmalar için de bir alternatif oluşturmaktadır. Araştırmacılar tarafından farklı frekans bantlarında çeşitli kaynaklardan yayılan elektromanyetik alanların etkileri incelenmektedir [19-22]. Söz konusu sistemin elektromanyetik çevre ile ilişkisi, ele alınması gereken konulardan birisi olarak belirtilebilir.

TEŞEKKÜR

Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne (EMUMAM) teşekkür ederiz. Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında desteklenmiştir (Proje No: 1919B012224030).

REFERANSLAR

- [1] J. Smith, Automated Antenna Alignment and Optimization System, International Journal of Electrical Engineering, Volume 15(3), 98-115, 2023.
- [2] A. Alexiou, M. Haardt, Smart Antenna Technologies for Future Wireless Systems: Trends and Challenges, IEEE Communications Magazine, 42(9), 90-97, 2004.
- [3] M. M. Taygur, S. Bas, E. Yumrukaya, E. A. Miran, S. Gunel, Low-Cost FPGA Based Antenna Pattern Measurement System, 2013 International Conference on Applied Electronics, Czech Republic, pp. 1-4, 2013.
- [4] A. Rehman, T. Rasul, M. F. Shafique, B. Ijaz, K. S. Alimgeer, M. S. Khan, R. M. Shubair, N. Khaddaj Mallat, Development of a Cost Effective Antenna Radiation Pattern Measurement Setup, 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, pp. 1-4, 2016.
- [5] Aaronia HyperLOG-60 LogPeriodic Antennas, https://downloads.aaronia.com/datasheets/antennas/HyperLOG/Aaronia_HyperLOG_60_Logper_Antennas.pdf, 2014 [accessed 2 March 2022].
- [6] Aaronia HyperLOG-70 LogPeriodic Antennas, https://downloads.aaronia.com/datasheets/antennas/HyperLOG/Aaronia_HyperLOG_70_Logper_Antennas.pdf, 2014 [accessed 2 March 2022].
- [7] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, Second Ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [8] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Fourth Ed. Hoboken: Wiley, 2012.
- [9] J. A. Shaw, Radiometry and the Friis Transmission Equation, American Journal of Physics, 81, 33-37, 2013.
- [10] K. Ates, T. Z. Kocaer, S. Ozen, N.U. Kockal, Electromagnetic interference shielding effectiveness and microwave absorption performance of plaster mortars containing metal waste chips in X-band frequency range. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 57(3), 230-244, 2023.

-
- [11] N. Gülmez, N.U. Koçkal, Ş. Özen, and Ateş, Corrosion Potential and Electromagnetic Shielding Effectiveness of Geopolymer Tiles Produced with Waste Metal Particles. *Sādhanā*, 47 (3), 115, 2022.
- [12] Ç. Gökçek-Saraç, G. Akçay, S. Karakurt, K. Ateş and Ş.Özen, Possible Effects of Different Doses of 2.1 GHz Electromagnetic Radiation on Learning, and Hippocampal Levels of Cholinergic Biomarkers in Wistar Rats, *Electromagnetic Biology and Medicine*. 40 (1), 179-190, 2021.
- [13] K. Ateş, C. Yeter ve Ş. Özen, WLAN Uygulamaları için 4×4 MIMO Antenin Elektromanyetik Dozimetri Karakteristiğinin İncelenmesi, *TIPTEKNO'20*, Çevrimiçi, 19-20 Kasım 2020.
- [14] K. Ates and H. F. Carlak, Dosimetry Analysis of the Human Head Model due to Mobile Phone Usage at GSM-850 Frequency Band, 2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET), Antalya, Türkiye, 2017.
- [15] J. Olencki, V. Waladi, A. Bekasiewicz ve L. Leifsson, A Low-Cost System for Far-Field Non-Anechoic Measurements of Antenna Performance Figures, *IEEE Access*, 11, 39165-39175, 2023.
- [16] A. Rehman, T. Rasul, M. F. Shafique, B. Ijaz, K. S. Alimgeer, M. S. Khan, R. M. Shubair ve N. K. Mallat, Development of a Cost Effective Antenna Radiation Pattern Measurement Setup, 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2016.
- [17] T. Zhang, L. Du, J. J. Lv, B. Zhou, Y. Yang, X. Y. Zhou, X. Cheng, J. Pei ve T. J. Cui, A Simple System for Measuring Antenna Radiation Patterns in the Wi-Fi Band, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 55 (1), 191-202, 2013.
- [18] C. Fontá, F. R. Varela, A. Arboleja ve E. Martinez-De-Rioja, Robotic Arm-Based Antenna Measurement System, 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI), Firenze, Italy, 2024.
- [19] N. İl, K. Ateş and Ş. Özen, Electromagnetic Field Exposure to Human Head Model with Various Metal Objects at Sub-6 GHz Frequencies, *Electromagnetic Biology and Medicine*. 42 (3), 114-122, 2023.
- [20] K. Ates, H.F. Carlak and S. Ozen, Dosimetry Analysis of the Magnetic Field of Underground Power Cables and Magnetic Field Mitigation Using an Electromagnetic Shielding Technique, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 28 (3), 1672-1682, 2022.
- [21] K. Ates, H.F. Carlak and S. Ozen, Magnetic Field Exposures due to Underground Power Cables: a Simulation Study, 2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'16). 2016.
- [22] M. Bedeloğlu, N. İl, K. Ateş and Ş. Özen, Measurement and Analysis of Electric and Magnetic Field Strength in Grid-Tied Photovoltaic Power System Components, *Radiation Protection Dosimetry*. 194 (1), 57-64, 2021.

MONITORING WETLAND TRANSFORMATIONS IN LAKE EBER OVER A DECADE USING REMOTE SENSING

UZAKTAN ALGILAMA KULLANILARAK EBER GÖLÜ'NDEKİ SULAK ALAN DÖNÜŞÜMLERİNİN ON YIL SÜRE İLE İZLENMESİ

Recep Uğur ACAR^{*1}  Enes ZENGİN² 

¹ Geological Engineering, Kütahya Dumlupınar University, Kütahya, Türkiye.

² Urban and Regional Planning, Kütahya Dumlupınar University, Kütahya, Türkiye.

ABSTRACT

Eber Lake, an important wetland located in the Akarçay closed basin in the Central Anatolia Region, has experienced significant drought-induced shrinkage. This study monitored and quantified the changes in wetland areas of Lake Eber from 2015 to 2024 using high-resolution Sentinel 2-A satellite imagery and the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). MNDWI was selected due to its superior performance in accurately characterizing wetland properties compared to alternative indices. An iterative analysis was conducted to determine the most appropriate threshold to distinguish between water and non-water areas, and the threshold values were validated using ground-based data. Our results reveal a striking contraction in the spatial extent of wetlands; the area decreased from 7,748 ha in 2015 to only 327 ha in 2024, indicating a decrease of approximately 96%. This significant loss highlights the profound impact of environmental factors such as prolonged droughts, increasing temperatures and changing precipitation patterns, and likely anthropogenic pressures. The integration of remote sensing and robust GIS methodologies in this study provides a detailed, temporally continuous record of wetland transformations, providing new insights into regional hydrological dynamics. The findings not only improve our understanding of the ongoing environmental changes in Lake Eber but also highlight the urgent need for sustainable management practices and conservation strategies to mitigate further degradation of this vital ecosystem.

Keywords: Lake Shrinkage, Modified Normalized Difference Water Index, Remote Sensing, Sentinel 2-A.

ÖZET

Orta Anadolu Bölgesi'ndeki Akarçay kapalı havzasında bulunan önemli bir sulak alan olan Eber Gölü, kuraklık kaynaklı önemli bir küçülme yaşamıştır. Bu çalışmada, 2015-2024 yılları arasında Eber Gölü'nün sulak alan alanlarındaki değişiklikler yüksek çözünürlüklü Sentinel 2-A uydu görüntüleri ve Değiştirilmiş Normalleştirilmiş Fark Su Endeksi (MNDWI) kullanılarak izlenmiş ve nicelikselsel olarak belirlenmiştir. MNDWI, alternatif endekslere kıyasla sulak alan özelliklerini doğru bir şekilde karakterize etmedeki üstün performansı nedeniyle seçilmiştir. Su ve su dışı alanlar arasında ayırım yapmak ve en uygun eşik değerini belirlemek amacıyla aşamalı bir analiz yürütülmüş ve eşik değerleri yer tabanlı veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Sonuçlarımız, sulak alanların mekansal kapsamında çarpıcı bir daralma olduğunu ortaya koymaktadır; alan 2015'teki 7.748 hektardan 2024'te sadece 327 hektara düşmüştür; bu da yaklaşık %96'lık bir azalmayı göstermektedir. Bu önemli kayıp, uzun süreli kuraklıklar, artan sıcaklıklar ve değişen yağış düzenleri ve muhtemel antropojenik baskılar gibi çevresel faktörlerin derin etkisini vurgulamaktadır. Bu çalışmada uzaktan algılama ve sağlam GIS metodolojilerinin entegrasyonu, sulak alan dönüşümlerinin ayrıntılı, zamansal olarak sürekli bir kaydını sunarak bölgesel hidrolojik dinamiklere dair yeni bulgular sağlar. Bulgular, yalnızca Eber Gölü'ndeki devam eden çevresel değişikliklere ilişkin anlayışımızı geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda bu hayati ekosistemin daha fazla bozulmasını azaltmak için sürdürülebilir yönetim uygulamalarına ve koruma stratejilerine olan acil ihtiyacı da vurgular.

Anahtar Kelimeler: Değiştirilmiş Normalleştirilmiş Fark Su Endeksi, Göl Küçülmesi, Sentinel 2-A, Uzaktan Algılama.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: ugur.acar@dpu.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi 03.02.2025	Revision Date Revizyon Tarihi 12.02.2025	Accepted Date Kabul Tarihi 21.02.2025	Published Date Yayın Tarihi 01.06.2025
---	--	---	--

1. INTRODUCTION

Water is essential for all living organisms to exist, function and survive [1], [2]. Lakes, defined in the surface water category, are one of the most critical water resources. In addition to their function as a vital water source, lakes are also of significant ecological value due to their high biodiversity [3], [4]. The phenomenon of global warming, in conjunction with the effects of human activity, such as the intensification of agricultural practices, which are subject to a perpetual rise in consequence of climate change, is exerting an ever-increasing degree of pressure on lakes and all other water resources throughout the world [5], [6], [7], [8]. Recently, the number of water resources facing various challenges, including drying up, shrinking, or even disappearing, has been increasing. These issues are attributable to climatic changes, rising water demand, and the impact of human activities in arid-semi-arid regions [9]. In many areas, the diminution or total loss of wetlands has resulted in biodiversity loss, economic difficulties and social problems [10]. The preservation of these resources and their transference to subsequent generations are of critical importance for the well-being of humanity. Lakes offer a variety of benefits, including the regulation of flooding and the storage of carbon. In addition to their role as a water source, they also serve numerous other functions. It is, therefore, imperative that measurements and observations are made for the sustainable management of water resources to ensure the future of our planet.

Remote sensing and geographic information systems technologies offer significant advantages in carrying out the requisite measurements and observations concerning drought and water resources [4], [11]. Satellite images and other remote sensing data allow the monitoring of large areas quickly and effectively. Remote sensing methods have proven to be quite valuable tools in the literature for analysing the change of lakes and wetlands over time, assessing the status of water resources, and determining the effects of drought. These tools facilitate the expeditious, precise, and cost-effective monitoring and evaluation of water resources compared to alternative land-based studies [12], [13], [14], [15].

Several remote sensing methodologies have been developed to detect water bodies. Among these, image classification and water indices are the most effective [12], [13], [16], [17]. Water indices are considered efficacious and accessible methods of detecting water bodies through remote sensing. Water indices consist of simple algorithms, including the normalised difference water index (NDWI) [12] and the modified normalised difference water index (MNDWI) [18], which are executed with spectral bands that consider the spectral characteristics of water with high reflectance in the visible region and low reflectance in the infrared region. Water indices, despite their primitive configuration and operating principles, can produce information with greater agility and precision compared to alternative methodologies [17].

Lake Eber is a vital wetland in the Central Anatolia Region of Türkiye. It is evident that the presence of the habitat in question significantly enriches the region's biodiversity. Moreover, the area provides numerous benefits to the local community, including the assurance of a reliable water supply, agricultural irrigation, and facilitating recreational activities. However, significant changes have been observed in the water level and wetland area of the lake due to climate change and human activities in recent years. These alterations have precipitated a state of imminent extinction for the lake, thereby jeopardising the local ecological equilibrium and the sustainability of the region's water resources. This study evaluates the change in the wetland area of Lake Eber over 10 years between 2015 and 2024. The methodology employed analysed Sentinel 2-A satellite imagery and Modified Normalised Difference Water Index (MNDWI) data. Sentinel 2-A satellites provide high-resolution, multi-spectral imagery, allowing precise mapping of wetlands. MNDWI is a reliable technique for differentiating water bodies from other surfaces by utilising the spectral characteristics of water. Utilising the data and methodology, the alterations in the wetland area of Lake Eber will be subject to continuous monitoring and analysis. The findings obtained will provide valuable information for understanding the dimensional change of the lake from past to present.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study Area

Lake Eber is a tectonic lake located in the Akarçay Closed Basin, approximately 70 km away from Afyonkarahisar province, and is categorised as a semi-circular lake according to Reeves (1968) (Figure 1) [18, 19]. The Akarçay Closed Basin is located at the intersection of Western Anatolia and Central Anatolia and is bounded by mountains in the south-eastern to north-western direction [19].

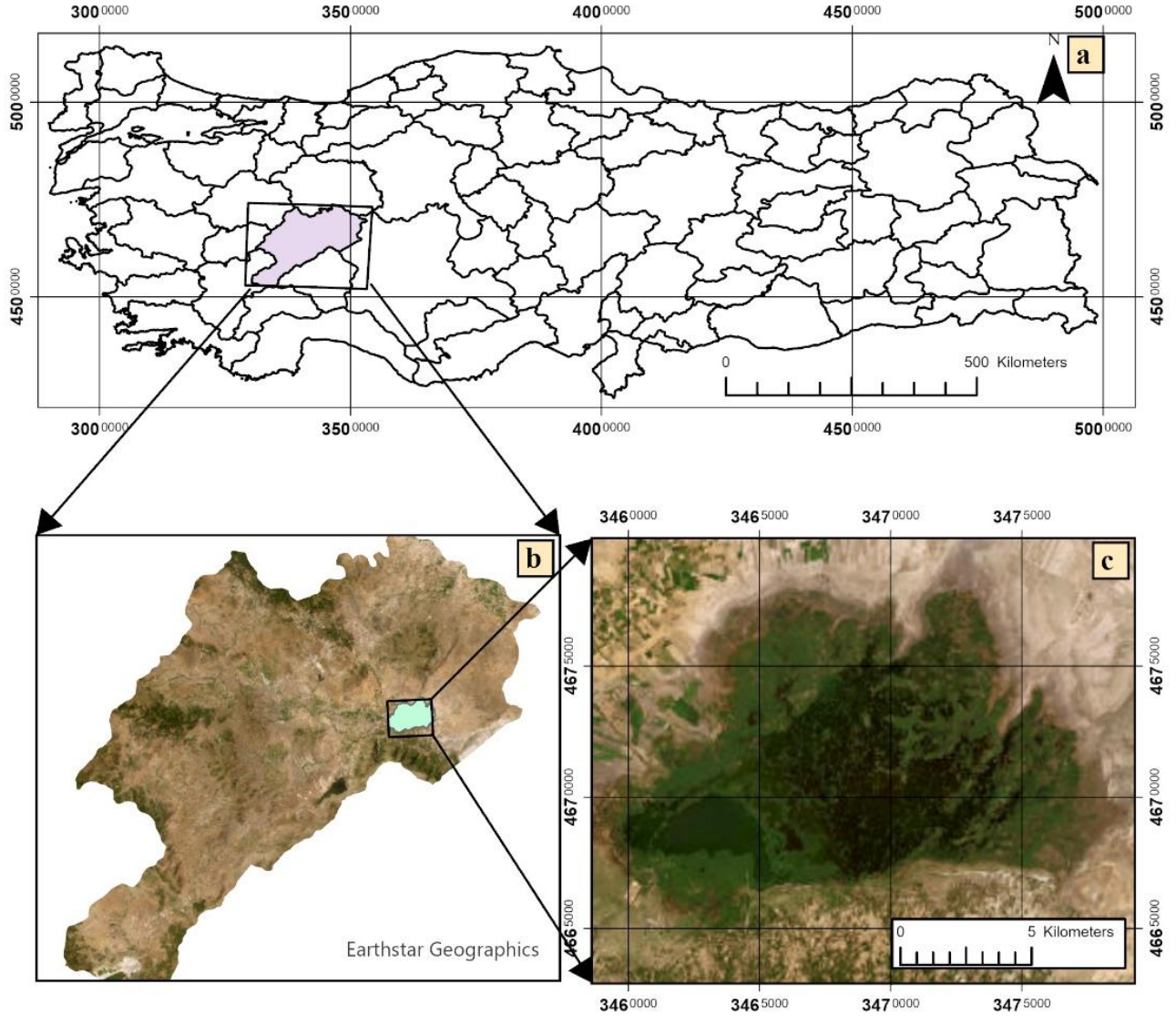


Figure 1. Location of the study area a) Türkiye and Afyonkarahisar, b) Afyonkarahisar and Lake Eber Location, c) Lake Eber Satellite Image.

2.2. Data Acquisition and Preprocessing

In this study, the temporal change of the wetlands of Lake Eber was examined using Sentinel 2-A satellite data from the Copernicus Open Access Centre of the European Space Agency (Table 1). The data set under scrutiny encompasses a 10-year period from 2015 to 2024, specifically focusing on the months of September. The selection of September as the study period is predicated on the fact that it marks the conclusion of the summer season, and the onset of precipitation has not yet commenced. Furthermore, images with less than 5% cloud cover were selected to minimise atmospheric effects.

Table 1. Date of satellite data used for the present study

Date of Acquisition (date/month/year)
05/09/2015
09/09/2016
04/09/2017
04/09/2018
09/09/2019
03/09/2020
08/09/2021
08/09/2022
18/09/2023
27/09/2024

The methodology of the present study is summarised in Figure 2. The Sentinel 2-A data acquired for this study were subjected to pre-processing using SNAP software. Initially, radiometric corrections were applied to remove atmospheric effects and convert the pixel values to actual surface reflectance. Given the differing spatial resolutions of the various spectral bands of the Sentinel 2-A satellite (Table 2), it is necessary to harmonise pixel sizes for multispectral analyses. To this end, resampling was performed for all 13 bands. Subsequently, Lake Eber subsetted the study area to reduce the data size and increase processing efficiency.

Table 2. Sentinel 2-A Bands and specifications

Band	Name	Spatial resolution (m)
1	Coastal Aerosol	60
2	Blue	10
3	Green	10
4	Red	10
5	Red Edge 1	20
6	Red Edge 2	20
7	Red Edge 3	20
8	Near-infrared	10
8A	Near-infrared	20
9	Water Vapour	60
10	Cirrus	60
11	Shortwave infrared	20
12	Shortwave infrared	20

The pre-processed images were transferred to ArcGIS Pro software in a format suitable for MNDWI calculations. Within the ArcGIS Pro framework, the delineation of lake wetlands was accomplished by calculating the MNDWI values for each year, followed by performing area calculations. This approach enabled the determination of the changes in the wetlands of Lake Eber over 10 years.

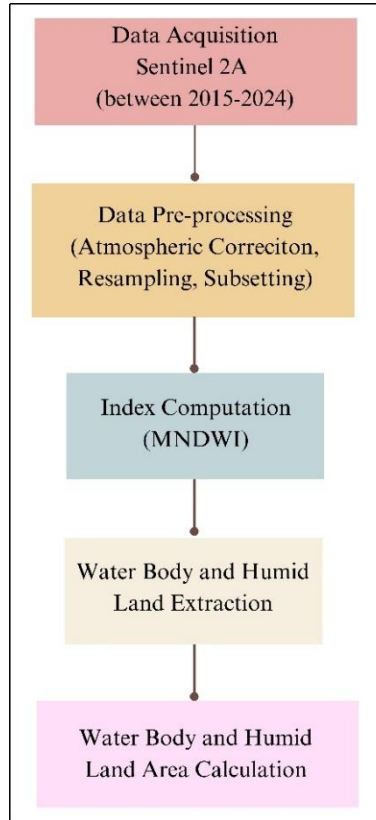


Figure 2. The following flowchart illustrates the general methodology employed in this study.

2.3. Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)

One of the standard methods used for determining water bodies in remote sensing is water indices produced from spectral bands. These indices can be easily calculated with simple algorithms. The Modified Normalised Difference Water Index is a vital water index developed based on the difference between the high reflectance properties of water in the green region and the low reflectance properties of water in the shortwave infrared region (Equation 1) [18].

$$MNDWI = \left(\frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} \right) \quad (1)$$

Here, 'Green' is used to denote the reflectance value of the green band, while 'SWIR' is employed to represent the reflectance value of the shortwave infrared band. MNDWI values range from -1 to +1, with positive values indicating water bodies. MNDWI values greater than 0 indicate wetlands or humid regions, while values closer to 1 are a stronger indicator of the presence of water. By contrast, other surfaces (e.g. vegetation, soil, buildings) exhibit negative or near-zero MNDWI values (Table 3). This attribute renders MNDWI a valuable instrument in diverse fields, including identifying and observing water bodies, wetland cartography, lake and reservoir surveillance, water resources management, flood and drought observation, and water quality evaluation.

Table 3. MNDWI Values and Interpretation

Ranges of Values	Meaning
0,2 - 1	Water bodies, streams and flood areas
0 - 0,2	Humid lands
0,3 - 0	Moderate drought and dry lands
-1 - 0,3	Drought and dry lands

3. RESULTS AND DISCUSSION

This study aimed to monitor and quantify changes in the wetlands of Lake Eber over a decade (2015–2024) using Sentinel 2-A satellite imagery and the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). The methodology consists of four key steps: Data Exploration and Preprocessing, Identification of Wetlands using MNDWI, Determination of the Optimal Threshold for Water-Land Classification, and Assessment of Boundary Shifts (Figure 3 and 4). MNDWI was chosen due to its proven superiority over other indices (e.g., NDWI) in accurately characterizing water properties, especially in heterogeneous and urban landscapes [18–22]. Moreover, its capacity to provide comprehensive open water data and detect temporal changes in water quality reinforces its suitability for this study. A critical component of our approach was to determine the optimal threshold value to distinguish water from non-water areas. To achieve this, we performed an iterative analysis of the histogram distribution of MNDWI values. We conducted these processes by testing a range of potential threshold values and then selecting the threshold value that minimized misclassification errors by validating these values with real data to assess the accuracy of our classification. This rigorous sensitivity analysis not only ensured the reliability of our water delimitation process but also provided an important methodological contribution by providing a replicable framework for similar studies in other regions. Our results show a significant decrease in the geographical extent of the wetlands of Lake Eber during the study period. In particular, the wetland area decreased from 7748 ha in 2015 to only 327 ha in 2024, representing a contraction of approximately 96% (Table 4). Although a small increase was observed in 2019 compared to 2018, the overall trend remains a persistent decline. This significant loss highlights the serious impact of both environmental and anthropogenic factors on the lake's ecosystem. This study is one of the first to apply such an integrated approach to Lake Eber by combining high-resolution Sentinel 2-A data with a robust application of the MNDWI method, providing a detailed, temporally continuous record of wetland transformations.

Table 4. Changes in the Eber Lake area over the years (hectare(ha)).

Year	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Wetland (ha)	7748	5464	4767	3615	3735	1644	399	707	843	327

Multiple factors are likely contributing to the observed shrinkage of Lake Eber. Climatic influences such as prolonged drought and increasing temperatures may accelerate water evaporation, thereby reducing the area of the lake. In parallel, anthropogenic activities are further straining the lake's water resources. These environmental changes not only threaten biodiversity by reducing habitat availability and altering water quality but also disrupt local food chains and may impact migratory bird populations that rely on the lake as a critical refuge. From a socio-economic perspective, the dramatic shrinkage of Lake Eber could have profound consequences for sectors such as agriculture and tourism. The findings highlight the urgent need for an integrated water management strategy that combines efficient water use, conservation efforts and pollution control measures. To address these challenges, a comprehensive analysis integrating hydrological, meteorological and ecological data is essential. Regular monitoring of groundwater levels, water use patterns and land use changes will be important to better elucidate the driving forces behind lake shrinkage.

4. CONCLUSION

In conclusion, this study comprehensively investigated the annual changes in Lake Eber, a major wetland in the Akarçay Basin of Türkiye, during the period 2015-2024. By integrating high-resolution Sentinel 2-A satellite data with Geographic Information System (GIS) tools and using the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), we developed a robust methodological framework to monitor changes in the lake's wetland boundaries. The process included detailed data exploration and preprocessing, precise water-land classification via iterative threshold determination (validated with real data), and subsequent assessment of boundary shifts.

Our findings reveal a striking decrease in the geographic extent of Lake Eber's wetlands, from 7748 hectares in 2015 to only 327 hectares in 2024, representing a decline of approximately 96% in a decade.

Although a slight increase was observed in 2019, the overall trend indicates a persistent and significant loss of wetlands. This decline highlights the serious impact of both environmental and anthropogenic factors on the lake ecosystem.

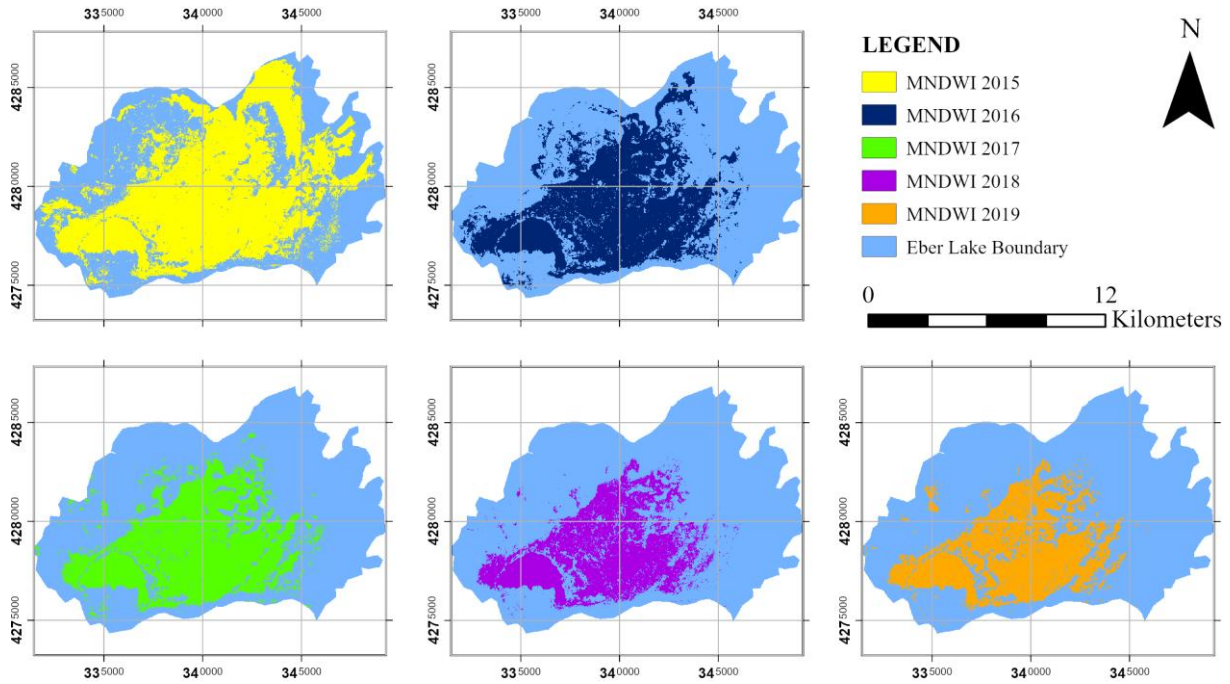


Figure 3. Distribution of wetland boundaries obtained using MNDWI (2015-2019)

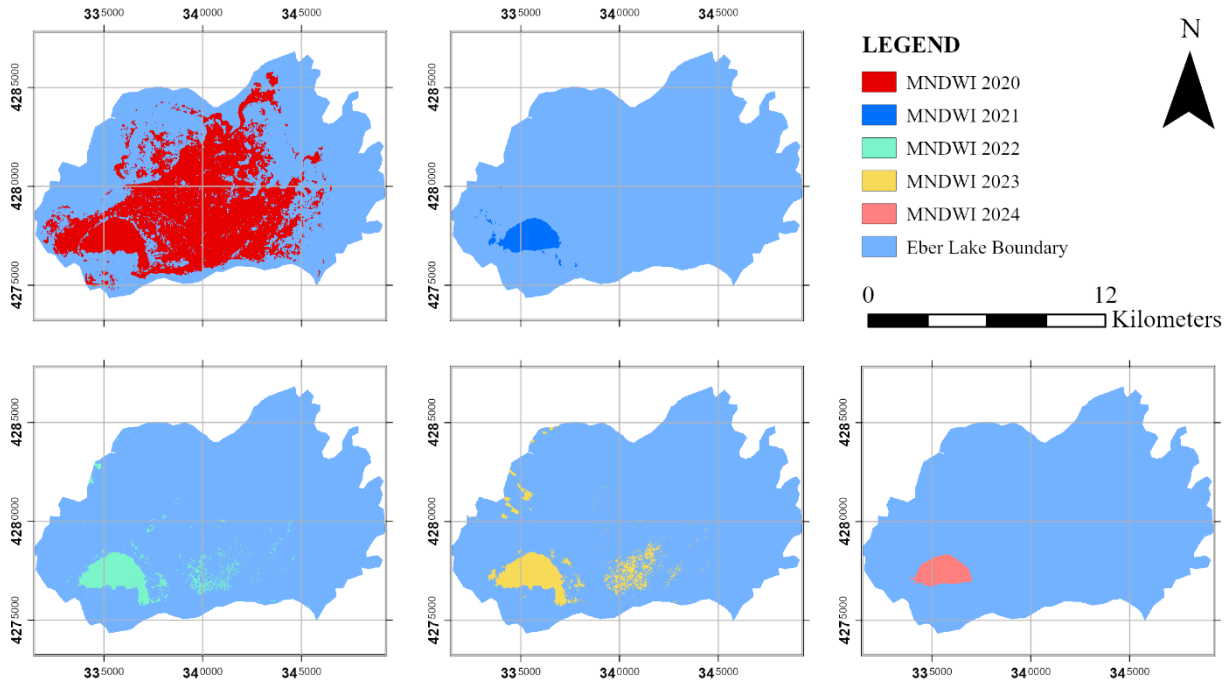


Figure 4. Distribution of wetland boundaries obtained using MNDWI (2020-2024).

Several important factors are likely contributing to this shrinkage. Climatic impacts such as prolonged droughts, rising temperatures and accelerated evaporation have undoubtedly played a significant role. In addition, erosion through human activities such as agricultural irrigation may have further accelerated the decline in water resources. These changes not only threaten biodiversity (through habitat loss and disruption of migratory bird patterns) but also create serious socioeconomic challenges for local communities dependent on agriculture, tourism and fisheries.

The study demonstrates the effectiveness of remote sensing and GIS tools as cost-effective and rapid methods for environmental monitoring. The innovative integration of high-resolution satellite imagery with a rigorous thresholding process using MNDWI provides a reproducible framework for future investigations of wetland dynamics. Moreover, this approach provides critical insights that can support the development of sustainable management practices and integrated water management strategies. As a result, the deep decline observed in Lake Eber serves as a striking reminder of the urgent need for comprehensive monitoring and conservation efforts. By combining hydrological, meteorological and ecological data, the drivers of wetland degradation can be better understood and reduced, ensuring the long-term protection of these vital ecosystems.

REFERENCES

- [1] K. Demirel and Y. Kavdır, "Effect of Soil Water Retention Barriers On Turfgrass Growth and Soil Water Content," *Irrig Sci*, Vol. 31, No. 4, Pp. 689–700, 201.
- [2] E. Özelkan, "Comparison of Remote Sensing Classification Techniques for Water Body Detection: A Case Study in Atikhisar Dam Lake (Çanakkale)," *Cumhuriyet Science Journal*, Vol. 40, No. 3, Pp. 650–661, 2019.
- [3] J. T. A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, And D. F. Whigham, Eds., *Wetlands and Natural Resource Management*, Vol. 190. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [4] Ü. Özaslan and E. Erdoğan Yüksel, "Determination of Land Change in the Susurluk Basin Kocaçay Delta Wetland Using Remote Sensing and Geographic Information Systems," *Journal of Bartın Faculty of Forestry*, 2024.
- [5] M. Akif Erdoğan, F. Sönmez and S. Berberoğlu, "Baraj Göllerinde Su Seviyelerinin Uzaktan Algılama ve CBS ile Tahmini ve İzlenmesi: Adana Seyhan Baraj Gölü Örneği," 5. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (UZAL-CBS 2014), İstanbul, Turkey, 2014.
- [6] M. E. Sönmez and M. Somuncu, "Evaluation of spatial change in the Sultan Marshes in sustainability," *Turkish Geographical Review*, Vol. 66, 1-10, 2016.
- [7] B. Chang, K.-N. He, R.-J. Li, Z.-P. Sheng, And H. Wang, "Linkage of Climatic Factors and Human Activities with Water Level Fluctuations in Qinghai Lake in The Northeastern Tibetan Plateau, China," *Water (Basel)*, Vol. 9, No. 7, P. 552, Jul. 2017.
- [8] İ. Dursun and A. A. Babalık, "Determining the Amount Of Soil Lost By Erosion By Using Geotextile In Different Land Use Types: A Case Study Of Karam Creek Sub-Basin," *Turkish Journal of Forest Science*, Vol. 7, No. 2, Pp. 138–154, 2023.
- [9] L. M. Kiage and P. Douglas, "Linkages Between Land Cover Change, Lake Shrinkage, And Sublacustrine Influence Determined from Remote Sensing of Select Rift Valley Lakes in Kenya," *Science of The Total Environment*, Vol. 709, P. 136022, 2020.
- [10] B. M. Jones, G. Grosse, L. M. Farquharson, P. Roy-Léveillé, A. Veremeeva, M. Z. Kanevskiy, B. V. Gaglioti, A. L. Breen, A. D. Parsekian, M. Ulrich and K. M. Hinkel, "Lake and Drained Lake Basin Systems in Lowland Permafrost Regions," *Nat Rev Earth Environ*, Vol. 3, No. 1, Pp. 85–98, 2022.
- [11] Y. Bao and X. Zhang, "The Study of Lakes Dynamic Change Based on Rs and Gis –Take Dalinuoer Lake as An Example," *Procedia Environ Sci*, Vol. 10, Pp—2376–2384, 2011.
- [12] S. K. Mcfeeters, "The Use of The Normalized Difference Water Index (NdwI) In the Delineation of Open Water Features," *Int J Remote Sens*, Vol. 17, No. 7, Pp. 1425–1432, 1996.
- [13] H. Xu, "Modification of Normalised Difference Water Index (NdwI) To Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery," *Int J Remote Sens*, Vol. 27, No. 14, Pp. 3025–3033, 2006.
- [14] M. Karaman, E. Özelkan, And S. Taşdelen, "Influence of Basin Hydrogeology in the Detectability of Narrow Rivers by Sentinel2-A Satellite Images: A Case Study in Karamenderes (Çanakkale)," *Journal of Natural Hazards and Environment*, Vol. 4, No. 2, Pp. 140–155, 2018.

-
- [15] S. Kale and D. Acarlı, "Spatial and Temporal Change Monitoring in Water Surface Area Of Atikhisar Reservoir (Çanakkale, Turkey) By Using Remote Sensing And Geographic Information System Techniques," *Alinteri Journal of Agriculture Science*, Vol. 34, No. 1, Pp. 47–56, 2019.
- [16] L. Ji, L. Zhang, And B. Wylie, "Analysis of Dynamic Thresholds for The Normalized Difference Water Index," *Photogramm Eng Remote Sensing*, Vol. 75, No. 11, Pp. 1307–1317, 2009.
- [17] Y. Du, L. Linglin, T. Liqiao, L. Feng, W. Hailei, G. Yuanmiao, S. Zhongmin. "Analysis of Landsat-8 Oli Imagery for Land Surface Water Mapping," *Remote Sensing Letters*, Vol. 5, No. 7, Pp. 672–681, 2014.
- [18] W. T. Edmondson, "Reeves, C. C., Jr. 1968. Introduction To Paleolimnology. Developments In Sedimentology No. 11. American Elsevier, New York. 228 P. \$18.00.," *Limnol Oceanogr*, Vol. 14, No. 4, Pp. 650–651, 1969.
- [19] M. M. Köle, M. Ataol, and T. Erkal, "Spatial Changes of Eber and Akşehir Lakes Between 1990 And 2016," In *International Geography Symposium*, Ankara: Tücaum, 2016.
- [20] M. Ichsan Ali, G. Darma Dirawan, A. Hafid Hasim, And M. Rais Abidin, "Detection of Changes in Surface Water Bodies Urban Area with Ndwi and Mndwi Methods," Vol. 9, No. 3, 2019.
- [21] H. Dibs, "Comparison of Derived Indices and Unsupervised Classification for Al-Razaza Lake Dehydration Extent Using Multi-Temporal Satellite Data and Remote Sensing Analysis," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 13, Pp. 1–8, 2018.
- [22] S. Szabó, Z. Gácsi, And B. Balázs, "Specific Features of Ndvi, Ndwi and Mndwi as Reflected in Land Cover Categories," *Landscape & Environment*, Vol. 10, No. 3–4, Pp. 194–202, 2016.



UŞAK-ULUBEY KANYONU MİYOSEN ÇÖKELLERİNİN DEPOLANMA ORTAMI ÖZELLİKLERİ

DEPOSITIONAL ENVIRONMENT CHARACTERISTICS OF THE MIOCENE DEPOSITS OF UŞAK-ULUBEY CANYON

Meryem KABAK^{1,2} Erdal KOŞUN^{*2}

¹ Ulukışla Altın Madeni, Uşak, Türkiye.

² Jeoloji Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye.

ABSTRACT

This study aims to investigate the environmental, mineralogical, petrographic and geochemical properties of the units consisting of Middle-Upper Miocene sedimentary deposits of the Uşak-Ulubey Canyon within the borders of Uşak province in Western Anatolia. The Uşak-Ulubey Canyon is approximately 85 km long including the main and side branches in Uşak province, its width varies between 100-1200 meters, and its depth generally varies between 100-250 meters and reaches up to 300 meters at some points. Tectonic, sedimentary and geomorphological processes have been effective in the formation process of this canyon. Limestone, mudstone and paleosol samples were collected for analysis from different elevation levels of Uşak-Ulubey Canyon. Accordingly petrographic analyses, limestones have been defined as fossiliferous limestone, Sparitic limestone, Micritic limestone, Intraclastic limestone, Micrite, mudstone, Biomicrite, Fossilized micrite, Wackestone. As a result of XRD analysis, illite, smectite, kaolinite, montmorillonite minerals were detected in mudstones. As a result of trace element analysis in paleosol samples Ni were detected in high levels, Co, Cu, Pb were detected in low levels.

Keywords: Fluvial/Alluvial Geomorphology, Neogene Basin, Sedimentary Environment, Uşak-Ulubey Canyon.

ÖZET

Bu çalışma, Batı Anadolu’da yer alan Uşak ili sınırları içindeki Uşak-Ulubey Kanyonu’nun kazdığı Orta-Üst Miyosen yaşlı sedimanter çökellerin ortamsal, mineralojik petrografik ve jeokimyasal özelliklerini incelemeyi amaçlamaktadır. Uşak-Ulubey Kanyonu Uşak ilinde, ana ve yan kollar dahil yaklaşık 85 km uzunluğunda olup, genişliği 100-1200 metre, derinliği genellikle 100-250 metre arasında değişip, bazı noktalarında 300 metreye kadar ulaşmaktadır. Bu kanyonun oluşum sürecinde tektonik, sedimanter ve jeomorfolojik süreçler etkili olmuştur. Uşak-Ulubey Kanyonu’nun farklı yükseklik seviyelerinden analiz yapmak üzere kireçtaşı, çamurtaşı ve paleosol örnekleri toplanmıştır. Petrografik analizlere göre kireçtaşları fosilli kireçtaşı, sparitik kireçtaşı, mikritik kireçtaşı, intraklastik kireçtaşı, mikrit, çamurtaşı, biyomikrit, fosilli mikrit, vaketaşı olarak tanımlanmıştır. XRD analizleri sonucunda çamurtaşlarında İllit, Smektit, Kaolinit, Montmorillonit mineralleri tespit edilmiştir. Paleosol örneklerinin eser element analizleri sonucunda Ni yüksek oranlarda, Co, Cu, Pb düşük oranlarda tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: : Flüvyal/Alüvyal Jeomorfoloji, Neojen Havza, Sedimanter Ortam, Uşak-Ulubey Kanyonu.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: kosun@akdeniz.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
05.02.2025	13.02.2025	21.02.2025	01.06.2025

1.1. Bölgesel Jeoloji

Türkiye'nin zaten oldukça karmaşık olan jeolojik yapısı içerisinde kanyon ve benzeri oluşumların geçirdiği jeolojik süreçleri anlamak için Türkiye'nin tektonik hareketlerini ve bu hareketlerin jeolojik sonuçlarını anlamak önemlidir. Orta Miyosen'de Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı boyunca Anadolu levhası ile Arap Levhası'nın çarpışması ile Anadolu'da neotektonik dönem başlar ve Doğu Anadolu bölgesi sıkışma etkisiyle yükselme rejimi gösterirken, Anadolu levhası sağ yönlü doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve sol yanallı doğrultu atımlı Doğu Anadolu fayı (DAF) boyunca batıya doğru hareket etmeye başlar [2]. Bu batıya doğru olan hareketin yönünün, güneybatı yönünde değişmesi sonucu Batı Anadolu'da K-G yönlü gerilme rejimi gelişir. Bu hareketlere bağlı olarak da D-B yönlü grabenler, KD-GB havzaları, KB-GD havzaları ve graben fayları gelişir. Yine Afrika Levhasının kuzeye hareketi, Anadolu Levhasının güneybatıya hareketinin sonucu olarak Afrika Levhası Anadolu Levhası altına Helenik (Ege) Yayı boyunca dalar. Ege-Anadolu kıtasal kabuğu bu dalma batmayla yükselir ve horst-graben sistemleri oluşur [2-4]. Batı Anadolu'da yaşanan bu tektonik olaylar bölgede yaşanan volkanik aktiviteyi, tortul kayaçların oluşum ve gelişim süreçlerini büyük oranda etkilemiştir ve Anadolu'nun günümüzde var olan topografyasını şekillendirmiştir.

Çalışma alanı da bu bölgesel tektonik çerçeve içerisinde, Anatolitler'in bir bölümünü oluşturan Menderes Masifi metamorfikleri üzerindedir [5]. Çalışma alanında yüzeylenmemekle birlikte havzada en yaşlı litoloji Pre-kambriyen dönemine ait Menderes Masifi metamorfik birimlerini içermektedir [1].

Yüksek magnezyum içeriğine sahip mantodan türemiş ultrapotasik kayaçlar, İzmir-Ankara-Erzincan Sütür Zonu boyunca, Menderes Masifi, Afyon Zonu ve Likya Napları'nda yer alır. Bu kayaçlar, volkanların farklı bileşenleri olan koniler, lav akıntıları ve plug oluşumlarında görülmekte olup, ayrıca Neojen ve Paleojen dönemindeki genişleme süreçleriyle ilişkili sedimanter formasyonlarda da gözlenmektedir [6-8].

Alçıcek [9] tarafından yapılan çalışma, Denizli Neojen havzasının sedimanter fasiyeslerini, çökme ortamlarını ve jeomorfolojik gelişimini incelerken, Büyük Menderes Grabeni'nin jeolojik evriminin anlaşılmasında önemli bir kaynak sunar. Bu çalışma, grabenin oluşumunun ve çökmesinin, bölgedeki sedimanter tabakaların karakteristiğini ve dağılımını nasıl etkilediğini anlatır. Pamukkale Fay Zonu'na ait fayların ise KB-GD doğrultulu olduğu bilinir. Bu faylar Kuvaterner yaşlıdır ve çoğunlukla eğim atımlı normal fay karakterindedirler [10].

Allen [11] ile Altunel ve Hancock [12], aktif tektonik hareketler ve bunların yüzey morfolojisi üzerindeki etkileri üzerine yaptıkları çalışmalarla, graben oluşumunun sismik aktivite açısından değerlendirilmesine katkıda bulunurlar. Özellikle, Altunel ve Hancock'un [12] Pamukkale'deki güncel çatlamlar ve Kuvaterner travertenler üzerine yaptıkları çalışma, graben oluşumunun ve genişlemenin, yüzeydeki traverten gibi çökme ürünlerinin dağılımı ve morfolojisi üzerinde doğrudan etkileri olduğunu gösterir. Grabenin çökmesiyle birlikte, Uşak-Ulubey Kanyonu boyunca artan erozyon oranları ve sediman taşınımı, kanyonun derinleşmesini ve genişlemesini hızlandırmıştır. Ayrıca, graben sonucu oluşan yer kabuğu deformasyonları, kanyonun morfolojik özelliklerinde değişikliklere yol açmıştır. Aktif tektonik hareketler, kanyon içerisindeki çatlakların ve çevresinde yer alan fay hatlarının ve çatlakların gelişimini de etkilemiştir. Ulubey Formasyonu olarak adlandırılan Orta-Üst Miyosen zaman aralığında çökeldiği bilinen bu görsel tortul kayaçlardan oluşan havzanın jeolojik geçmişini ve tektonik aktivitelerini araştırmak kanyon üzerindeki etkilerini anlamada önemli katkılar sağlar.

Altunel ve Hancock'un [13] araştırması, Pamukkale Platosu'nda bulunan travertenle dolu çatlakların, genişleyen tektonik rejimin bir sonucu olarak nasıl oluştuğunu göstermektedir, bu çatlaklar, levha hareketlerinin yol açtığı gerilme ve çekilme kuvvetlerinin doğrudan bir sonucudur. Altunel ve Hancock [13] bu çatlakların, traverten birikintileriyle dolu olmasının, sıcak su kaynaklarının ve hidrotermal aktivitenin de bu tektonik hareketlilikle ilişkili olduğunu gösterdiğini belirtir. Traverten birikintilerinin varlığı, bu çatlakların sadece tektonik aktiviteler tarafından oluşturulmadığını, aynı zamanda bölgesel hidrojeolojik dinamikler tarafından da şekillendirildiğini ortaya koyar.

Büyük Menderes grabeninin oluşumunun çevredeki Uşak-Ulubey Kanyonu gibi jeolojik yapılara olan etkileri, bölgesel tektonik hareketler ve sedimantasyon süreçlerinin birleşimini yansıtmaktadır [14].

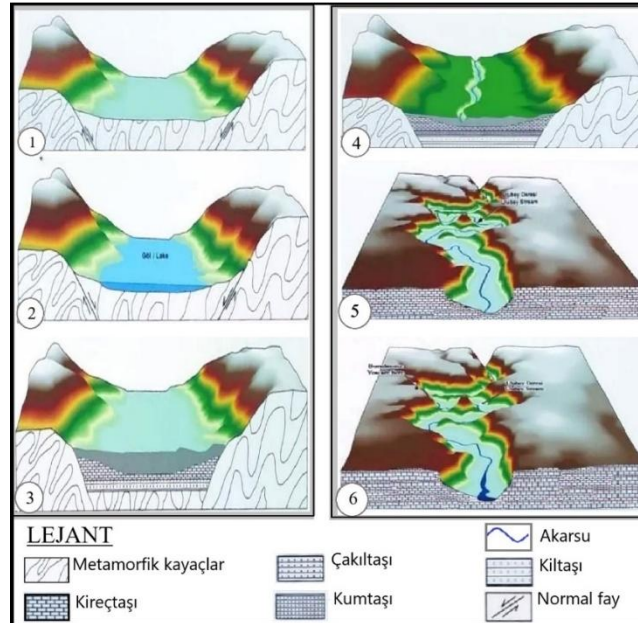
Cohen vd. [15] tarafından Gediz ve Menderes grabenlerinin yapısal gelişimi ve syn-rift sedimantasyonu üzerine yapılan çalışma, bu grabenlerin evriminde jeomorfolojik süreçlerin rolünü vurgular. Syn-rift, jeolojide tektonik olarak genişleyen bir bölgede, bir çöküntü veya graben sistemi oluşumu sırasında çökelmiş tortul kayaçlar için kullanılan bir terimdir. Riftleşme süreci, yer kabuğunun gerilme kuvvetleri altında genişleyip çatlamasıyla meydana gelir ve bu esnada oluşan grabenlerin içine tortullar dolar. Bu tortul kayaçlar, syn-rift çökeltileri olarak adlandırılır. Grabenlerin çökmesiyle ilişkili topografik değişiklikler, yerel erozyon süreçlerini ve sediman taşınımını etkileyerek, jeolojik jeomorfolojik yapıların oluşumuna katkıda bulunur. Sediman birikim hızları, erozyonla taşınan malzemenin bir bölgede ne kadar hızla biriktiğini ifade eder.

Crone ve Omdahl [16] tarafından geliştirilen paleosismoloji çalışmaları, geçmiş depremlerin jeomorfolojik yapılar üzerindeki etkilerini incelemek için önemli bir metodoloji sunar. Bu çalışmalar, depremlerin topografyayı nasıl değiştirebileceğini ve kanyon oluşum süreçlerini nasıl hızlandırabileceğini gösterir. Örneğin, depremler tarafından oluşturulan yüzey kırıkları, su akış yollarını değiştirebilir ve yeni erozyon alanları oluşturabilir, bu da kanyonların daha hızlı derinleşmesine yol açabilir.

Ambraseys [17] ise, Kuzey Anadolu fay zonunun genel karakteristik özelliklerine odaklanarak, Büyük Menderes Grabeni'nin sismotektonik bağlamını geniş bir perspektiften ele alır. Ambraseys'in çalışması, fay zonunun uzanımı boyunca ne tür sismik özellikler sergilediğini ve bu özelliklerin bölgesel tektonik hareketlerle nasıl ilişkilendirilebileceğini açıklar [17].

1.2. Uşak-Ulubey Kanyonu'nun Jeolojik Evrimi

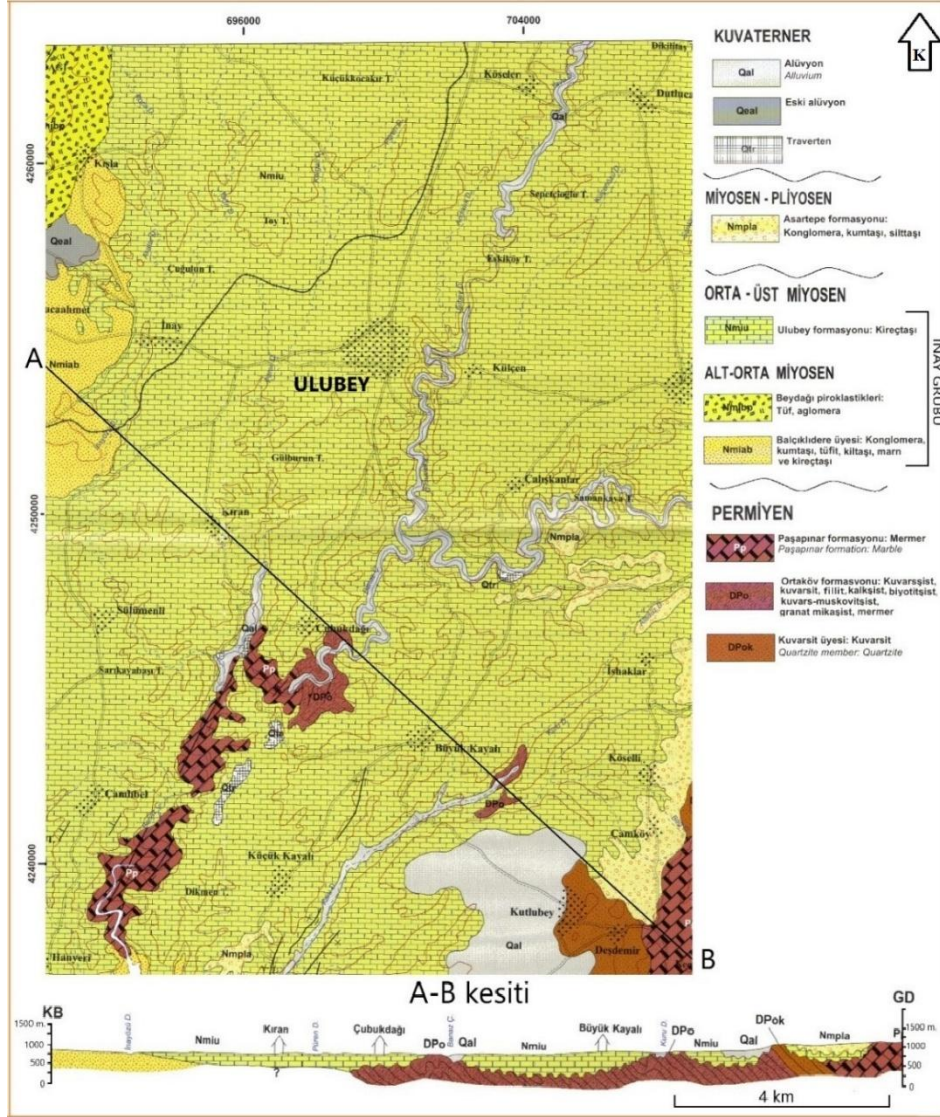
Atalay vd. [18] ve Çukur [19] tarafından yapılan çalışmalarda, Uşak-Ulubey Kanyonu'nun oluşumundaki neotektonik hareketlerin rolü detaylı bir şekilde incelenmiştir (Şekil 2). Bu çalışma, kanyonun Neojen dönemden günümüze kadar süregelen tektonik hareketler sonucu nasıl şekillendiğini ele alır. Yapılan çalışmalar [18, 19], tektonik aktivitelerin, kanyonun derinliği, genişliği ve genel jeolojik ve jeomorfolojik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu vurgular. Tektonik hareketlerin bu etkisi, yer kabuğunun kırılma ve kıvrılma hızlarına dayalı olarak modellenenebilir ve bu hızlar km/my cinsinden ifade edilir. Bu bilimsel yaklaşım, kanyonun evrimini ve tektonik aktivitenin jeolojik ve jeomorfolojik değişim üzerindeki etkilerini kantitatif olarak değerlendirmemize olanak tanır.



Şekil 2. Uşak-Ulubey Kanyonlarının Oluşum Aşamaları; (1) 25 My önce Neojen Öncesi Faylanma Hareketleri ile Havzanın Çökmeye Başlaması, (2) Neojen Gölü Çökelme Dönemi, (3) Orta-Üst Miyosen Gölsel Kireçtaşlarının Çökelme Dönemi, (4) Göl Çökelleri Üzerinde Akarsu Ağının Oluşması, (5) Ulubey Dokuz Sele Deresi'nde Ege Karasının Çökmesi ile Kanyon Gelişimi, (6) Uşak-Ulubey Kanyonu'nun Günümüzdeki Hali (Çukur'dan [19] değiştirilmiştir)

1.3. Stratigrafi

Çalışma alanının jeoloji haritası çizilirken ve stratigrafisi belirlenirken 1/100.000 ölçekli MTA haritaları ve raporlarından [10] yararlanılmıştır. Buna göre bölgede, Pre-Kambriyenden günümüze kadar değişen yaşlara sahip birçok birim yer almaktadır. Bu birimler 2 başlık altında detaylandırılmıştır; Neojen öncesine yaşılandırılan temel birimler ve Senozoyik yaşlı örtü birimleri. Bu birimlerin çalışma alanı içerisindeki konumlarını gösteren jeoloji haritası ve gerçekleştirilen arazi çalışmaları ile oluşturulmuş A – B enine jeolojik kesiti Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Uşak-Ulubey Kanyonu Civarının Jeoloji Haritası ve Kanyonu Yaklaşık Dik Yönde Kesen Enine Jeolojik Kesit [10]

Tuncay ve Bozkurt [10]’a göre, çalışma alanı ve yakın çevresinde görülen temele ait birimler; Menderes Masifi’ne ait birimler, Likya Napları’na ait Marmaris Ofiyolit Napı ve Bodrum Napı’na ait birimlerdir. Uşak-Denizli arasında kalan havzada yer alan Senozoyik yaşlı çökeller ve volkanitler ise örtü birimlerini temsil etmektedir.

Menderes Masifi’ne ait birimlerden Pre-kambriyen yaşlı Dolaylar metagraniti tabanda yer alır. Metagranitin üzerine Geç Devoniyen-Permo-Karbonifer yaşlı Ortaköy formasyonu (Kuvarisit ve Mermer üyesi) uyumsuzlukla gelir. Menderes Masifi birimlerinin üzerinde tektonik dokanakla Bodrum Napı’na ait birimler bulunmaktadır. Bodrum Napı, altta Erken-Orta Triyas yaşlı Karaova formasyonu ve üzerinde uyumlu olarak görülen Geç Triyas-Kretase yaşlı Çökelez kireçtaşı ile temsil edilir. Menderes

Masifi ve Bodrum Napı'na ait birimler üzerinde Marmaris Ofiyolit Napı'na ait Kızılcadağ melanj veolistostromu, tektonik dokanaklıdır [10]. Oligosen yaşlı Çardak formasyonunun Hayrettin üyesi, kendisinden yaşlı birimler üzerine uyumsuz olarak gelmektedir. Birimin İnay Grubu ile ilişkisi çalışma alanında gözlenememiştir, uyumsuz olduğu varsayılmaktadır [10].

Ahmetler formasyonu, gölsel kireçtaşlarından oluşan Orta-Geç Miyosen yaşlı Ulubey formasyonunun alt düzeyleri ile de yer yer giriktir. Alüvyon yelpazesi çökelleri şeklinde gelişen Asartepe formasyonu Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı olup, yine Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı olan Çameli formasyonunun Akarca üyesi ile yanalda ve düşeyde geçişli şekilde yer alır. Bölgede Kuvaterner çökelleri; Traverten, Eski alüvyon, Yamaç molozu, Alüvyon yelpazesi ve Alüvyon şeklinde yer almaktadır [19].

1.3.1. Neojen Öncesi Temel Birimler

Bu başlık altında Menderes Masifi'nin temelini oluşturan Pre-kambriyen yaşlı ve metagranitlerden oluşan Dolaylar metagraniti; Geç Devoniyen-Permo-Karbonifer yaşlı Ortaköy formasyonu; bu formasyonla geçişli olarak gözlenen mermerlerden oluşan Permien yaşlı Paşapınar formasyonu; bu formasyon üzerine uyumsuz şekilde yer alan geç Permien-Triyas yaşlı Karahallı formasyonu; bu formasyon üzerinde geçişli olarak yer alan Jura-Kretase yaşlı Bükrüce formasyonu; Bükrüce formasyonu üzerinde geçişli olarak yer alan Kretase yaşlı Gömce formasyonu; yine bu formasyonla geçişli olarak yer alan Paleosen-Erken Eosen yaşlı Şalvan formasyonu birimleri Neojen öncesi temel birimler olarak yer alır [19].

1.3.2. Senozoyik Örtü Birimleri

Denizli'nin doğusunda Denizli-M22 paftasının kuzey kesimlerinde ve Acıgöl çevresinde yüzeylemiş olan Oligosen yaşlı Çardak Formasyonu; çakıltası, kumtaşı, çamurtaşı ve kireçtaşından oluşur, yanal ve düşey yönde geçişli ve istif içinde pek çok kez ardalanmış kayaç topluluğuna sahiptir. Bu birimler Acıgöl kuzeyinde Acıgöl grubu [20], Acıgöl güneyinde ise Çambaşı formasyonu olarak adlandırılmıştır [21]. Acıgöl grubu Göktaş vd. [20] tarafından Armutalan, Çardak, Hayrettin, Tokça ve Bozdağ olmak üzere beş formasyon halinde incelenmiştir. Denizli-M22 paftasının kuzey kesimlerinde geniş alanlarda yüzeylenen, Acıgöl grubu içinde tanımlanan Hayrettin üyesi başlıca kumtaşı ve çamurtaşının baskın olduğu ve bunların ara katmanlarında ince tabakalı kumtaşı, çamurtaşı, silttaşı ardalanması seviyelerinin yer aldığı, kumtaşı-çamurtaşı ardalanmasından oluşur.

Kızılcadağ melanjı ve olistostromu üzerinde uyumsuz olarak yer alan Hayrettin üyesi birimini, Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı Çardak Formasyonunun Akarca üyesi yine uyumsuz olarak örtmektedir. Birim içerisinden planktonik ve bentik foraminifer faunası elde edilmiş ve fosil topluluğuna göre Hayrettin üyesinin yaşı Oligosen (Rupeliyen) olarak tespit edilmiştir [22].

İnay grubu, çalışma alanında, en altta akarsu ve göl ortamını temsil eden Ahmetler formasyonu ve bunun üzerinde gölsel karbonatlardan oluşan Ulubey formasyonu ile temsil edilir. Ayrıca bu çökellerle girik Beydağı volkanitlerinden oluşur.

1.3.2.1. Ahmetler Formasyonu (Nmia)

Erken-Orta Miyosen yaşlı Ahmetler formasyonu Ercan vd. [23] tarafından 3 üyeye ayrılmıştır. Bu üyeler aşağıdan yukarıya sırasıyla sellenme ve kaymalar ile moloz akması çökellerinden oluşan Merdivenlikuyu üyesi, konglomera, kumtaşı, tüfit, kıltaşı, marn ve kireçtaşları ve akarsu çökellerinden oluşan Balçıklıdere üyesi ve silttaşı, kıltaşı, tüfitlerden oluşan gölsel karakterdeki gölsel ortamı yansıtan Gedikler üyesi şeklindedir. Akarsu ortamını yansıtan Balçıklıdere çökellerinin üzerine gölsel ortam özelliklerini yansıtan Gedikler üyesinin gelmesi bize bu dönemlerdeki geçiş hakkında bilgi vermektedir.

Ercan vd. [23] tarafından yamaç molozu olarak tanımlanan üye, Merdivenlikuyu Mahallesi çevresinde, Alıçlı köyü batısında bulunur adını L22-a1 paftasındaki Merdivenlikuyu Mahallesi'nden alır. Ahmetler formasyonunun tabanında yer alan üye en çok 50-60 m kalınlıkta olup genellikle metamorfik birimlerin köşeli çakıl ve bloklarını içermektedir, düzgün bir katmanlanma göstermez ve fosil de içermez. Çalışma alanında metamorfik birimler üzerinde uyumsuz olarak görülen birim Balçıklıdere üyesi ile yanal ve düşey geçişlidir (Şekil 4). Masif kenarlarında gelişmiş aşırı sellenmeden kaynaklanan ve çekim kaymaları yolu ile oluşan moloz akması çökelleridir. [10].

ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ	GRUP	FORMASYON	ÜYE	SİMGE	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
SENOZOYİK	KUVATENER	NEOJEN	GRUP	Eski alüvyon Yamaç molozu Traverten Alüvyon		Qeal @ Qym @ Qtr @ Qal @		@ Eski alüvyon @ Yamaç molozu @ Traverten @ Alüvyon
				Çameli Asartepe	Akarca	Nmipa Nmpla		Uyumsuzluk Konglomera, kumtaşı, silttaşı Uyumsuzluk
				Ulubey		Nmiu		Kireçtaşı Si : Silis
				Beydağı Volkanitleri		Nmib @ Nmibp @		@ Andezit, trakiandezit, riolit, dasit, riyodasit @ Tüf, aglomera
	MIYOSEN	ORTA	ÜST	Ahmetler	Gedikler	Nmiag @		@ Silttaşı, kilttaşı, tüfit
					Balçıklıdere	Nmiab @		@ Konglomera, kumtaşı, tüfit, kilttaşı, marn ve kireçtaşı
					Merdivenlikuyu	Nmiam @		@ Tutturulmamış blok ve çakıl
								Uyumsuzluk (?)
	PALEOJEN	OLİGOSEN	ALT	Çardak	Hayrettin	Pgoç		Çakilttaşı, kumtaşı, silttaşı, kilttaşı
								ölçeksiz

Şekil 4. Uşak-L22 Paftasında Senozoyik Birimlerine ait Genelleştirilmiş Stratigrafik Dikme Kesit [10]

Konglomera-kumtaşı-tüfit-kilttaşı-marn ve kireçtaşı ardalı olarak gözlendiği birim Ercan vd. [23] tarafından Balçıklıdere üyesi olarak adlandırılmıştır. Adını L22-a2 paftasındaki Balçıklıdere'den almıştır. Kuzeyde Kışla köyü ile Narlı ve Kayalı köyleri arasında kalan alanda ve Adıgüzel Barajı çevresinde ve güney kesimlerde mostraları gözlendiği birim genellikle beyaz, açık gri, açık sarı, açık mavi, açık yeşil renklerde, konglomera-kumtaşı-tüfit-kilttaşı-marn ve kireçtaşı ardalı olarak gözlendir. Yatay ve yataya yakın katmanlıdır. Çapraz katmanlanma ve laminalanma, oygu-dolgu yapıları, kuruma çatlakları ve sürüklenme izleri ve benzeri yapılar yer yer görülüp alttaki düzeylerde çakılların tane boylarının daha iri olduğu üst düzeylere gidildikçe tane boylarının küçüldüğü, birimin alt düzeylerinde ise genellikle kaba taneli detritiklerin bulunduğu görülür. Temelde bulunan daha yaşlı birimlerin aşınmaları ile oluşan birim, havzadaki çukur yerlerde akarsu ortamında çökelmiştir. Balçıklıdere üyesi içinde ince tüfit düzeyleri de bulunur [10]. Bölgede Balçıklıdere üyesi çökelleri akarsu ortamında çökelirken, volkanizma püskürmelerinin (Beydağı volkanitleri) başladığı için kül ve lapilli parçaları da yer yer akarsularla taşınarak uygun yerlerde tüfit düzeylerini oluşturmuştur.

Balçıklıdere üyesinin konglomera düzeyleri yer yer demir oksitli sularla da yıkanmış bu nedenle kızıl renk almıştır. Balçıklıdere üyesi, metamorfiklerin yanı sıra, Miyosen çökel ve volkanitlerinden de malzeme aldığı yerlerde polijenik konglomera-kumtaşı-tüfit-silttaşı-kilttaşı-marn-kireçtaşı ardalı olarak gözlendiği ve gri, beyaz, açık sarı renklerde gözlendirler, bütün katmanları yatay ve yataya yakın olup en çok 15° eğim gösteren birim akarsu ortam ürünü olup, en çok 200 m kalınlık sunar, çalışma alanında metamorfik birimler üzerinde uyumsuz olarak gözlendir, Ulubey formasyonu ile yanal ve düşeyde geçişlidir [23].

Çalışma alanı dışında ve alanın güneybatısında yer alan Haytabey köyü (L22-d4) çevresinde Saraç [24] ve Güney ilçesi (L22-d4) güneyinde Erten vd. [25] tarafından yapılan çalışmalarda üyenin eşleniği olarak kabul edilen birimlerden, memeli fosillerine göre orta Miyosen yaşı elde etmişlerdir. Balçıklıdere üyesinin yaşı bu çalışmada, stratigrafik konumu ve önceki çalışmacıların üyeyle girik konumdaki Beydağı volkanitlerinden elde ettikleri 17-12 My arasında değişen radyometrik yaş verileri dikkate alınarak Erken-Orta Miyosen olarak kabul edilmiştir.

Adını L22-a1 paftasındaki Gedikler köyünden alan ve çalışma alanı dışında ve alanın batısında yer alan Gedikler ve Ahmetler köyü çevresinde mostraları gözlendiği, silttaşı, kilttaşı ve tüfit ardalı olarak gözlendiği birim

çökelen, litolojik olarak açık sarı, açık yeşil ve gri renkli silttaşı, kiltası ve tüfit aralanmaları şeklinde yer alan üye, ilk kez Ercan vd. [23] tarafından adlandırılmıştır. Üye yer yer jips mercekleri içermektedir. Ayrıca Beydağı volkanitlerinin lapilli ve kül malzemeleri Gedikler üyesi birimleri içinde ince tüfit düzeyleri oluşturmuştur. Gedikler üyesini oluşturan silttaşı-kiltası ve tüfit düzeyleri, ince, düzgün ve aralanmalar gösteren tabakalar şeklindedir. Tabakaların eğimi yatay veya yataya çok yakındır. Birim, Balçıklıdere üyesini oluşturan çökeller ile yanal ve düşeyde geçişli olarak gözlenir. Gölsel kireçtaşlarından oluşan Ulubey formasyonu ile de yanal ve düşey geçişlidir.

Gedikler üyesinin en çok 60 m kalınlıkta olan çökelleri gölsel ortamda oluşmuşlardır. Bitümlü şeyller, yersel kolemanit oluşumları ve düzgün katmanlaşmalar gölsel ortamda çökeldiğini anlamamızı sağlar. Karada da etkin olan Beydağı volkanitlerinin kül ve lapilli parçaları taşınarak göl içinde tüfit düzeylerini oluşturmuştur. Gedikler üyesinin yaşı bu çalışmada, stratigrafik konumu ve önceki çalışmacıların bu üyeyle girik konumdaki Beydağı volkanitlerinden elde ettikleri 17-12 My arasında değişen radyometrik yaş verileri dikkate alınarak Erken-Orta Miyosen olarak kabul edilmiştir [23].

1.3.2.2. Beydağı Volkanitleri (Nmib)

Erken-Orta Miyosen boyunca süren bir volkanizmayı temsil eden andezit, trakiandezit, riyolit, riyodasit, dasit, tuf ve aglomeralardan oluşan Beydağı volkanitleri; Ahmetler formasyonu ile yanal ve düşeyde geçişli gölsel kireçtaşlarından oluşan Orta-Geç Miyosen yaşlı Ulubey formasyonunun alt düzeylerine de yer yer nüfuz etmiştir. Adını L22-a1 paftasındaki Beydağı'ndan almıştır. Çalışma alanının kuzey kesiminde L22-a1 ve L22-a2 paftalarında Kışla, Gümüşkol, Gedikler, Kolonkaya köyleri çevresinde ve yine aynı paftalardaki Macar Dağı, Beydağı ve Kışla Dağı dolayında mostraları görülür.

Seyitoğlu [26] çalışmasında İtecek Tepe (K22) civarından aldığı örneklerde yaptığı radyometrik yaş tayiniyle (K-Ar) 14.06 My yaş verisiyle birimin yaşını Erken-Orta Miyosen olarak belirlemiştir.

1.3.2.3. Ulubey Formasyonu (Nmiu)

Gölsel kireçtaşlarından oluşan formasyon ilk defa Ercan vd. [23] tarafından adlandırılmıştır. Formasyon çalışma alanında Ulubey ilçe merkezi (L22 b1) çevresinde çok geniş alan kapladığından Ulubey Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Çalışma alanının kuzeyindeki Kışla ve Yoncalı köyleri arasından güneybatıya doğru Ulubey ve Güney ilçeleri ile çevre köylerini katederek güneyde Uzunpınar ve Belenardıç köylerine doğru geniş bir hat boyunca yüzeyler.

Kalın, yatay ve yataya yakın tabakalanma gösteren kireçtaşları yer yer karstik yapı gösterirler. Genellikle altta killi kireçtaşı düzeyleri, daha üstte kumlu kireçtaşı düzeyleri, daha üstte doğru açık pembe renkli kireçtaşları ve en üst düzeylerde de gri beyaz renkli kireçtaşları şeklinde gözlenir. Gölsel kireçtaşlarının alt düzeylerinde yer yer köşeli andezit blok ve çakılları izlenir. Bunlar gölde kireçtaşı oluşumu esnasında karada da püsküren Beydağı volkanitlerinin volkan bombaları ve lapillilerinin püskürme sonucu göl içine düştüklerini kanıtlamaktadır. Gölsel ortam gelişiminin karbonat çökmesi evresinde kireçtaşları oluşurken karadaki Beydağı volkanitlerinin bölgede volkan bacalarının olduğu kesimlerde çatlaklardan gelen sıcak ve SiO₂ ye doymuş eriyikler yer yer karada volkan kayaları ve temel kayalar üzerinde soğuyarak katılmıştır. Bu silis kayaları karada yer yer kilometre boyutunda geniş yer kaplar. Silisli suların gelişleri aralıklı olduğundan silisler kireçtaşları içinde ardışıklı durumdadır. Yer yer küçük yumrular şeklinde, kireçtaşı düzeyleri içinde dağınık şekilde rastlanmaktadır. Bunlar olasılıkla büyük silis düzeylerinden kopan parçaların akıntılarla yuvarlanmaları sonucu oluşmuştur [23].

Ahmetler formasyonu ile yanal ve düşeyde geçişli birimin üzerine Asartepe formasyonu uyumsuz olarak gelir. Erten vd. [25] çalışma alanında Güney ilçesi dolayında (L22-d4) Ulubey formasyonu ile altında yer alan Ahmetler formasyonunun kantağından MN9 memeli biyozonunu (Geç Miyosen'in tabanı) temsil eden, alttaki Ahmetler formasyonunda ise yine aynı lokalitede MN8 memeli biyozonunu (Orta Miyosen) temsil eden fosiller tespit etmiştir. Alçıçek vd. [27] Çal ilçesi (L22-c3) dolayındaki Asarlık lokalitesinde bu birimin üzerinde yer alan Asartepe formasyonundan MN12 memeli biyozonunu (Geç Miyosen) temsil eden memeli fosilleri tespit etmiştir. Ulubey formasyonunun alt düzeylerinin girik olarak gözlenen Beydağı volkanitlerinin yaşı ise Erken-Orta Miyosen olarak belirlenmiştir [28, 29]. Tüm bu verilere değerlendirilerek bu çalışmada Ulubey formasyonunun yaşı Orta-Geç Miyosen olarak kabul edilmiştir.

1.3.2.4. Asartepe Formasyonu (Nmpla)

Alüvyon yelpazesi çökellerinden oluşan birim, ilk defa Ercan vd. [23] tarafından adlandırılmıştır. Tipik konglomera-kumtaşı ardalanmalı seviyeleri Asar Tepe'de (L22-a2) görülen birim adını buradan almıştır. Genellikle kırmızı ve turuncu, yer yer beyaz olmak üzere çeşitli renklerde gevşek karbonat, tüf ve kil çimentolu, orta-kalın tabakalı, polijenik, yarı yuvarlaklaşmış çakıllı konglomera-kumtaşı ardalanması şeklinde olmakla beraber, yer yer ince marnlı-kireçli düzeyler içeren yer yer mercekler şeklinde kanal dolguları içeren ve akarsu ortamında oluşan çökellerdir [23].

Formasyon kendinden daha yaşlı birimler üzerine uyumsuz olarak gelir. Seyitoğlu vd. [29] ve Xafis vd. [30] formasyonun adını aldığı Asar Tepe (L22-a2) güneyinde yer alan Kemikli Tepe lokalitesinden elde ettikleri memeli fosillerine göre birimin yaşını Geç Miyosen; Alçiçek vd. [27] Çal ilçesi (L22-c3) kuzeyindeki Asarlık lokalitesinden elde ettikleri memeli fosillerine göre Geç Miyosen olarak vermiştir.

Sickenberg [31], Dinar (Afyonkarahisar) kuzeyindeki Akça köyü çevresinde (L24-d2) Asartepe formasyonu ile korele edilen alüvyal çökellerdeki memeli fosillerine göre birime Pliyosen (Geç Russiniyen) yaşını vermiştir. Söz konusu yaş verileri ve stratigrafik konumuna göre bu çalışmada formasyonun yaşı Geç Miyosen-Pliyosen olarak kabul edilmiştir.

Travertenler, Genelde grimsi, sarı-kahvemsî sarı renkli, bol boşluklu, çatlaklı ve kırılmalı yapıya sahiptir. Günümüzde de oluşumları yer yer devam eden bu travertenler volkanizma sonrası havzada oluşan çatlaklardan sızan kalsiyum bikarbonatlı suların etkisi ile oluşmuştur. Eski Alüvyon, alüvyon çökellerine göre daha yüksek kotlarda bulunan gevşek tutturulmuş çakıl, kum, silt ve kilden oluşmuştur. Yamaç Molozları Dağ ve tepe gibi yüksek engebeli yerlerin yamaçlarında ve eteklerinde gözlenen tutturulmamış, köşeli çakıl, blok, kum ve kil gibi malzemelerden oluşmuştur [10].

2. JEOMORFOLOJİK ETKİLER VE TOPOGRAFYA

Jeomorfolojik etkiler ve topografyanın kanyon oluşumu üzerindeki etkileri, bölgesel jeolojik yapılar ve sismik aktivitelerle birlikte kanyonların şekillenmesinde önemli faktörlerdir. Topografya, kanyon oluşumunda belirleyici bir rol oynar çünkü suyun akış yönünü ve enerjisini, erozyon süreçlerini ve sediman taşınımını doğrudan etkiler (Şekil 5). Özellikle, yüksek eğimler ve sarp yamaçlar, suyun potansiyel enerjisini artırır ve bu da kayaların aşınmasını ve derin kanyonların oluşumunu hızlandırır. Şekil 6'da Uşak-Ulubey Kanyonu örnekleme bölgesinin arazi görüntüsü verilmiştir. Cohen vd. [32], Crone ve Omdahl [16] ve Çakır [33] tarafından yapılan çalışmalar, topografyanın ve jeomorfolojik süreçlerin Büyük Menderes Grabeni ve Uşak-Ulubey Kanyonu gibi jeolojik yapılar üzerindeki etkilerinin, kanyon oluşumunu etkileyen jeomorfolojik dinamiklerin ve topografyanın anlaşılmasını sağlar.



Şekil 5. Uşak-Ulubey Kanyonu Dokuz Sele Deresi Kolunda Görülen Terkedilmiş Kanal (Google Earth Görüntüsü, Kırmızı Çizgi ile Belirtilen Alan) (35 S 705015 D, 4261009 K, yükseklik: 749 m)



Şekil 6. Uşak-Ulubey Kanyonu İçerisinde Kalan Çalışma Alanının Arazi Görüntüsü

2.1. Akarsu Aşındırma Süreçleri

Akarsu aşındırma süreçleri, akarsu sistemlerinin dinamiklerini ve yeryüzü şekillerinin evrimini anlamak için temel bir konudur. Huggett [34], Bierman ve Montgomery [35], ve Anderson ve Anderson [36] tarafından yapılan çalışmalar, akarsu aşındırma süreçlerinin temellerini ve bu süreçlerin jeomorfolojik etkilerini detaylı bir şekilde inceler (Şekil 5). Suyun akış hızının jeomorfolojik yapı üzerindeki etkisi Şekil 5’te menderesli nehir kolunun terkedilmiş kanal yapısı ile bariz şekilde görülmektedir.

Fiziksel aşındırma, suyun kinetik enerjisi ve taşınan malzemelerin mekanik etkisiyle yatak malzemesinin aşınmasıdır. Anderson ve Anderson [36] akarsuların yatak malzemesi üzerinde uyguladığı kesme kuvvetlerini ve bu kuvvetlerin nasıl malzeme taşınması ve yatak şekillerinin değişimiyle sonuçlandığını açıklar. Akarsu aşındırma sürecinin bir özelliği olarak, suyun hızı ve debisi arttıkça, taşınabilecek malzeme boyutu ve miktarı da artar. Bu durum, yatak şekillerinin ve akarsu vadilerinin morfolojisinde önemli değişikliklere yol açar.

Kimyasal aşındırma, suyun çözücü özelliği sayesinde yatak malzemelerinin kimyasal olarak çözünmesini içerir. Huggett [34] ile Bierman ve Montgomery [35], suyun çeşitli mineral ve kayalar nasıl çözebildiğini ve bu sürecin yatak malzemesinin aşındırılmasına nasıl katkıda bulunduğunu detaylandırır. Özellikle karbonat kayalar gibi çözünebilir malzemelerin bulunduğu bölgelerde kimyasal aşındırma, akarsu yataklarının ve vadilerinin derinleşmesi ve genişlemesinde önemli bir rol oynar.

Çözünme, suyun kimyasal bileşenleri tarafından kayaç ve minerallerin çözülmesi sürecidir. Bu süreç, özellikle karstik alanlarda önemlidir, çünkü kireçtaşı gibi çözünebilir kayaçlar, bu süreçten önemli ölçüde etkilenir. Bu, suyun kimyasal bileşenlerinin, kayaçların ve minerallerin çözünürlüğü üzerindeki etkisinin büyük olduğunu ve bu sürecin, zaman içinde önemli morfolojik değişikliklere yol açabileceğini gösterir.

2.2. Karstik oluşumlar

Ayrışma, yer yüzeyinde veya yakın derinliklerdeki toprak veya kayaç materyalinin kimyasal, fiziksel ve biyolojik işlemlerle bozulması ve değişmesidir.

Zemin bünyesindeki veya atmosferdeki karbondioksit (CO_2) su ile birleşince zayıf bir asit olan karbonik asit (H_2CO_3) meydana gelmektedir. Yağmur sularında oldukça fazla bulunan karbonik asit, Ca ve Mg içeren kireçtaşı ve dolomit gibi karbonatlı kayaçların ayrışmasında önemli etkiye sahiptir. Ayrıca, yağmur suyu pH’ının ≤ 5.6 olduğu durumda karbonatlı kayaçların karstlaşmasına (erime), asit yağmurlarının etkisi ile oluşan nitrik asit (HNO_3) ve sülfirik asit (H_2SO_4) ise kayaçların ayrışmasına neden olmaktadır [37].

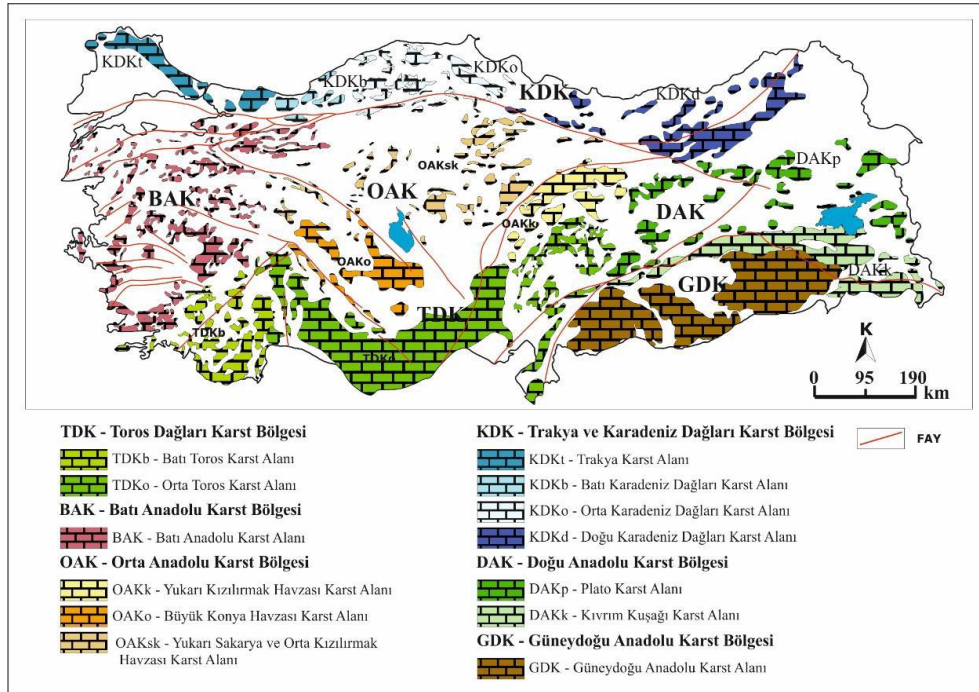
Kireçtaşlarının ayrışması iklim özellikleriyle de yakından ilişkilidir. Bu kayaçların; soğuk ve kurak iklimlerde daha yavaş, nemli ve ılıman iklimlerde ise daha hızlı ayrıştığı bilinmektedir [38].

Türkiye'nin jeolojik yapısında öne çıkan karstik formasyonlar (Şekil 7), özellikle Uşak-Ulubey Kanyonu gibi önemli doğal mirasların evriminde kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, Pekcan [39], karstik jeomorfolojinin temel ilkelerini ve karstifikasyonun jeolojik zaman içinde nasıl ilerlediğini detaylı bir şekilde inceler. Polat ve Karğı [40] ise, Uşak ilinin Karahallı bölgesinde gerçekleştirdikleri araştırmada, karstik erozyon süreçlerinin lapyalı kalker formasyonları üzerindeki etkilerini ve bu süreçlerin çevresel sonuçlarını ele almaktadırlar. Bu çalışma, karstik süreçlerin kanyon oluşumları üzerindeki etkilerini somut örneklerle göstererek, Uşak-Ulubey Kanyonu'nun formasyonu için potansiyel açıklamalar sunar.

Atalay [41] tarafından yapılan çalışma, su akışı ve erozyon dinamiklerinin vadi ve kanyon oluşumları üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde inceler. Bu araştırma, suyun aşındırma gücünün akış hızı ve debisi ile doğrudan ilişkili olduğunu ve kayaçların aşınmasına, malzemenin taşınmasına neden olarak vadi ve kanyonların derinleşmesine ve genişlemesine sebep olduğunu vurgular. Suyun taşıma kapasitesi ve aşındırma hızı m^3/s ve $mm/yıl$ cinsinden modellendiğinde erozyon oranları ve su akışının morfolojik değişimlere olan etkisi kantitatif olarak değerlendirilebilmektedir.

Baykara [42], Çokrağan-Yukarı Karacahisar (Banaz-Uşak) bölgesindeki karstik kaynakların hidrojeolojik incelemesini yaparak, su akışının ve erozyonun bu özel alanlardaki etkilerini detaylı bir şekilde ele alır. Bu çalışma, suyun kayaçlar üzerindeki çözünme ve aşındırma etkilerinin karstik alanlarda nasıl önemli morfolojik değişimlere yol açtığını gösterir. Karstik sistemlerde su akışı ve erozyon dinamiklerinin anlaşılması, vadi ve kanyon oluşumlarının yanı sıra yeraltı su yolları ve mağara sistemlerinin oluşumu hakkında da önemli bilgiler sunar.

Sür [43], Türkiye coğrafyasında karstik yer şekillerinin dağılımını ve karakteristiklerini analiz ederken, bu süreçlerin ülkenin farklı bölgelerinde nasıl değişik morfolojik sonuçlar doğurduğunu vurgular. Sür'ün çalışması, karstifikasyonun jeomorfolojik çeşitlilik yaratma kapasitesini gözler önüne serer ve Uşak-Ulubey Kanyonu'nun incelenmesi için geniş bir perspektif sunar.



Şekil 7. Türkiye'deki Karstik Bölgeler [44]

Karstik oluşumlar, kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) bakımından zengin kayaçların (genellikle kireçtaşı) çözünmesiyle karakterize olan jeolojik süreçlerdir. Bu süreçler, geniş mağara sistemleri, yeraltı akarsuları, obruklar ve benzeri karstik yer şekillerinin oluşumuna yol açar. Türkiye, karstik süreçlerin ve oluşumların yoğun olarak gözlemlendiği ve bu özelliklerin detaylı bir şekilde incelendiği bir bölgedir.

Bu bölümde, Erinç [45] ve Günel [46] tarafından yapılan çalışmalar ışığında, karstik oluşumların detaylı bir analizini ve bu oluşumların Uşak yöresindeki Neojen havzalarına etkilerini inceleyebiliriz.

Erinç [45], karstik süreçlerin temel dinamiklerini, bu süreçlerin oluşturduğu yer şekilleri ile inceler. Erinç, karstifikasyonun başlıca itici gücünün, karbon dioksit ile zenginleştirilmiş suyun kalsiyum karbonatı çözme yeteneği olduğunu belirtir. Bu süreçlerin sonucunda, kireçtaşı tabakaları içerisinde geniş mağara sistemleri, yeraltı nehirleri ve diğer karstik yer şekilleri meydana gelir.

Günel [46] tarafından gerçekleştirilen çalışma, Yukarı Gediz Havzası'nın bitki coğrafyası ve bu coğrafyanın karstik süreçlerle olan etkileşimine dair derinlemesine bir analiz sunar. Karstik oluşumlar, bitki örtüsünün dağılımı, çeşitliliği ve ekolojik dinamikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu etkileşim hem fiziksel habitat özelliklerinin değişiminden hem de su kaynaklarının dağılımındaki farklılıklardan kaynaklanır.

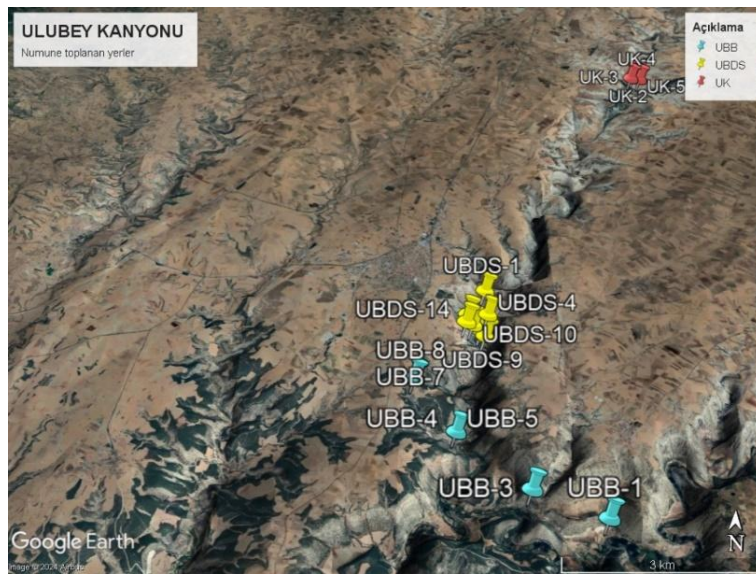
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Arazi ve Büro Çalışmaları

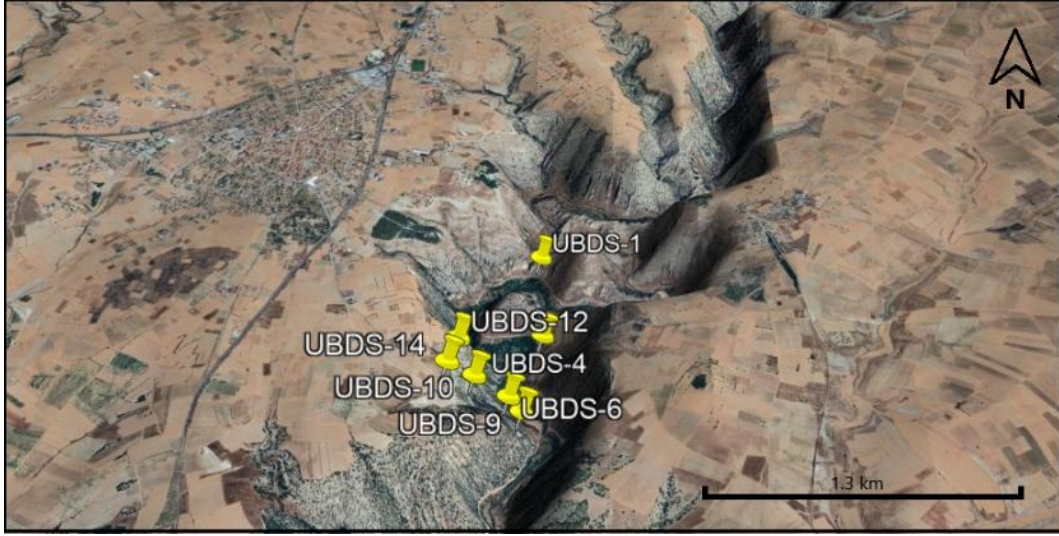
Arazi çalışmaları aşamasında; Ulubey Formasyonu olarak adlandırılan gölsel kireçtaşları içerisinde akarsu drenajı boyunca oluşum gösteren Uşak-Ulubey Kanyonu havzasında ve çevresinde literatür taraması yapılarak arazi çalışmaları öncesi ön bilgiler ve dökümanlar elde edilmiştir. Daha sonra inceleme alanına ait MTA' dan 1/100.000 ve 1/25.000 ölçekli jeoloji haritaları ve HGM' den 1/25.000 ölçekli L22(b1-b2-b3-b4) paftalarına ait topografik haritalar temin edilmiştir. Bölge ve çevresine ait literatür ve haritalar değerlendirilerek daha sonra yapılması planlanan arazi çalışmaları için zemin oluşturulmuştur. Bu sayede inceleme alanındaki önemli olabilecek ve üzerinde daha fazla yoğunlaşılabilecek bölgeler belirlenmiştir.

Bu çalışmalar sırasında Brunton tipi jeolog pusulası, jeolog çekici, lup, GPS gibi araçlardan yararlanılmıştır. Arazi çalışmaları kapsamında L22 paftası içinde bulunan Uşak-Ulubey Kanyonu Dokuz Sele Deresi kolunda Ulubey-Banaz ve Uşak-Köseler (Şekil 8) ile Ulubey-Dokuz Sele Deresi (Şekil 8 ve Şekil 9) olmak üzere 3 farklı bölgede çalışılmış ve örnekler alınmıştır. GPS yardımı ile koordinatları ve yükseklikleri belirlenerek toplam 22 adet örnek alımı yapılmıştır. Örnek alımları, arazi koşullarına göre uygun kanyon seviyelerinden gerçekleştirilmiş ve alınan örnekler mineralojik petrografik ve jeokimyasal analizler için kullanılmak üzere gruplandırılmıştır.

İlk olarak Uşak-Ulubey Kanyonu'nun derinleşmeye başladığı bölge civarında (UK: Uşak-Köseler) arazi gözlemi ve örnekleme işlemleri yapılmıştır. Alınan her örneğin sahayı temsil edecek şekilde olmasına, jeolog çekici ile ana kayadan kırılarak taze yüzeylerden örnek alınmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 8. Örnek Lokasyonları (Google Earth görüntüsü)
(UBDS: Ulubey-Dokuz Sele Deresi, UK: Uşak-Köseler, UBB: Ulubey-Banaz)



Şekil 9. Örnek Lokasyonları (Google Earth Görüntüsü)
(UBDS: Ulubey-Dokuz Sele Deresi)

3.2. Laboratuvar Çalışmaları

3.2.1. Mineraloji petrografi analizleri

Uşak-Ulubey Kanyonu Dokuz Sele deresi kolunda yapılan arazi çalışmaları kapsamında UK: Uşak-Köseler, UBDS: Ulubey-Dokuz Sele Deresi ve UBB: Ulubey-Banaz lokasyonlarından toplam 16 adet kayaç örneği toplanmıştır. İnce kesit yaptırmak üzere 11 kayaç örneği, XRD detay kil analizi yaptırmak üzere 2 çamurtaşı örneği MTA'ya gönderilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. İnce Kesit ve XRD Yaptırmak Üzere Toplanan Kayaç Örnekleri Koordinatları

ÖRNEK İSİMLERİ	KOORDİNATLAR		YÜKSEKLİK
	X	Y	Z (m)
UK-2	704975	4261911	758
UK-4	705193	4261929	778
UBDS-1	701392	4254384	600
UBDS-4	701443	4253788	584
UBDS-6 (Çamurtaşı)	701307	4253265	593
UBDS-9	701382	4253158	609
UBDS-11	701143	4253241	643
UBDS-12 (Çamurtaşı)	701047	4253415	670
UBDS-14	701021	4253190	704
UBB-1	703285	4249230	553
UBB-3	702092	4249712	528
UBB-5	700856	4250770	580
UBB-8	700111	4251725	684

3.2.2. Jeokimya analizleri

Uşak-Ulubey Kanyonu Dokuz Sele deresi kolunda yapılan arazi çalışmaları kapsamında UK: Uşak-Köseler bölgesinden 2 adet , UBB: Ulubey Banaz bölgesinden 1 adet Paleosol örneği toplanmıştır (Tablo 2). Her örnek isimlendirilmiş ve GPS yardımı ile koordinatları belirlenmiştir. Toplanan Paleosol örnekleri ICP-OES ile eser element analizi yaptırmak üzere MTA'ya gönderilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Paleosol Örnekleri Koordinatlar ve Yükseklikleri

ÖRNEK İSİMLERİ	KOORDİNATLAR		YÜKSEKLİK
	X	Y	Z (m)
UK-5 (Paleosol)	705193	4261929	778
UK-7 (Paleosol)	705063	4262047	799
UBB-7 (Paleosol)	700111	4251725	684

Paleosol örnekleri, jeolojik zamanlarda oluşmuş eski topraklardan alınan örneklerdir. Bu örnekler genellikle sediment yataklarında, mağaralarda veya diğer jeolojik oluşumlarda bulunur (Şekil 10). Paleosol örnekleri, geçmiş iklim koşullarını anlamak, bitki örtüsü değişikliklerini belirlemek, toprak oluşum süreçlerini incelemek ve diğer jeolojik ve çevresel değişimleri anlamak için kullanılır. Paleosol örnekleri incelenerek o dönemdeki yağış rejimi, sıcaklık değişimleri, kuraklık dönemleri gibi iklimsel faktörler hakkında bilgi elde edilebilir. Aynı şekilde, bitki fosilleri ve toprak özelliklerine dayalı olarak o dönemdeki bitki örtüsü hakkında da bilgi sahibi olunabilir. Sonuç olarak, paleosol örneklerinin incelenmesi, bölgenin geçmiş iklim koşulları hakkında önemli ipuçları verebilir. Aynı zamanda, bu analizler kanyonun oluşumunu etkileyen faktörleri de anlamamıza yardımcı olabilir. Araştırmanın sonuçları, bölgenin jeolojik evrimini ve çevresel değişimleri daha iyi anlamamıza katkı sağlayabilir.

Uşak-Ulubey Kanyonu Dokuz Sele deresi kolunda yapılan arazi çalışmaları kapsamında UK: Uşak-Köseler bölgesinden 1 adet , UBB: Ulubey banaz bölgesinden 4 adet, UBDS: Ulubey-Dokuz Sele Deresinden 4 adet çamurtaşı örneği olmak üzere toplam 9 adet örnek toplanmıştır (Tablo 3). Her örnek isimlendirilmiş ve GPS yardımı ile koordinatları belirlenmiştir. Toplanan çamurtaşı örnekleri XRF analizi yaptırmak üzere MTA'ya gönderilmiştir.



Şekil 10. Gölsel Kireçtaşı Araseviyelerindeki Paleosol Oluşumlarına UK-5 Örneği Lokasyonundan Bir Örnek

Tablo 3. XRF Analizi Yaptırmak Üzere Toplanan Çamurtaşı Örnekleri

ÖRNEK İSİMLERİ	KOORDİNATLAR		YÜKSEKLİK
	X	Y	Z (m)
UK-3 (Çamurtaşı)	704975	4261911	758
UBDS-6 (Çamurtaşı)	701307	4253265	593
UBDS-8 (Çamurtaşı)	701382	4253158	609
UBDS-10 (Çamurtaşı)	701143	4253241	643
UBDS-12 (Çamurtaşı)	701047	4253415	670
UBB-4 (Çamurtaşı)	700856	4250770	580

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

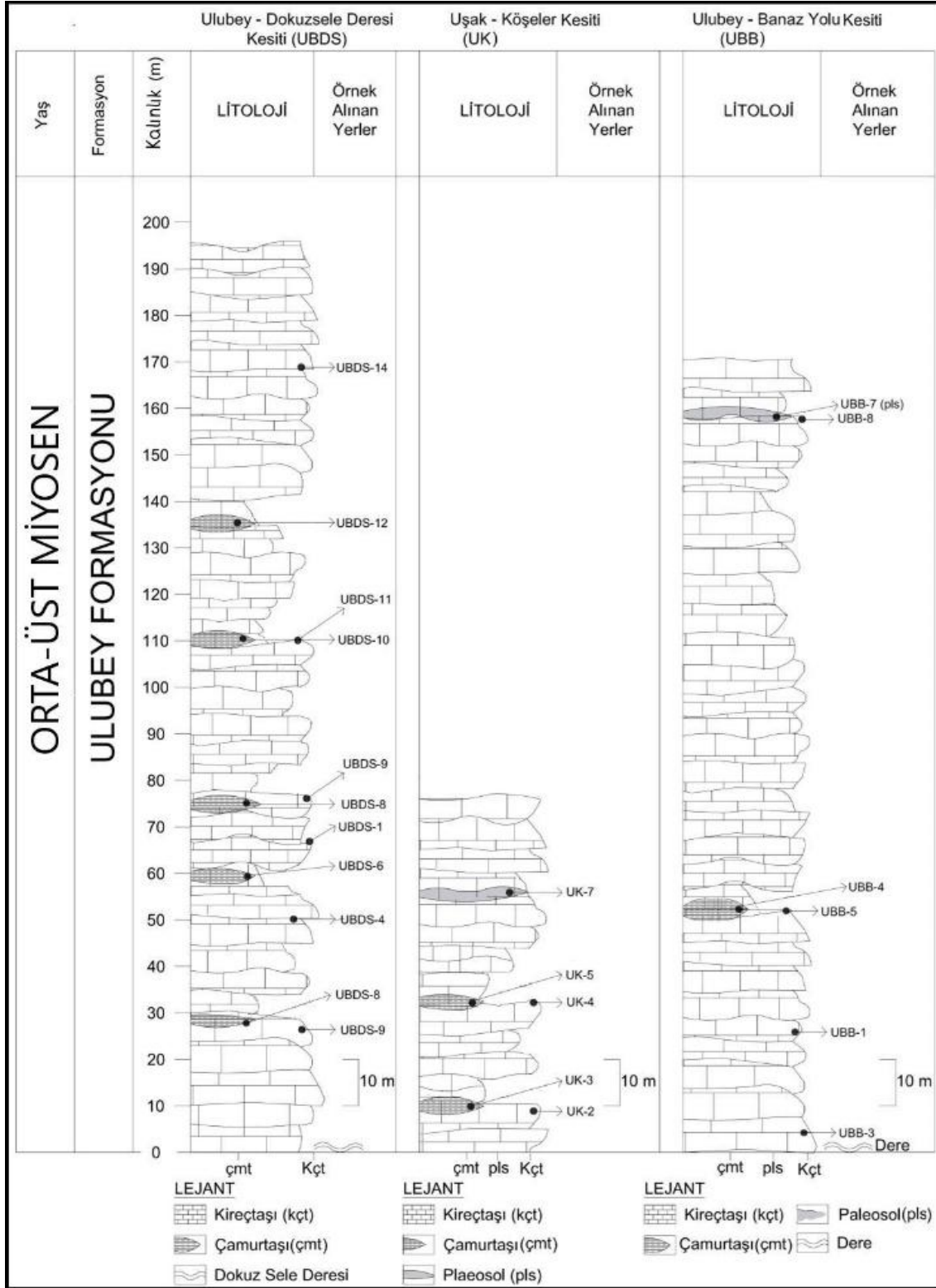
Kanyonun oluşumunda suyun büyük bir rol oynadığı bilinmektedir. Ayrıca kanyon yarıçapının da önemli bir rol oynadığı bilinmekte olup bunun da sebebi, akarsu veya nehrin ne kadar geniş bir alanı etkileyebileceğidir. Daha geniş bir yarıçapa sahip olan bir nehir, daha fazla suyu taşımış ve bu da yüksek akış hızlarına neden olmaktadır.

Ayrıca, kanyonun oluşumunda yarıçapın yanı sıra genişliği de önemlidir. Çünkü kanyonun genişliği, nehir veya akarsuyun aşındırma kapasitesini belirler. Daha geniş bir nehir veya akarsu, daha fazla malzeme taşıma kapasitesine sahip olabilir ve bu da kanyonun genişliğini etkiler. Özetle, kanyon oluşumunda yarıçap ve en gibi faktörlerin etkisi büyüktür ve bu faktörler akarsu veya nehirlerin aşındırma süreçlerini ve taşıma kapasitelerini belirleyerek kanyonların oluşumunu şekillendirir. Uşak-Ulubey Kanyonu suyun aşındırıcı etkisinin en belirgin olduğu güzel bir örnektir. Kanyonlar genellikle nehirler tarafından oluşturulur. Nehirler, yıllar boyunca kayalar aşındırarak yataklarını derinleştirir ve genişletir. Uşak-Ulubey Kanyonu'nun da benzer bir süreç sonucu oluştuğu düşünülmektedir.

Araştırmalar, kanyon boyunca sedimanter ve diğer farklı kayaların varlığını inceleyerek kanyonun oluşum sürecini daha iyi anlamaya yardımcı olabilir. Sedimanter kayalardaki bu tabakaların oluşumu, iklim değişiklikleri, tektonik hareketler veya suyun erozyon etkisi gibi jeolojik süreçlerle ilişkilendirilebilir.

Bölgenin tektonik aktiviteleri, kanyonun jeolojik evrimi üzerinde belirleyici bir rol oynamıştır. Fay hatları, kırılmalar ve diğer tektonik hareketlerin kanyonun oluşumuna olumlu bir etki bıraktığı saha gözlemlerinde belirlenmiştir.

Arazi çalışmaları kapsamında Uşak-Ulubey Kanyonu Dokuz Sele Deresi kolunda 3 farklı bölgede örnekleme işleme yapılmış ve alınan her örnek için koordinat ve yükseklik bilgisi kaydedilmiştir. Bununla birlikte arazi gözlemleri ve daha önce yapılan çalışmaların katkısı ile stratigrafik dikme kesit hazırlanmıştır (Şekil 11) .

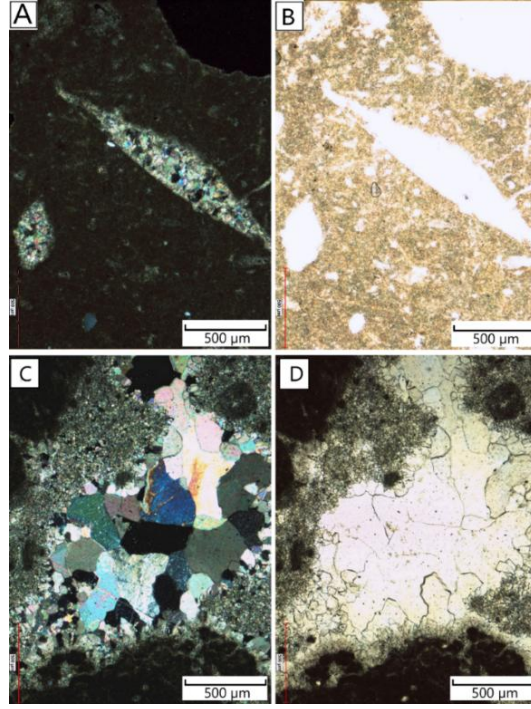


Şekil 11. Uşak-Ulubey Kanyonu Dikme Kesiti (UBDS Kesiti Koordinatları X: 701094, Y: 4254884, Z: 736 m., UK Kesiti Koordinatları X:704984, Y: 4261707, Z: 799 m., UBB Kesiti Koordinatları X: 703285, Y: 4249230, Z: 553 m., Tüm koordinat değerleri UTM sistemine göre alınmıştır. UBDS kesitinde verilmiş olan ölçek her üç kesit için de aynıdır.)

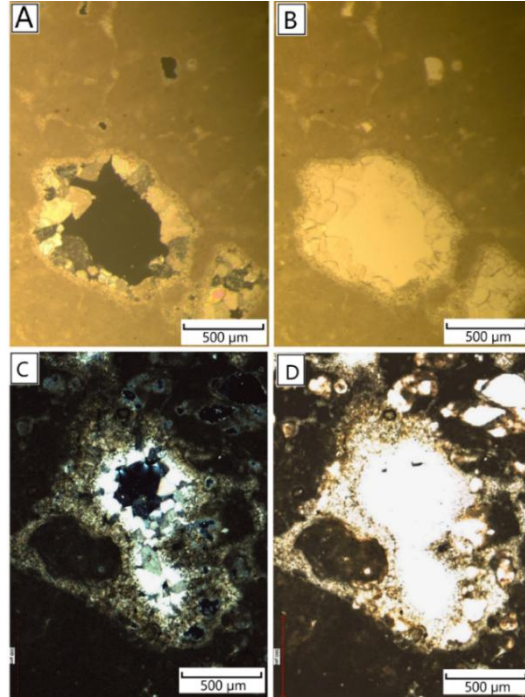
4.1. Mineraloji Petrografi Analizleri

4.1.1. İnce kesit analizleri

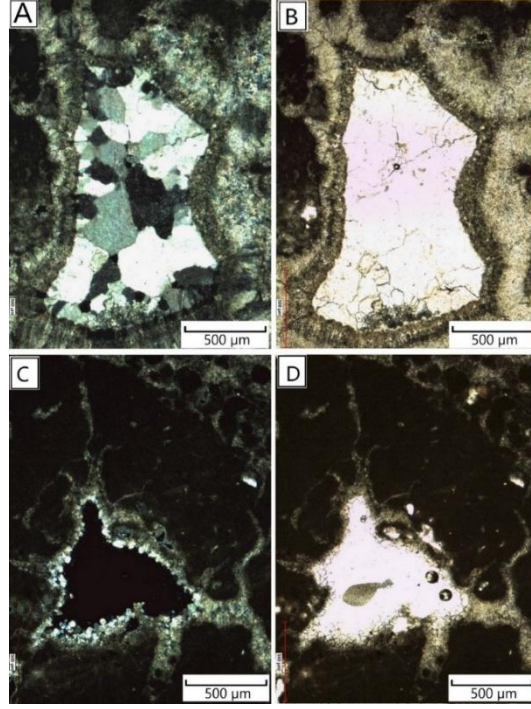
Petrografik analizlere göre kireçtaşları Dunham [47] 1962, sınıflamasına göre Vaketaşı (Şekil 12), Çamurtaş (Şekil 13) ve Folk [48] 1959 sınıflamasına göre biyosparit (Şekil 14), intramikrit, biyomikrit (Şekil 15) ve Folk [49] 1962 sınıflamasına göre fosilli mikrit, mikrit olarak tanımlanmıştır.



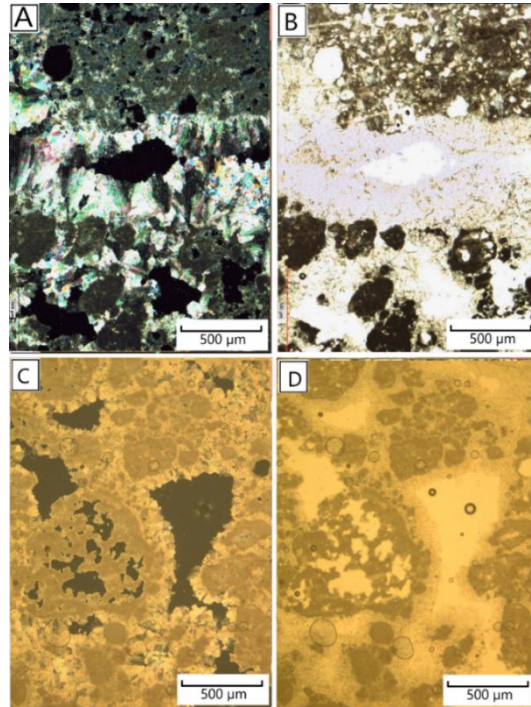
Şekil 12. UK-4 Numaralı Vaketaşı Kayaç Örneğine ait İnce Kesit Görüntüleri
[(A-C): Çift Nikol, (B-D): Tek Nikol, Boşluklar Sparit ile Doldurulmuştur]



Şekil 13. UBDS-4 Numaralı Çamurtaş Kayaç Örneğine ait İnce Kesit Görüntüleri
[(A-C): Çift Nikol, (B-D): Tek Nikol]



Şekil 14. UK-2 Numaralı Biyosparit Kayaç Örneğine ait İnce Kesit Görüntüleri
[(A-C): Çift Nikol, Sparitik Boşluk Dolguları, (B-D): Tek Nikol]



Şekil 15. UBB-5 Numaralı Biyomikrit Kayaç Örneğine ait İnce Kesit Görüntüleri
[(A-C): Çift Nikol, (B-D): Tek Nikol]

4.1.2. XRD (X ışını kırınımı) analizleri

XRD analizi, optik mikroskobik yöntemler ile kesin olarak tanımlanamayacak nitelikte olan doğal minerallerin tanımlanabilmeleri için uygulanır. XRD analizi hem toz halinde öğütülmüş hem de parça şeklindeki örneklerde yapılmaktadır.

Analiz yapmak üzere toplanan örnekler alındığı alanı, formasyonu veya yapılacak olan çalışma türünü en iyi temsil edebilecek şekilde seçilmiştir. Örnek alınan noktaların GPS yardımı ile koordinatları ve yüksekliği belirlenmiştir (Tablo 3 ve Tablo 4) .

Toplanan örneklerden seçilen 2 adet çamurtaşı örneği (Örnek: UBDS-6 ve UBDS-12) Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğüne XRD kalitatif detay kil analizi yaptırmak üzere gönderilmiştir. MTA Mineraloji ve Petrografi birimi tarafından kil örneklerinin, standart (2°-70° arası), normal (2°-30° arası), etilen glikol (2°-30° arası), 300 °C ısı (2°-30° arası) ve 550 °C ısı (2°-30° arası) işlem çekimleri yapılarak XRD difraktogramları üzerinden ASTM Standartlarına uygun olarak ayrıntılı mineralojik tanımlamaları yapılmıştır. Yapılan XRD analizleri sonucunda kil minerallerinden illit, sepiyolit mineralleri, bunların dışında kuvars ve kalsit minerallerinin varlığı tespit edilmiştir.

4.2. Jeokimya Analizleri

4.2.1. XRF (X ışını floresans) analizleri

MTA'ya XRF analizi yaptırmak üzere 6 adet çamurtaşı örneği gönderilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar Tablo 4'te listelenmiştir.

Tablo 4. Çamurtaşlarına ait XRF Analizi Sonuçları

BİLEŞİK İSİMLERİ (%)	ÖRNEK İSİMLERİ					
	UBDS-6	UBDS-8	UBDS10	UBDS12	UK-3	UBB-4
A.Za (Kızdırma kaybı)	42.90	41.70	20.10	32.10	43.50	41.30
Al ₂ O ₃	1.0	1.0	13.4	4.0	0.5	1.5
CaO	52.0	52.0	17.0	34.8	53.8	50.7
Fe ₂ O ₃	0.4	0.7	5.0	2.1	0.3	0.8
K ₂ O	<0.1	0.1	1.9	0.6	<0.1	0.2
MgO	0.6	0.5	3.6	5.1	0.4	0.6
TiO ₂	<0.1	<0.1	0.6	0.2	<0.1	<0.1
SiO ₂	2.8	3.6	38.0	20.8	1.2	4.6
Na ₂ O	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
P ₂ O ₅	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
MnO	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

4.2.2. ICP-OES ile eser element analizleri

Eser element içeriklerinin belirlenmesi amacıyla 3 adet paleosol örneğinin ICP-OES analizleri MTA'da gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar Tablo 5'te listelenmiştir.

Tablo 5. Paleosol Örneklerinden Yapılan ICP-OES ile Eser Element Analizi Sonuçları

ELEMENT İSİMLERİ (ppm)	ÖRNEK İSİMLERİ		
	UK-5	UK-7	UBB-7
As	13	10	<10
Cd	<10	<10	<10
Co	15	21	10
Cu	22	25	23
Mo	<10	<10	<10
Ni	146	166	100
Pb	12	13	<10
Sb	<10	<10	<10
Se	<10	<10	<10
Zn	110	100	45

4.3. Jeokimyasal Analiz ve Sedimanter Ortam Yorumları

UBDS-6, UBDS-8 ve UK-3 örneklerinde yüksek oranda kalsiyum oksit (CaO) bulunması, bu örneklerin kalsit veya diğer kalsiyum içeren minerallerce zengin olduğunu gösterir. Aynı zamanda düşük silika (SiO_2) içeriği, silikat minerallerin az olduğunu veya tamamen kalsiyum içeren minerallerin baskın olduğunu düşündürür. Alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) düşük seviyelerde olup, kil mineralleri ve demir oksit minerallerinin düşük oranını yansıtır. Bu üç örnekte CaO oranları yükselmesiyle ters orantılı olarak SiO_2 oranı düşmüştür.

UBDS-8, UBDS-6'ya benzer bir kimyasal kompozisyona sahip, yüksek kalsiyum oksit ve düşük silika içeriği ile karakterizedir. Bu, UBDS-8'in de kalsit zengin bir örnek olduğunu gösterir. Fe_2O_3 içeriği bir miktar daha yüksek olup, hafif bir demir oksit katkısını işaret edebilir.

UBDS-10, diğer örneklerle kıyasla oldukça farklı bir kompozisyona sahiptir. Yüksek silika ve alüminyum oksit içerikleri, bu örneğin muhtemelen kil mineralleri (örneğin, kaolinit, illit) ve kuvars içerdiğini gösterir. Ayrıca önemli miktarda demir oksit ve magnezyum oksit içeriği, demir ve magnezyum minerallerinin varlığını işaret eder.

UBDS-12, orta düzeyde kalsiyum oksit ve silika içeriği ile hem karbonat hem de silikat minerallerini içerebilecek bir örnektir. Magnezyum oksit oranının yüksekliği, dolomit veya serpantin gibi magnezyum içeren minerallere işaret edebilir.

UK-3, çok yüksek kalsiyum oksit içeriği ve çok düşük silika içeriği ile neredeyse tamamen kalsit veya benzeri karbonat minerallerinden oluşmuş bir örnektir. Bu, UK-3'ün kalsit veya aragonit gibi saf bir karbonat kayaç olduğunu gösterir.

UBB-4, yüksek kalsiyum oksit ve düşük silika içeriği ile kalsiyum içeren minerallerin hakim olduğu bir yapıya sahiptir. Silika içeriği diğer örneklerle göre biraz daha yüksek olmakla birlikte, karbonat minerallerin baskın olduğu bir örnek olarak da değerlendirilebilir.

UBDS-6, yüksek CaO içeriği (%52.0) ile bu örnek, gölsel ortamda çökelmiş kireçtaşının karakteristiğini gösteren yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriğine sahiptir. Bu veri de örneğin göl suyunun kalsiyum karbonat bakımından zengin olduğu bir dönemde çökelmiş olabileceğini düşündürür. Düşük SiO_2 (%2.8) içeriği, gölün kimyasal tortullaşma sürecinde silikat minerallerinin azaldığını gösterir. Bu da, göl suyunun berrak ve tortusuz bir karakterde olduğunu ve biyokimyasal çökeltmenin baskın olduğunu işaret edebilir. Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içeriği (%1.0 ve %0.4) açısından değerlendirildiğinde, alüminyum ve demir oksitlerin düşük konsantrasyonları, örneğin alüminyum ve demir içeren kil minerallerinden yoksun olduğunu ve/veya çökeltme sırasında bu minerallerin azaldığını gösterir.

Ortamsal Yorum: UBDS-6 örneği, göl ortamında kalsiyum karbonatın çökmesi ile oluşmuş tipik bir kireçtaşıdır. Örneğin düşük silika ve kil mineralleri içeriği, nispeten durağan ve berrak bir göl ortamına işaret eder.

UBDS-8, örneği de benzer CaO içeriği (%52.0) ile UBDS-6'ya benzer şekilde yüksek kalsiyum oksit içeriği göstermekte, bu da gölsel kireçtaşı oluşumuna işaret etmektedir. SiO_2 içeriği (%3.6) UBDS-6'ya göre biraz daha yüksek olup, bu da ortama biraz daha fazla detritik malzeme girişi olduğunu gösterebilir. Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içeriği (%1.0 ve %0.7) değerleri, gölde az miktarda da olsa kil ve demir içeren minerallerin varlığına işaret eder.

Ortamsal Yorum: UBDS-8 örneği, kalsiyum karbonat çökeltmesinin baskın olduğu bir ortamda oluşmuştur. Silika içeriğindeki hafif artış, belki de daha yakın bir karasal kaynaktan gelen çok az miktarda detritik materyalin varlığını işaret eder.

UBDS-10, yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 içeriği (%38.0 ve %13.4) ile bu örnek, önemli miktarda silikat ve alüminyum içerir. Bu da kil minerallerinin varlığına işaret eder. Bu durum, göl çevresinden gelen detritik materyalin yoğun bir şekilde çökmesi anlamına gelir. Önemli ve yüksek Fe_2O_3 ve MgO içerikleri (%5.0 ve %3.6) magnezyum içeren karbonatların varlığını gösterebilir.

Ortamsal Yorum: Detritik kil mineralleri ve demir oksitlerin göl tabanına çökmesiyle oluşmuş, gölün kenarına veya daha dinamik bir çevreye yakın bir yerde meydana gelen çökme olayını temsil eder. Bu örnek, kalsiyum karbonattan ziyade daha silikat ve metal oksit bakımından zengindir.

UBDS-12, orta düzeyde CaO (%34.8) ve SiO₂ (%20.8) içeriği ile bu örnek, hem kalsiyum karbonat hem de silikat mineralleri içeren bir kompozisyona sahiptir. Bu değerler kireçtaşı ve silisli materyallerin bir arada çökelmiş olabileceğini gösterir. Yüksek MgO içeriği (%5.1), dolomit gibi magnezyum içeren karbonat minerallerinin varlığına işaret eder.

Ortamsal Yorum: UBDS-12 örneği, hem kireçtaşı hem de silisli materyallerin birlikte bulunduğu bir ortama işaret eder. Bu ortam, dolomitleşme sürecinin etkisi altında kalmış olabilir ve hem karbonat hem de detritik materyal girişi bulunan bir geçiş ortamını yansıtabilir.

UK-3, çok yüksek CaO içeriği (%53.8) ile neredeyse tamamen kalsiyum karbonattan oluşan bir örnektir. Düşük SiO₂ (%1.2) ve diğer oksit içerikleri ve diğer metal oksitler, bu örneğin diğer örneklerle göre detritik malzeme girişinin olmadığı ya da çok az olduğu, daha saf bir karbonat çökme ortamını yansıttığını gösterir.

Ortamsal Yorum: UK-3 örneği, çok düşük detritik katkı ve yüksek karbonat içeriği ile neredeyse saf bir kireçtaşıdır. Bu örnek, düşük enerjili, sakin bir göl ortamında, neredeyse tamamen biyokimyasal çökme ile oluşmuş olabilir.

UBB-4, yüksek CaO içeriği (%50.7) dikkat çeker. SiO₂ içeriği (%4.6) diğer karbonatlı örneklerle göre biraz daha yüksek. Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içerikleri ise çok düşüktür.

Ortamsal Yorum: UBB-4 örneği, kalsiyum karbonatın yoğun olarak çökmesi ile oluşmuş bir karbonat kayacıdır. Silis içeriği değeri, ortama az miktarda detritik materyal katkısının olabileceğini düşündürse de, genel olarak düşük enerji ve detritik materyal girişinin çok az olduğu bir göl ortamını yansıtır.

UK-5, yüksek demir (Fe) içeriği ve orta düzeyde nikel (Ni) ve çinko (Zn) içeriği, bu örneğin demir mineralleri ve bazı metalik elementleri içerebileceğini gösterir.

UK-7, UK-5'e benzer ancak daha düşük Fe içeriği ve biraz daha yüksek Co (kobalt) içeriği ile farklılık gösterir. Bu, kobalt içeren minerallerin varlığına işaret edebilir.

UBB-7, diğer örneklerle kıyasla daha düşük Fe, Co ve Ni içeriğine sahiptir. Bu da daha düşük metal konsantrasyonlarına işaret eder.

Ortamsal Yorum: Bu örnekler, demir içeriği yüksek ve metalik elementlerce zenginleşmiş tortullardır. Bu da, gölün bazı dönemlerde metal bakımından zengin bir kaynak tarafından beslenmiş olabileceğini veya göl tabanında metalik minerallerin çökmesine izin verecek anoksik (oksijensiz) koşulların hakim olabileceğini düşündürür.

5. SONUÇLAR

Uşak ili sınırları içerisinde bulunan Uşak-Ulubey Kanyonu'nun oluştuğu havza olan Miyosen yaşlı gölsel çökellerin mineralojik petrografik ve jeokimyasal özelliklerinin incelendiği bu çalışmada, Uşak-Ulubey Kanyonu havzasının Ulubey Formasyonu olarak bilinen çökel kayaçları hakkında yapılan çalışmaların sonucunda öncelikle, Uşak-Ulubey Kanyonunun oluşumunda jeolojik zaman içerisinde meydana gelen tektonik hareketler ve su erozyonu büyük rol oynamıştır. Kayaçların sertlik derecesi, bileşimi, çatlakları, katmanlaması ve eğimi gibi özellikler kanyon oluşumunu etkilemiştir.

Kanyonun oluşumunda temel olarak tektonik faaliyetlerin etkili olduğu belirlenmiştir. Zamanla su erozyonunun da etkisiyle oluşan kanyon, jeolojik süreçlerin bir sonucu olarak şekillenmiştir. Sonuç olarak, Uşak-Ulubey Kanyonu'nun oluşumunda jeolojik, topografik ve iklimsel faktörlerin karmaşık bir etkileşimi vardır.

Yapılan saha çalışmaları ve analizler sonucunda, Uşak-Ulubey Kanyonu'nun tektono-sedimanter olduğunu ortaya koymuştur. Kanyonun oluşumunda ana etkenler arasında jeolojik yapısının tektonik hareketler, erozyon süreçlerinin rol oynadığı belirlenmiştir.

Yapılan petrografik analizler ve elde edilen bulguların sonucunda kireçtaşları; Dunham [47] 1962, sınıflamasına göre Vaketaşı (Şekil 10), Çamurtaşı (Şekil 11) ve Folk [48] 1959 sınıflamasına göre biyosparit (Şekil 12), intramikrit, biyomikrit (Şekil 13) ve Folk [49] 1962 sınıflamasına göre fosilli mikrit, mikrit olarak tanımlanmıştır.

Bu tanımlamalar bölgede çökelen tortul kayaçların sedimantasyon ortamı hakkında da bilgi vermektedir. Örneklerin genelinde intramikrit ve biyomikrit olarak tanımlanan kireçtaşları yaygın olarak görülmüştür. Bu sonuç da durgun su ortamı yani göl ortamında çökelim olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca kireçtaşlarındaki mikro boşluklarda sparikalsit oluşumları gözlenmiştir. Bu boşluklar karstlaşmayı ifade etmektedir. Sparikalsit dolguların bu boşluklara sonradan yerleşip ikincil olarak oluştuğu düşünülmektedir. XRD analizinde elde edilen difraktogramlara göre formasyondan alınan çamurtaşlarının bileşiminde kil minerallerinden illit, sepiyolit mineralleri, ayrıca kuvars ve kalsit mineralleri bulunduğu tespit edilmiştir.

XRF analizlerinde bazı örnekler yüksek CaO içeriği gösterirken, düşük SiO₂ oranı kalsiyum karbonat baskınlığını ve düşük detritik materyal varlığına işaret eder. Bazı örnekler ise yüksek SiO₂ ve Al₂O₃ içeriği ile kil mineralleri ve detritik materyalin varlığını yansıtırken, yüksek Fe₂O₃ ve MgO içeriği demir ve magnezyum minerallerinin bulunduğunu gösterir. Yüksek CaO içeriği ile saf kireçtaşı karakteristiği gösteren, düşük SiO₂ oranı sedimantasyon ortamının düşük enerjili, sakin göl ortamları olduğunu, intraklastlar ise zaman zaman göl havzasına daha yüksek enerjili akıntılar yolu ile dışarıdan malzeme geldiğini gösterir.

Araştırma sahasında yaklaşık 684 m, 778 m ve 799 m kotlarında kireçtaşlarının ara tabakalarında görülen ve eser elementleri tespit edilen paleosoller, çevresindeki tortul kayaçlar ile ilişkili olarak çökme süreçleri hakkında bilgi verir. Paleosoller bulundukları seviyelerde Neojen gölünün kuruma evresine girmiş olabileceğini, o dönemde çökmenin duraksadığını ve yüzeyde bir süreliğine toprak oluşum süreçlerinin baskın olduğunu gösterir. Bu da çökmenin epizodik (aralıklı) olduğunu işaret eder. Jeokimyasal analizler sonucu ortaya çıkan yüksek Fe₂O₃ içeriği, toprak oluşumu sırasında oksidatif koşulların baskın olduğunu gösterir. Fe²⁺ iyonları oksijenle reaksiyona girerek Fe³⁺ formuna dönüşür ve bu da demir oksit minerallerinin oluşumuna neden olabilir. Bu süreç, genellikle iyi drene olmuş, oksijen açısından zengin koşullarda meydana gelir. Bu da paleosolun oluştuğu çevredeki iklimin nispeten kuru ve iyi havalandırılan bir ortam olduğunu düşündürülebilir.

Örtü kayaçlarını oluşturan Senozoyik istifin geneline bakıldığında tane boyunun zaman ve mekan içerisinde yukarı yönde inceldiği büyükten küçüğe doğru çok sayıda tekrarlanan transgresif özellikli çevrimselliklerin varlığı dikkat çekmektedir. Bu çevrimselliklerin kökeninin tektonik olduğu ve Uşak-Ulubey Kanyonu'nun oluşumunda tektono-sedimanter şartların etken olduğunu düşündürmektedir.

REFERANSLAR

- [1] Ö. Karaoğlu, Volcano-sedimentary evolution of the Uşak-Güre basin, Western Anatolia. Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2012.
- [2] A.M.C. Şengör, "Principles of the neo-tectonics of Turkey". Geological Society of Turkey, 40: 141-175, 1980.
- [3] A. Barka, The Isparta Angle: its importance in the neotectonics of the Eastern Mediterranean Region. In International Earth Sciences Colloquium on the Aegean Region (IESCA), İzmir, Turkey, 1995.
- [4] J. M. Richardson Bunbury, The Kula volcanic field, western Turkey: the development of a Holocene alkali basalt province and the adjacent normal-faulting graben. Geological Magazine, 133: (3), 275-283, 1996.
- [5] İ. Ketin, Güneydoğu Anadolu'nun Kambrien Teşekkülleri ve Bunların Doğu İran Kambrieni ile mukayesesi. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 66:(66), 75-87, 1966.
- [6] Z.Garfunkel, Constrains on the origin and history of the Eastern Mediterranean basin. Tectonophysics, 298:(1-3), 5-35, 1998.

- [7] Y. Yılmaz, Ş.C. Genç, F. Gürer, M. Bozcu, K. Yılmaz, Z. Karacık, and A. Elmas, Batı Anadolu grabenleri ne zaman gelişmeye başladı? Jeoloji Derneği, Londra, Özel Yayınlar , 173:(1), 353-384, 2000.
- [8] D. Prelevic, C. Akal, S.F. Foley, R.L. Romer, A. Stracke and P. Van Den Bogaard, Ultrapotassic mafic rocks as geochemical proxies for post-collisional dynamics of orogenic lithospheric mantle: the case of southwestern Anatolia, Turkey. *Journal of Petrology*, 53:(5), 1019-1055, 2012.
- [9] H. Alçiçek, Denizli Neojen havzası'nın sedimanter fasiyesleri, depolanma ortamları ve paleocoğrafik gelişimi, GB Anadolu, Türkiye. 59. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 189: 20-24, 2006.
- [10] E. Tuncay ve A. Bozkurt, 1:100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları serisi. Uşak L22 paftası, M.T.A. Raporu No: 280, Ankara, 2022.
- [11] C.R. Allen, Geological criteria for evaluating seismicity. *Geological Society of America Bulletin*, 86: 1041-1057, 1975.
- [12] E. Altunel ve P.L. Hancock, Active fissuring and Quaternary travertines at Pamukkale, Western Turkey. *Z. Geomorph N.F.*, 94: 285-302, 1993.
- [13] E. Altunel ve P.L. Hancock, Structural attributes of travertine-filled extensional fissures in the Pamukkale plateau, Western Turkey. *International Geology Review*, 38(8): 768-777, 1996.
- [14] M.C. Alçiçek, N. Kazancı, M. Özkul, Ş. Şen, Çameli (Denizli) Neojen Havzası'nın tortul dolgusu ve jeolojik evrimi. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 128: 99-123, 2004.
- [15] H.A. Cohen, C.J. Dart, H.S. Akyüz ve A. Barka, Syn-rift sedimentation structural development of the Gediz and Menderes Graben, Western Turkey. *Journal of the Geological Society*, 152: 629-638, 1995.
- [16] A.J. Crone ve E.M. Omdahl, Directions in Paleoseismology: U.S. Geological Survey. Open File Report: 87-673, New Mexico, 1987.
- [17] N.N. Ambraseys, Some characteristic features of the Anatolian fault zone. *Tectonophysics*, 9: 143-165, 1970.
- [18] İ. Atalay, Ö. Yılmaz and F. Kafalı, The effect of neotectonic movements on the formation Ulubey-Banaz Canyon, W of Turkey. *The Third Turkish-Romanian Geographical Academic*, ss. 16-24, Eylül, İstanbul, 2004.
- [19] H. Çukur, Ulubey Kanyonu (Uşak) ve yakın çevresinin turizm potansiyeli. Dokuz Eylül Üniversitesi, Buca Eğitim Fakültesi, İzmir, 2014.
- [20] F. Göktaş, A. Çakmakoglu, E. Tarı, Y.F. Sütçü, H. Sarıkaya, Çivril-Çardak arasındaki jeolojisi. M.T.A. Raporu No: 8701, Ankara, 1989.
- [21] Z.R. Bilgin, T. Karaman, Z. Öztürk, A.M. Şen ve A. Demirci, Yeşilova-Acıgöl civarının jeolojisi. M.T.A. Raporu No: 9429, Ankara, 1990.
- [22] A. Ergen, A. Ilgar, E. Tuncay, A. Bozkurt and A. Doğan, 1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Denizli-M22 paftası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara, 2020.
- [23] T. Ercan, A. Dinçel, S. Metin, A. Türkecan ve E. Günay, Uşak Yöresindeki Neojen Havzalarının Jeolojisi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, ss. 91-106, Ağustos, Ankara, 1978.
- [24] G. Saraç, Türkiye Omurgalı Fosil Yatakları (Vertebrate fossil localities of Turkey). *Scientific. M.T.A. Report No: 10609*, Ankara, 2003.
- [25] H. Erten, Ş. Şen, M. Görmüş, "Middle and late Miocene Cricetidae (Rodentia, Mammalia) from Denizli Basin (south-western Turkey) and a new species of Megacricetodon". *Journal of Paleontology*, 88:(3), 504-518, 2014.

- [26] G. Seyitoğlu, Late Cenozoic tectono-sedimentary development of Selendi and Uşak-Güre basins: a contribution to the discussion on the development of east-west and north-trending basins in western Turkey. *Geological Magazine*, 134: 163-175, 1997.
- [27] M.C. Alçiçek, S. Mayda and H. Alçiçek, Faunal and palaeoenvironmental changes in the Çal Basin, SW Anatolia: Implications for regional stratigraphic correlation of late Cenozoic basins. *Comptes Rendus Geoscience*, 344: 89-98, 2012.
- [28] Ö. Karaoğlu, C. Helvacı ve E.Y. Ersoy, Petrogenesis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the volcanic rocks of the Uşak and Güre basins, western Türkiye. *Lithos*, 119: 193-210, 2010.
- [29] G. Seyitoğlu, M.C. Alçiçek, V. Işık, H. Alçiçek, S. Mayda, B. Varol, I. Yılmaz ve K. Esat, The stratigraphical position of Kemiklitepe fossil locality (Eşme, Uşak) revised: Implications for the Late Cenozoic sedimentary basin development and extensional tectonics in western Turkey. *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaeontologie*, 251: 1-15, 2009.
- [30] A. Xafis, S. Mayda, M.C. Alçiçek, T. Kaya, K. Halaçlar, F. Grimsson and D. Nagel, Large giraffid remains (Mammalia, Ruminantia) from the new late Miocene locality Kemiklitepe-E (Western Anatolia, Turkey). *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 101(3):853-867, 2020.
- [31] O. Sickenberg, Die Gliederung des höheren Jungtertiärs und Altquartärs in der Türkei nach Vertebraten und ihre Bedeutung für die internationale Neogen-Stratigraphie. *Geologisches Jahrbuch*, B15 (1975), pp. 1-167, 1975.
- [32] H.A. Cohen, C.J. Dart, H.S. Akyüz ve A. Barka, Syn-rift sedimentation structural development of the Gediz and Menderes Graben, Western Turkey. *Journal of the Geological Society*, 152: 629-638, 1995.
- [33] Z. Çakır, Aktif normal fayların segmentasyonu ve bunun traverten depolanmasına etkisi; Batı Anadolu bölgesinden örnekler. *Aktif Tektonik Grubu Birinci Toplantısı Makaleler*, 124-137, 1997.
- [34] R.J. Huggett, Fundamentals of Geomorphology. 2nd Edition, Master e-book, New York, 2007.
- [35] B.R. Bierman ve D. Montgomery, Key Concepts in Geomorphology. MacMillan Press, New York, 2013.
- [36] R.S. Anderson ve S.P. Anderson, Geomorphology: the mechanics and chemistry of landscapes. *Cambridge University Press*, 2010.
- [37] K. Szramek, L.M. Walter, T. Kanduč, N. Ogrinc, Dolomite versus calcite weathering in hydrogeochemically diverse watersheds established on bedded carbonates (Sava and Soča Rivers, Slovenia). *Aquat Geochem* 17:357–396. <https://doi.org/10.1007/s10498-011-9125-4>, 2011.
- [38] T. Waltham, Karst terrains. In: Fookes, P.G., Lee, M. & Milligan, G. (eds) *Geomorphology for Engineers*. Whittles Press, Caithness, 2003.
- [39] N. Pekcan, Karst Jeomorfolojisi. Filiz Kitabevi, İstanbul, 1999.
- [40] S. Polat ve S. Karşı, Karahallı (Uşak) İlçesinde Lapyalı Kalker Sökümü ve Çevresel Etkileri. Ulusal Jeomorfoloji Sempozyumu, ss. 54-63, 20-23 Ekim, Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, 2008.
- [41] İ. Atalay, Genel Fiziki Coğrafya. Meta Basım, İzmir, 2005.
- [42] M.O. Baykara, Çokrağan-Yukarı Karacahisar (Banaz-Uşak) Karstik Kaynaklarının Hidrojeolojik İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, İzmir, 2007.
- [43] A. Sür, Karstik Yerşekilleri ve Türkiye’den Örnekler. *Ankara Üniversitesi Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, 3: 1-28, Ankara, 1994.
- [44] L. Nazik, M. Poyraz, M. Karabıykoğlu, Karstic landscapes and landforms in Turkey. *Landscapes and landforms of Turkey*, 181-196, 2019.

-
- [45] S. Erınç, Jeomorfoloji II. Der Yayınevi: 3, İstanbul, 2001.
- [46] N. Günel, Yukarı Gediz Havzasının Bitki Coğrafyası. Çantay Kitabevi, Melisa Matbaacılık, İstanbul, 2003.
- [47] R. J. Dunham, Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In W. E. Ham (Ed.), Classification of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1, pp. 108-121, 1962.
- [48] R.L. Folk, Practical petrographic classification of limestones. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 43:1-38, 1959.
- [49] R. L. Folk, Spectral subdivision of limestone types. In W. E. Ham (Ed.), Classification of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologists Memoir 1, pp. 62-84, 1962.

DETERMINING CAPTURE CROSS SECTION FROM CAPTURE TRANSIENT SIGNALS

YAKALAMA GEÇİŞ SİNYALLERİNDEN YAKALAMA KESİT ALANINI BELİRLEME

Ömer Göksel ERBAŞ^{*1,2} Yaşar Gürkan ÇELEBİ²

¹ Institute of Graduate Studies in Sciences, Istanbul University, 34116, Istanbul, Türkiye.

² Physics, Faculty of Science, Istanbul University, 34134, Istanbul, Türkiye.

ABSTRACT

The characterization of defect levels within a semiconductor using capacitive methods is based on manipulating the width of the depletion region through pulsed biasing. During the measurement, the processes of charge emission and subsequent charge capture at the defect energy levels occur sequentially. The aim of this study is to investigate defect energy levels by analyzing both charge capture and emission processes and to determine the capture cross section using the capture capacitance transient signal. In this study, a method is proposed where the capture cross section could be calculated directly from the capture capacitance transient signals. The charge capture process occurs in two distinct regions, known as the fast and slow capture regions, with the slow capture region becoming dominant under specific conditions. In this study, the activation energy of the defect level in the boron-doped Si sample was determined to be in the range of 0.159–0.216 eV using the Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) method. The capture cross section was determined as an average of $\sigma_n = 1.03 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ from the capacitance transient signals of the charge emission process. In contrast, when using the capture capacitance transient signals, the average value of the capture cross section was calculated as $5.62 \times 10^{-11} \text{cm}^2$.

Keywords: Capture Cross Section, Defect, DLTS, Trap.

ÖZET

Yarıiletken içerisindeki kusur seviyelerinin kapasitif yöntemlerle karakterizasyonu, arınmış bölge genişliğinin pulslu beslemeler ile manipüle edilmesine dayanır. Ölçüm sırasında, kusur enerji seviyelerinde yük yayını ve ardından yük yakalanması ardışık süreçler olarak gerçekleşir. Bu çalışmanın amacı, hem yük yakalama hem de yayınlama süreçlerini analiz ederek kusur enerji seviyelerini araştırmak ve yakalama kapasite geçiş sinyalinin kullanarak yakalama tesir kesit alanını belirlemektir. Bu çalışmada, yakalama tesir kesit alanının doğrudan yakalama kapasite geçiş sinyalinden hesaplanabileceği bir yöntem önerildi. Yük yakalama süreci, hızlı ve yavaş olmak üzere iki farklı bölgede gerçekleşmekte olup, belirli koşullar altında yavaş yakalama bölgesi baskın hale gelmektedir. Bu çalışmada kullanılan boron katkılı Si örneğin kusur seviyesinin aktivasyon enerjisi, Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi (DLTS) yöntemi kullanılarak 0.159-0.216 eV aralığında belirlenmiştir. Yük yayınlama sürecine ait kapasite geçiş sinyallerinden yakalama tesir kesit alanı ortalama $\sigma_n = 1.03 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, yakalama kapasite geçiş sinyalleri kullanıldığında, yakalama tesir kesit alanının ortalama değeri $5.62 \times 10^{-11} \text{cm}^2$ olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: DLTS, Kusur, Tuzak, Yakalama Tesir Kesit Alanı.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: oge@istanbul.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
03.02.2025	13.02.2025	03.03.2025	01.06.2025

1. INTRODUCTION

The identification of trap levels caused by defects in semiconductor materials is crucial in semiconductor manufacturing and characterization. These trap levels, by capturing free carriers, not only alter the free carrier concentrations in the device but also act as recombination centers, reducing the device's efficiency. In particular, in optical devices, recombination centers cause non-radiative transitions, or in devices designed as solar cells or detectors, they trap free carriers generated by photons, leading to a decrease in the device's efficiency. Therefore, the characterization of trap levels is crucial for improving device design. Many common defect characterization methods are based on capacitive techniques, with one such method being deep level transient spectroscopy (DLTS) [1]. Using the DLTS method, the activation energy and concentration of defects in the semiconductor can easily be calculated. However, determining the capture cross-section requires time-consuming and repetitive experiments. DLTS methods are based on the capacitance variation in the depletion region, which changes by the applied external voltage, and the resulting capacitance transients are analyzed as a function of time as the temperature of the sample is scanned. The rate of this change in capacitance is governed prominently by the ionization rate of defect levels. The emission process of charges occurs on the order of approximately 10^{-3} seconds and can be observed with commonly used DLTS equipment. When the applied external voltage is removed or reduced, the trap levels capture charges again. The charge capture and emission processes are described by the Shockley-Read-Hall (SRH) mechanism [2,3]. For thermal equilibrium, the capture and emission rates of a trap level with an activation energy E_a at temperature T are related by the equation:

$$e_n = C_n \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

In this equation, e_n represents the charge emission rate, C_n denotes the charge capture rate, E_a is the activation energy, k is the Boltzmann constant, and T is the corresponding temperature. A rough estimate shows that at room temperature, the charge capture rate for a trap level located 0.4 eV below the conduction band is 10^6 times higher than the emission rate. Due to the much faster nature of the capture process compared to the emission process, it is challenging to observe.

When capacitive methods are applied for semiconductor characterization, it is generally assumed that there are no free charge carriers within the depletion region and that all trap levels in the region are ionized. However, Kimerling's study [4] shows that the trap levels located in the region between the depletion boundary (W) and the point where the trap energy level E_a equals the Fermi level E_F denoted as λ in Figure 1a are occupied by charges under thermal equilibrium. The same study also indicates that, when solving the Poisson equation for the depletion region, the free charge carrier concentration (n) changes from the depletion boundary toward the junction point, as given by:

$$n(x) = n_0 \exp\left[-\frac{(W-x)^2}{2L_D^2}\right] \quad (2)$$

Here, n_0 represents the free charge carrier concentration outside the depleted region, and L_D is referred to as the Debye length, expressed by Equation 3. The Debye length depends only on the dopant concentration, the material's dielectric constant, and temperature.

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon kT}{q^2 N_D}} \quad (3)$$

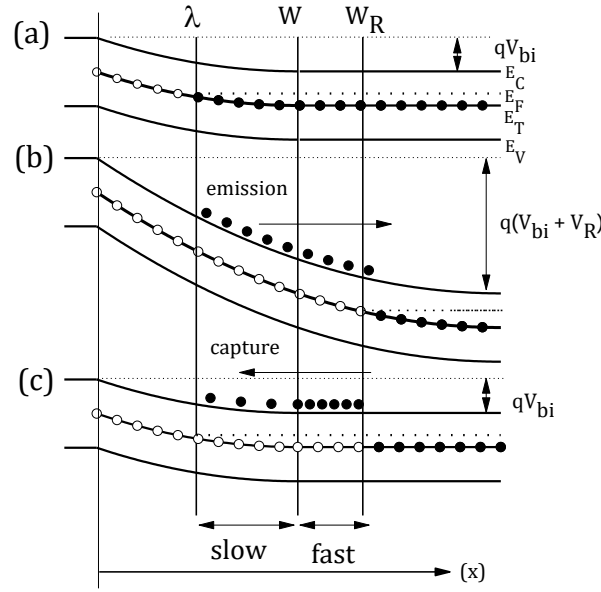


Figure 1. (a) Energy band diagram of a p^+n junction in thermal equilibrium, showing the width of the depletion region. The black circles represent occupied trap levels, while the white circles represent unoccupied trap levels relative to the Fermi level. (b) Energy band diagram illustrating charge emission from trap levels above the Fermi level and the change in the depletion region when external bias is applied. (c) Energy band diagram depicting the charge capture process of trap levels at the moment the external bias on the junction is removed.

Initially, in the thermal equilibrium state, the filled trap levels near the edge of the depleted region remain above the Fermi level when an external reverse bias is applied, allowing them to emit their charges into the conduction band, and these traps are now found in an unoccupied state (Figure 1b). The emptied trap levels fall below the Fermi level again when the reverse bias is removed, and they capture free charge carriers from the conduction band (Figure 1c). Studies by Borsuk et al. [5] and Zylbersztejn [6] show that the charge capture process occurs in two regions: fast and slow. The charge capture time constant depends on the concentration of free charge carriers and ϑ_{th} the thermal velocities of the free charges, as well as σ_n the capture cross-section of the defect (Equation 4). The thermal velocities of the free carriers depend on the temperature and the effective masses of the free charges. As soon as the reverse bias is removed, the free charge carriers rapidly diffuse into the region outside the depleted area, where the concentration of free charge carriers is constant and equal to the doping concentration, and the fast capture process occurs here. Within the boundary of the depleted region, however, the carrier concentration decreases exponentially toward the junction, where the slow capture process takes place.

$$C_n = \sigma_n \vartheta_{th} n(x) = \sigma_n \sqrt{\frac{3kT}{m_n^*}} n(x) \quad (4)$$

In pulsed capacitance measurements where the capture and emission processes follow one another, both fast and slow capture processes occur. However, the measurement parameters determine the dominance of the fast and slow processes on the capacitance signal. Most of the studies conducted so far have focused on the effects of parameters related to the capture process on the emission process. Based on these effects, the defect's capture cross section has been characterized through changes in the capacitance transition signal during the defect's charge emission process. Studies employing these techniques can be found in references [7-13]. In this study our aim is to determine the capture cross section of defects directly from the capacitance transient signals observed during the capture process.

2. MATERIALS AND METHODS

A boron-doped p-type silicon wafer, purchased from an external supplier, with a resistivity of 20-50 Ohm·cm, thickness of 300 microns, and a (100) orientation, was used for the work. The p-type boron-doped Si wafer was bombarded with electrons having an energy of 40–80 GeV at the SPS North Area H2 beamline, with a particle flux of 20k particles per second. Subsequently, circular aluminum contacts with a diameter of 1 mm were deposited on the wafer using the thermal evaporation method with a mask, forming a Schottky diode. This diode was used to study the charge capture and emission processes at the defect levels. The current-voltage (IV) measurements confirmed the diode behavior, and the ionized dopant concentration was determined to be $3.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ using the capacitance-voltage (CV) method. In order to record the temperature-dependent capacitance transients during the capture and emission processes, a digital version of deep level transient spectroscopy setup was established.

DLTS is a thermal spectroscopy method. When the width of the depletion region of the sample is increased with an applied external bias, charge emission occurs from trap levels above the Fermi level to the conduction band. During the emission process, the time-dependent capacitance change of the sample is recorded for the relevant temperature. To analyze the capacitance transient signals, the difference in capacitance values at two different moments, t_1 and t_2 , is plotted as a function of temperature to create a DLTS spectrum. The selected t_1 and t_2 values form a rate window. A peak appears in the DLTS spectrum at the temperature where the emission rate of the trap level matches the selected rate window. By choosing different rate windows, temperature-dependent emission values are obtained, and the activation energy of the trap is calculated using SRH statistics (see reference 1 for details).

The DLTS measurement system included a Boonton 7200 capacitance meter for capacitance transient measurements, an Agilent 81150 function generator for applying pulsed voltages, and an Agilent 3458A multimeter for digitizing capacitance signals. The system operated in vacuum to maintain temperature stability and under dark conditions to prevent light-induced effects. The temperature of the sample was controlled and measured with a Lakeshore 331 controller within the range of 300K to 100K.

3. RESULTS

The time-dependent changes in capacitance during charge emission and capture processes are described by equations 5 and 6, respectively.

$$C_e(t) \cong C_{e_{\text{inf}}} \left(1 - \frac{N_T}{2N_D} e^{-t/\tau_e} \right) \quad (5)$$

$$C_c(t) \cong C_{c_{\text{inf}}} \left[1 - \frac{N_T}{2N_D} (1 - e^{-t/\tau_c}) \right] \quad (6)$$

In the equations, $C_{e_{\text{inf}}}$ represents the equilibrium capacitance value reached by the sample capacitance during emission, $C_{c_{\text{inf}}}$ represents the equilibrium capacitance value during the capture process, N_T is the trap concentration, N_D is the dopant concentration, τ_e is the emission time constant of the trap, and τ_c is the capture time constant. To observe these processes, the capacitance-voltage (CV) measurement of the sample was first performed, and the depth-dependent dopant concentration was determined. Depth-dependent defect characterization is one of the strongest features of the DLTS method, as the width of the depleted region or, alternatively, the depth to be examined can be determined by the applied voltage. Therefore, the work voltage was set to this range, corresponding to depths between 0.65V and 0.45V, due to the significant change in dopant concentration observed, which indicates the presence of thermally active traps. And the sample was subjected to a 0.45 V bias for 61 ms, during which the charge emission process occurred. This was followed by reducing the bias to 0.5 V for 60 ms, allowing the charge capture process to take place. Capacitance changes were recorded every 30 μs during these processes. Repeating the measurements 300 times helped minimize the standard deviation and enhance the signal-to-noise ratio. Figure 2 illustrates the time-dependent capacitance transients from the Si sample at different temperatures, corresponding to the capture and emission processes. As seen in Figure 2, the capacitance transient signals associated with the capture and emission processes are temperature-

dependent. In both processes, as the temperature increases, the rate of the capacitance transient signal increases. It may be possible to analyze both parts of the capacitance transient signals (capture and emission) using the DLTS method to gain more information about the trap. However, it is essential to first identify the conditions under which this analysis is feasible.

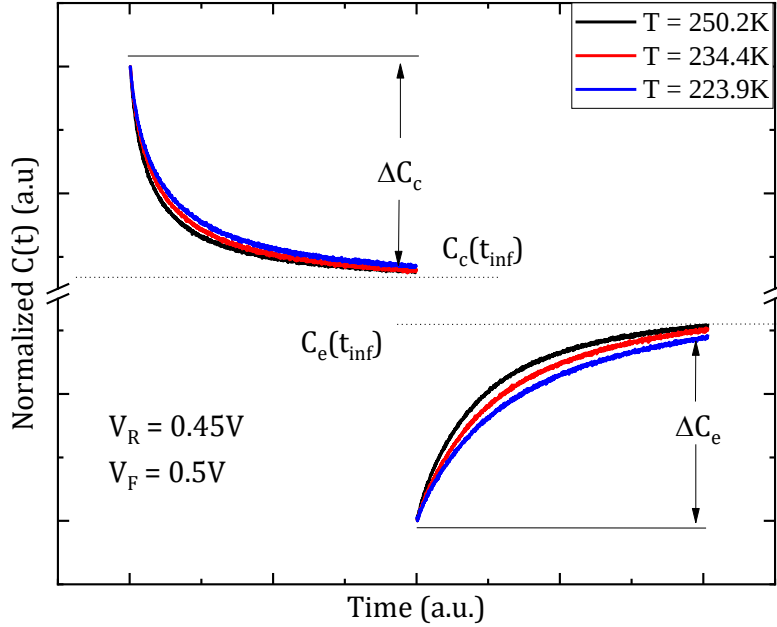


Figure 2. The variation in sample capacitance corresponding to the charge capture and emission processes within the relevant depletion region at different temperatures. The feedback voltage was reduced to 4.75 V to initiate the charge capture process and increased to 5 V for the charge emission process.

As mentioned in the Introduction, the charge capture process occurs in two distinct regions: fast and slow. The capture process manifests as a superposition of these two regions. Therefore, Equation 6 can be expressed by separating the fast and slow capture processes as follows:

$$C_c(t) = C_{c_{inf}} \left[1 - \frac{N_{T_{fast}}}{2N_D} \left(1 - e^{-t/\tau_{c_{fast}}} \right) - \frac{N_{T_{slow}}}{2N_D} \left(1 - e^{-t/\tau_{c_{slow}}} \right) \right] \quad (7)$$

Since the charge capture and emission processes follow each other, this implies that when the applied reverse bias voltage is increased, the defects remain above the Fermi level and emit charges; conversely, when the feedback voltage is reduced, they capture charges. In this case, the amplitudes of the capacitance transient signals corresponding to these two different processes should be similar. However, our measurements indicate that the amplitude of the capacitance signal associated with the capture process is smaller than that of the emission signal. In this study, the changes in the capacitance signal were recorded at a rate of $30 \mu s^{-1}$. Generally, the charge capture time constant for defect levels ranges from picoseconds to milliseconds. The recording speed of the capacitance transition signals in this study was only sufficient to capture the slow capture processes, as the fast capture process occurred before a sufficient number of data points could be collected.

As the difference between the applied voltages during the capture and emission processes increases, the width of the depletion region where the fast capture process occurs will also increase. In this case, the amplitude of the transient signal associated with the charge emission process for the relevant defects

will increase. However, since the major part of the capture process occurs rapidly, it can not be recorded. Therefore, as the difference between the voltages corresponding to the capture and emission processes increases, the ratio of the amplitude of the capture signal to that of the emission signal will decrease.

Figure 3 illustrates the DLTS spectra for capture and emission signals obtained at a rate window of 48.7 s^{-1} , with an emission voltage of 0.45 V and a capture voltage of 0.5 V , in the temperature range of 300 K to 100 K . As shown in Figure 2, the capacitance transient signal consists of two parts: capture and emission. Accordingly, the DLTS spectrum marked as 'capture' in Figure 3 is derived from the capacitance change in the capture part of the capacitance transient signal, while the 'emission' part corresponds to the capacitance change in the emission section of the signal. As indicated in Equations 5 and 6, the processes are reversible, leading to symmetrical spectra. To clearly observe the alignment with the emission process, the capture DLTS spectrum has been inverted (Figure 3b).

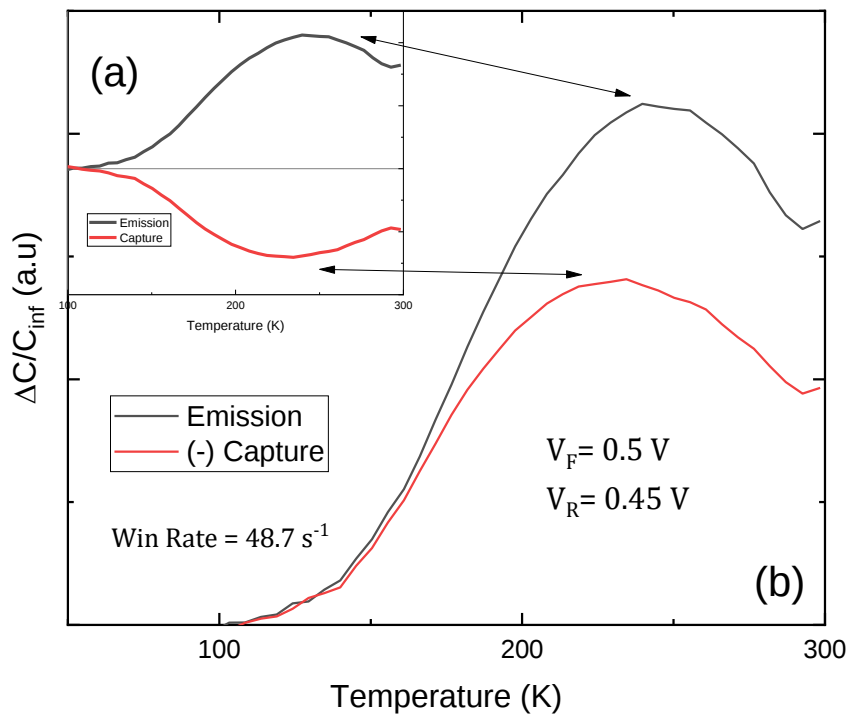


Figure 3. (a) DLTS spectra obtained from the capacity transition signals associated with capture and emission, recorded at a rate of 48.7 s^{-1} . **(b)** The capture spectrum is multiplied by (-1) for better visualization of the spectrum alignment.

In the DLTS spectra of the emission and capture processes, the peak corresponding to the trap indicated by the arrow in Figure 3 shows a lower amplitude for the capture process. This is because the rapid capture transition could not be adequately measured.

Consequently, at a temperature of 250 K where the trap is active, the emission voltage was kept constant at 0.45 V , while the capture voltage was set to 0.65 V , 0.6 V , 0.55 V and 0.5 V to decrease the width of the depletion region and observe the effect of the fast and slow capture processes more distinctly. Adjusting the differences between these voltages allowed for the differentiation of fast and slow capture processes.

To observe both processes over approximately the same time frame, the capture time was set to 60 ms , and the emission time to 61 ms . Additionally, to reduce the noise in the signal, each measurement was repeated 300 times, and the average was taken. Figure 4 shows the amplitude of the capture capacitance transition signal relative to the emission signal for different capture voltages.

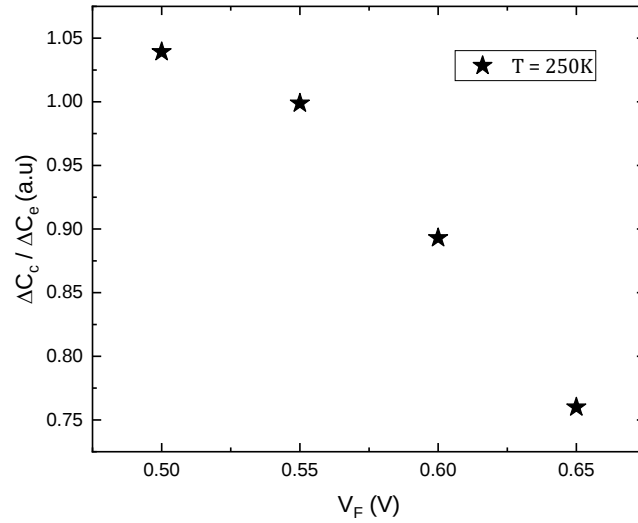


Figure 4. Variation of the ratio of capture and emission capacitance transient signal amplitudes at different capture voltage values at 250K temperature.

As the difference between the capture and emission voltages decreases, the fast capture region's influence wanes, giving way to a more prominent slow capture region. This change allows both the trapping (capture) and release (emission) processes to be detected in the capacitance transient signal amplitude. When the emission and capture amplitudes are equal, it indicates that both processes are being observed effectively. To study the temperature dependence of the slow capture region, measurements were repeated at different temperatures. Figure 5 shows how the ratio of the capture to emission signal amplitudes changes with temperature. For all capture voltage values at the same emission voltage, this ratio decreases as the temperature increases. As will be shown in the following section, the change in free charge carrier concentration causes the fast capture process to become dominant over the slow capture process as the temperature increases.

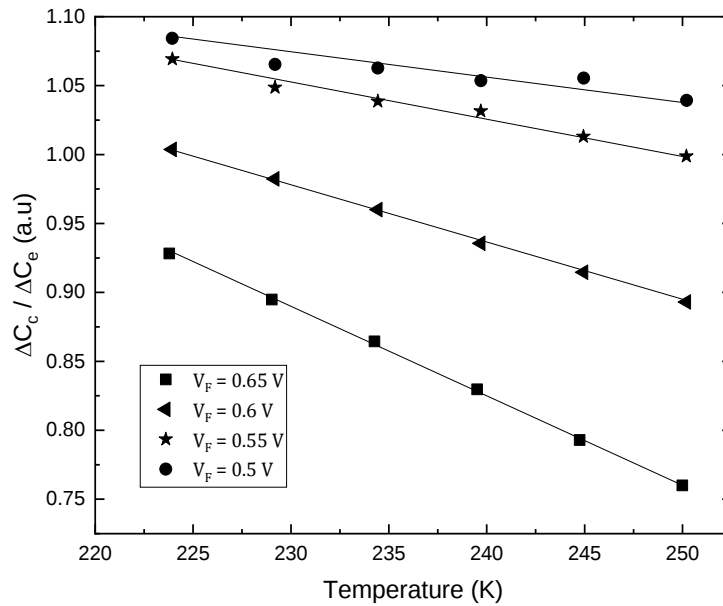


Figure 5. Temperature-dependent variation of the ratio of capture to emission capacitance transient signal amplitudes.

The capture and emission rates exhibit an exponential increase with temperature; this exponential behavior for the emission rate aligns with expectations from the Shockley-Read-Hall (SRH) mechanism. The activation energy of the defect is determined from the temperature-dependent emission rates using Equation 8 [1]. The Arrhenius plots constructed from the emission rates associated with the emission process in the capacitance transient signals are presented in Figure 6. Averaging across all capture voltage values, the activation energy is calculated to be 190 ± 25 meV. The γ value obtained from the graph intercepts allows for the determination of the capture cross-section of the trap, which is between $1.22 \times 10^{-16} - 5.61 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$.

$$\ln(e_n/T^2) = \ln \gamma + (1000/T)(-E_a/1000k) \quad (8)$$

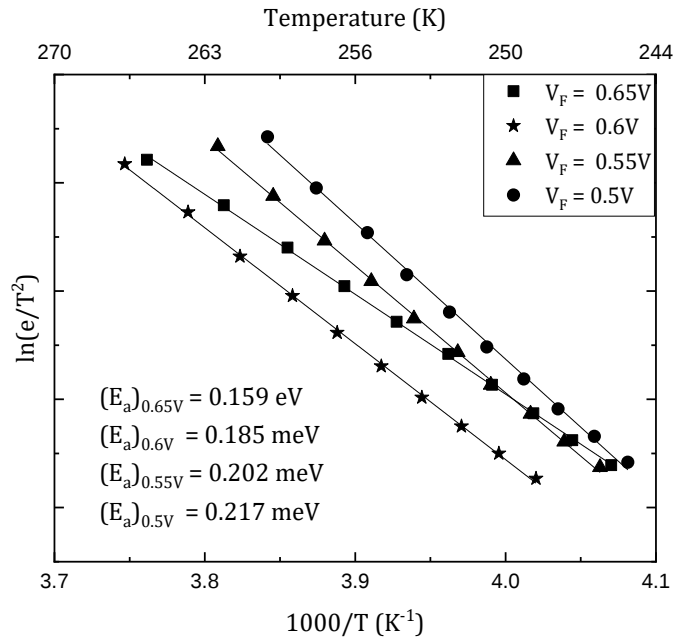


Figure 6. Arrhenius plots obtained from the temperature-dependent emission rates for different capture voltage values. The average trap activation energy is calculated to be 190 ± 25 meV. The intercepts also give rise to similar capture cross section values that averages to $1.12 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ with a standard deviation of $\pm 1.03 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$.

The free charge carrier concentration $n(x)$ is equal to the doping concentration N_d in all neutral regions outside the depletion region. As one moves from the depletion region boundary toward the junction, the potential barrier height $\Delta\Psi(x)$ that the carriers will encounter increases. The change in carrier concentration corresponding to the barrier height increase is given by Equation 9. Accordingly, the free carrier concentration decreases exponentially from the depletion region boundary toward the junction region and eventually depletes [5].

$$n(x) = N_d \exp \left[-\frac{q|\Delta\Psi(x)|}{kT} \right] \quad (9)$$

Since the trap energy level's charge capture rate depends on the carrier concentration, the charge capture rate in the fast capture region (Figure 1) can be expressed by Equation 10, while in the slow capture region, it is represented by Equation 11.

$$C_n(x) = \sigma_n \vartheta_{th} N_d, \quad W < x < W_R \quad (10)$$

$$C_n(x) = \sigma_n \vartheta_{th} N_d \exp \left[-\frac{q|\Delta\psi(x)|}{kT} \right], \quad \lambda < x < W \quad (11)$$

Here, W is the depletion region boundary while the capture voltage is applied, and W_R is the depletion region boundary while the emission voltage is applied. The point λ corresponds to where the Fermi level E_F equals the trap energy level E_T . The thermal velocities of free carriers, $\vartheta_{th} = \sqrt{3kT/m_n^*}$, depend on temperature and the effective masses of the carriers. Equation 11 can be rearranged as in Equation 12, and by the help of an Arrhenius plot (Figure 7), the barrier height and capture cross-section can directly be calculated from the graph.

$$\ln \left(\frac{C_n}{\sqrt{T}} \right) = \ln \left(\sigma_n N_d \sqrt{\frac{3k}{m_n^*}} \right) + \left(-\frac{q|\Delta\psi(x)|}{1000k} \right) \left(\frac{1000}{T} \right) \quad (12)$$

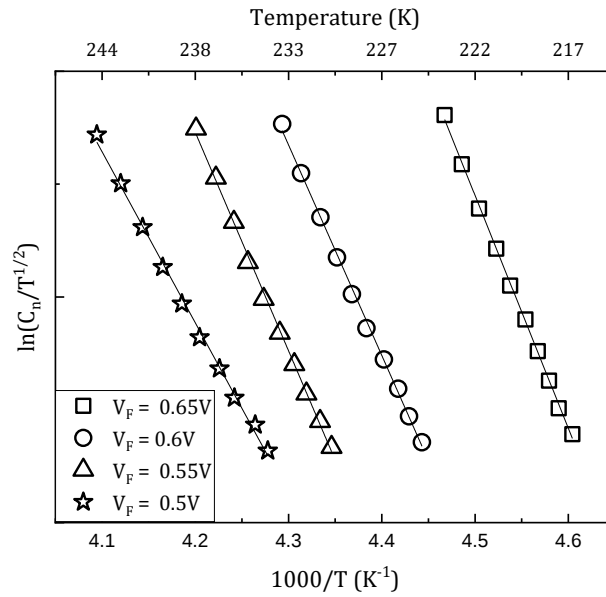


Figure 7. Arrhenius plot illustrating the temperature-dependent capture rates used to determine the capture cross-section and barrier heights. The plot displays four linear lines, each corresponding to different capture voltages indicating the effect of fast capture process becoming more dominant with increasing pulse heights.

Using capacitance-voltage (CV) measurements, the free carrier concentration, attributed to the doping concentration, was determined to be $3.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. The effective mass of the p type Si carriers was taken as $0.5m_0$. The calculated capture cross-section values corresponding to the different applied capture voltages and the heights of the potential barriers are shown in Table 1.

Table 1. Capture Cross-Section Values and The Heights of Potential Barriers Corresponding to The Different Applied Capture Voltages

Emission Voltage (V)	Capture Voltage (V)	$q \Delta\psi(x) $ (eV)	Capture Cross Section (cm^{-2})
0.45	0.65	0.44	2.02×10^{-10}
0.45	0.6	0.40	9.64×10^{-12}
0.45	0.55	0.42	1.30×10^{-11}
0.45	0.5	0.33	1.04×10^{-13}

According to the Table 1, as the difference between the capture and emission voltages increases, both the calculated capture cross-section values of the defect and the average potential barrier heights at which the capture process occurs show an increasing trend. This observation suggests an important relationship between voltage differences and the calculated defect parameters, potentially impacting our understanding of defect behavior in the material.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

This study demonstrates that the capture process consists of two parts, and as the difference between the capture and emission voltages decreases, the effectiveness of the slow capture region within the depletion region increases. It was observed that the width of the slow region depends also on temperature, with its influence diminishing as the temperature rises. This is because the slow capture process directly depends on the decrease in carrier concentration toward the junction region, and the carrier concentration itself is an exponential function of both the potential barrier height near the junction and temperature. As temperature increases, the exponential term becomes negligible, causing the slow capture rate to converge toward the rate formulation of the fast capture process. This indicates that the fast and slow charge capture behaviors of defects are related to their positions within the junction region. Since this directly affects the operational efficiency of devices, it is a critical parameter that must be considered in defect characterization and device design. The trap activation energy calculated from the analysis of the capacitance transient signals related to emission was found to be around 0.159–0.216 eV, while the capture cross section was determined to be $1.12 \times 10^{-16} \pm 1.03 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$. The reason for this variation in the energy range is that, as seen from the width of the DLTS spectrum, the DLTS peak corresponds to multiple defects with closely spaced energy levels rather than a single, well-defined defect. Instead of a sharp peak representing a single defect, the defects behave like a band consisting of closely spaced energy levels. As the voltage range changes, the dominance of one defect over another shifts, and the activation energy obtained from the spectrum corresponds to the most dominant defect. The capture cross section obtained from the capture capacitance transient signal was calculated to be in the range of 10^{-10} cm^2 to 10^{-13} cm^2 . The significant discrepancy and the tendency not to report capture cross section values or to do so with uncertainty in many defect characterization studies arise from the inconsistencies encountered when using emission rates to determine the capture cross section [7, 14-17].

Determining the capture cross sections of traps in a semiconductor device is crucial, as the operation of most devices relies on the capture and emission processes. In this study, the mechanisms of slow and fast charge capture processes of defects located in the junction region were identified. In addition to analyzing the charge emission processes of traps, examining their charge capture processes can also be utilized for trap characterization, particularly in calculating the capture cross section. The method can be better tested and improved in the presence of a well-known defect with a homogeneous distribution throughout the sample. This would allow for more precise and detailed calculations of the capture cross section's dependence on temperature and its position within the sample. As semiconductor device dimensions continue to shrink with advancing technology, even the smallest defects have become critical parameters, making defect characterization increasingly important. The development of the technique proposed in this study could contribute to capacitive defect characterization methods by introducing a new approach.

REFERENCES

- [1] D.V. Lang, Deep Level Transient Spectroscopy: A New Method to Characterize Traps in Semiconductors, J. Appl. Phys. 45(7), 3023-3032, 1974.
- [2] W. Shockley, W.T. Read, Statistics of the Recombination of Holes and Electrons, Phys. Rev. 87(5), 835-842, 1952.
- [3] R.N. Hall, Electron-Hole Recombination in Germanium, Phys. Rev. 87(2), 387-387, 1952.
- [4] L.C. Kimerling, Influence of Deep Traps on the Measurement of Free-Carrier Distributions in Semiconductors by Junction Capacitance Techniques, J. Appl. Phys. 45(4), 1839-1845, 1974.

-
- [5] J.A. Borsuk, R.M. Swanson, Capture-Cross-Section Determination by Transient-Current Trap-Filling Experiments, *J. Appl. Phys.* 52(11), 6704-6712, 1981.
 - [6] A. Zylbersztejn, Trap Depth and Electron Capture Cross Section Determination by Trap Refilling Experiments in Schottky Diodes, *Appl. Phys. Lett.* 33(2), 200-202, 1978.
 - [7] J.T. Ryan, A. Matsuda, J.P. Campbell, K.P. Cheung, Interface-State Capture Cross Section—Why Does It Vary So Much?, *Appl. Phys. Lett.* 106(16), 163503, 2015.
 - [8] J. Lauwaert, J. Van Gheluwe, P. Clauws, An Accurate Analytical Approximation to the Capacitance Transient Amplitude in Deep Level Transient Spectroscopy for Fitting Carrier Capture Data, *Rev. Sci. Instrum.* 79(9), 093902, 2008.
 - [9] S. Kumar, P. Gupta, I. Guiney, C.J. Humphreys, S. Raghavan, R. Muralidharan, D.N. Nath, Temperature and Bias Dependent Trap Capture Cross Section in AlGaIn/GaN HEMT on 6-in Silicon with Carbon-Doped Buffer, *IEEE Trans. Electron Devices* 64(12), 4868–4874, 2017.
 - [10] J.H. Zhao, T.E. Schlesinger, A.G. Milnes, Determination of Carrier Capture Cross Sections of Traps by Deep Level Transient Spectroscopy of Semiconductors, *J. Appl. Phys.* 62(7), 2865-2870, 1987.
 - [11] D. Pons, Determination of the Free Energy Level of Deep Centers, with Application to GaAs, *Appl. Phys. Lett.* 37(4), 413-415, 1980.
 - [12] D. Pons, Accurate Determination of the Free Carrier Capture Kinetics of Deep Traps by Space-Charge Methods, *J. Appl. Phys.* 55(10), 3644-3657, 1984.
 - [13] D. Stievenard, J.C. Bourgoin, M. Lannoo, An Easy Method to Determine Carrier-Capture Cross Sections: Application to GaAs, *J. Appl. Phys.* 55(6), 1477-1481, 1984.
 - [14] F.D. Auret, S.A. Goodman, M.J. Legodi, W.E. Meyer, D.C. Look, Electrical Characterization of Vapor-Phase-Grown Single-Crystal ZnO, *Appl. Phys. Lett.* 80(8), 1340–1342, 2002.
 - [15] E. Omotoso, E. Igumbor, W.E. Meyer, DLTS Characterisation of 107 MeV Krypton Ion-Irradiated Nitrogen-Doped 4H-Silicon Carbide, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 36(3), 2025.
 - [16] A. Kumar, S. Mondal, K.S.R. Koteswara Rao, Probing the Oxygen Vacancy Associated Native Defects in High- κ HfO₂ Using Deep Level Transient Spectroscopy, *J. Appl. Phys.* 135(4), 045305, 2024.
 - [17] C.A. Dawe, V.P. Markevich, M.P. Halsall, I.D. Hawkins, A.R. Peaker, A. Nandi, I. Sanyal, M. Kuball, Deep Level Traps in (010) β -Ga₂O₃ Epilayers Grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition on Sn-Doped β -Ga₂O₃ Substrates, *J. Appl. Phys.* 136(4), 045705, 2024.

**EFFECT OF FREEZING AND STORAGE ON ASCORBIC ACID AND B-CAROTENE
CONCENTRATION OF FROZEN RED PEPPER (*CAPSICUM ANNUUM L.*)**

***DONDURMA VE DONDURULMUŞ DEPOLAMANIN KIRMIZI BİBERİN (*CAPSICUM
ANNUUM L.*) ASKORBİK ASİT VE B-KAROTEN KONSANTRASYONU ÜZERİNE ETKİSİ***

Ceylan METINOGLU¹  Engin DEMIRAY^{*1}  Yahya TULEK¹ 

¹ Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Pamukkale University, Denizli, Türkiye.

ABSTRACT

In this study, ascorbic acid and β -carotene, changes of red peppers were measured during the period of freezing with different temperature applications and the follow-up storage period at -20°C. For this purpose, samples were frozen at the environment temperatures of -30°C, -35°C and -40°C by using 0.5 m/s of air velocity until the temperature of -20°C was achieved in the sample core. During the freezing process, ascorbic acid and β -carotene levels were determined in defined temperature ranges in order to specify the changes in quality. Then, the frozen products stored for 3 months and at the end of each month, the amount of ascorbic acid and β -carotene concentrations were determined. According to the study results, the amount of ascorbic acid of fresh red pepper was 65.123 mg/100g of dry matter, while they were determined as 57.202, 61.305, and 63.949 mg/100g dry matter at the frozen temperature range of -30°C, -35°C and -40°C in frozen red pepper samples, respectively. Thus, β -carotene amount was 31.092 mg/100g dry matter in fresh red pepper, and it decreased to the levels of 29.093, 29.952 and 30.233 mg/100g dry matter at the temperatures of -30°C, -35°C and -40°C, respectively. Both ascorbic acid and β -carotene has been observed to be better preserved by lower ambient temperature of freezing in red pepper. In the storage period, the amount of ascorbic acid in red pepper was observed to decrease in time. However, β -carotene levels increased in red pepper samples depending on the time of frozen storage.

Keywords: Ascorbic Acid, Freezing, Frozen Storage, Red Pepper, β -Carotene.

ÖZET

Bu çalışmada, kırmızı biberlerin askorbik asit ve β -karoten değerlerinin farklı sıcaklık uygulamaları ile dondurulma ve -20°C'de takip eden depolama süresi boyunca değişimi ölçülmüştür. Bu amaçla, numuneler -30°C, -35°C ve -40°C ortam sıcaklıklarında 0,5 m/s hava hızı kullanılarak numune çekirdeğinde -20°C sıcaklık elde edilene kadar dondurulmuştur. Dondurma işlemi sırasında, kalite değişimlerini belirlemek için askorbik asit ve β -karoten seviyeleri belirlenen sıcaklık aralıklarında belirlenmiştir. Daha sonra dondurulmuş ürünler 3 ay boyunca depolanmış ve her ayın sonunda askorbik asit miktarı ve β -karoten konsantrasyonları belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, taze kırmızı biberin askorbik asit miktarı 65.123 mg/100g kuru madde iken, dondurulmuş kırmızı biber örneklerinde -30°C, -35°C ve -40°C dondurulmuş sıcaklık aralığında sırasıyla 57.202, 61.305 ve 63.949 mg/100g kuru madde olarak belirlenmiştir. Böylece, taze kırmızı biberde 31.092 mg/100g kuru madde olan β -karoten miktarı -30°C, -35°C ve -40°C sıcaklıklarda sırasıyla 29.093, 29.952 ve 30.233 mg/100g kuru madde seviyelerine düşmüştür. Kırmızı biberde hem askorbik asit hem de β -karotenin daha düşük dondurma sıcaklıklarında daha iyi korunduğu gözlenmiştir. Depolama sürecinde kırmızıbiberdeki askorbik asit miktarının zamanla azaldığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Askorbik Asit, Dondurma, Donmuş Depolama, Kırmızı Biber, β -Karoten.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: edemiray@pau.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
07.01.2025	07.02.2025	21.02.2025	01.06.2025

1. INTRODUCTION

Red pepper, *Capsicum annuum* L., is from the *Solanaceae* family, as a tomato and eggplant, and the *Capsicum* genus. Red pepper is one of the most extensively consumed and commercially important vegetables in the world. It is rich in ascorbic acid and carotenoid content and is a very valuable food for human nutrition. Although red pepper is consumed both fresh and dried, it is also involved in the food industry as canned food, tomato paste, pepper juice, pickles, frozen products, fried products, and sauces, and as an antibiotic raw material for pharmaceuticals, feedstuffs, and production of dyes. It can also be used in seasoning mix, soft drinks, and production of ice cream and chewing gum [1, 2].

In the world, the basic methods used for food preservation in today's technology include high and low-temperature applications, drying, various mechanical treatments, chemical addition, fermentation, and irradiation. These methods are effectively and widely used in several food industry sectors [3]. Freeze preservation, which is included in the low-temperature application, is one of the most common and effective preservation methods used in many stages of the food industry such as production, storage, marketing, and consumption. Freezing is an important food preservation method that prevents the physical, chemical, and microbiological deterioration of the food by turning the water in the food into ice crystals and thus, ensuring that the food remains durable and of high quality for a long time. This method is based on the principle of inhibiting the reproduction and activity of microorganisms in the food at low temperatures and decelerating biochemical and chemical reactions as much as possible [4-6].

In freeze preservation, fruits and vegetables can be preserved as close to their fresh and high-quality states. In other words, frozen fruits and vegetables are better either fresh or properly cold-stored. The objective of this study was to evaluate the effect of freezing temperatures (-30, -35 and -40°C) and during frozen storage at -20°C for four months on the chemical quality (ascorbic acid and β -carotene contents) of red pepper.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Material

In the study, red peppers (*Capsicum annuum* L.) grown in Kale Region of the province of Denizli were used as material. Red pepper samples used in freezing experiments were purchased from the market in August, September, and October. During the laboratory study, the samples were stored in a polyethylene bag at 4°C in the refrigerator.

2.2. Chemicals

β -Carotene and ascorbic acid standards used in HPLC (High-Performance Liquid Chromatography) analyses were purchased from Sigma (St. Louis, MO, USA). HPLC grade hexane, acetonitrile, methanol, ethanol and dichloromethane were purchased from Merck (Darmstadt, Germany). β -Carotene standard solution was prepared in methanol (Merck, Darmstadt, Germany). The ascorbic acid standard solution was prepared with ultrapure water.

2.3. Methods

2.3.1. Freezing Procedure

Red peppers to be used in the freezing process were purchased at 2 kg batches and brought to the department laboratory. Attention was paid that red peppers in each batch had the same maturity level and uniform size. A 2 kg batch was taken from the pepper samples for each temperature (-30°C, -35°C, and -40°C) to be used in the freezing experiments. The red peppers were carefully washed. After washing, the red peppers were cleaned from their stems and seeds and vertically cut into two pieces. These pieces were sliced 30 mm (3 cm) wide. The sliced pepper samples were weighed at an average of 75 g in tared plastic containers, and they were closed with a plastic lid. The red pepper samples in plastic containers were prepared for quality analysis at 5 different core temperatures (0°C, -5°C, -10°C, -15°C, and -20°C) during the freezing process and were aligned on trays. In order to monitor the core temperature with the data logger (MS6D, Comet system, Czech Republic), a temperature probe was placed into one of the plastic containers from the edge and placed in the center of the sample and the

container was closed with a lid. Another temperature probe was placed inside the freezer (Elcold DK-9500, Hobro, Denmark) to monitor the ambient temperature. The prepared trays were placed in the freezer and the freezing process was performed at an airflow of 0.5 m/s provided by the fan placed in the freezer for all temperatures (-30°C, -35°C, and -40°C). The study was carried out in two parallels and two replicates.

2.3.2. Frozen Storage

The red pepper samples were prepared to be frozen at -30°C, -35°C, and -40°C while the samples to be examined during storage were also taken into the freezer. The samples were monitored during the freezing stage. When the core temperatures reached -20°C, the samples were transferred to the storage process and stored at -20°C for 3 months. The samples were separated for analysis at the end of each month. After 3 months of storage, ascorbic acid and beta carotene concentrations were determined at the end of each month.

2.4. Analysis

2.4.1. Determination of Ascorbic Acid Changes

The extraction method suggested by Demiray et al. [7] was used after some modifications. For this purpose, fresh and frozen red pepper samples were first sliced into small pieces and then passed through blender in order to completely disintegrate the tissue. 1 g of the pulp obtained after blending was weighed into polypropylene centrifuge tubes. Then, 25 mL of water containing 1% metaphosphoric acid was taken and transferred into the centrifuge tubes. The pulp mixture was passed through the homogenizer for homogenization. Then, centrifugation was carried out at $9,000 \times g$ at 5°C for 15 minutes. At the end of this procedure, phase separation was achieved in the centrifuge tubes and the supernatants were collected in glass tubes with a Pasteur pipette. Supernatants in glass tubes were passed through a 0.45 µm membrane filter before injection into the HPLC device.

In the analysis, Shimadzu LC-20AD (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) model HPLC device and the same model PDA (Photo-diode Array) detector were used. In the separation of ascorbic acid, ultrapure water whose pH was adjusted to 3 with H₃PO₄ solution was used as the mobile phase. Separation was performed with an ACE 5 C-18 column (250 × 4.6 mm, ID, 5 mm) (Advanced Chromatography Technologies, Aberdeen, Scotland) at a wavelength of 254 nm, isocratically at a flow rate of 0.5 mL/min. The injection volume used in the analysis was determined as 20 µL, and the column temperature was determined as 25°C.

2.4.2. Determination of β-Carotene Changes

Extraction process in samples for β-carotene analysis Demiray et al. [7] modified according to the method specified. For this purpose, seven grams of fresh, freezing, and frozen red pepper samples were carefully weighed and mixed with 70 mL of ethanol-hexane solution (4:3, v/v) containing 1% BHT (w/v). The mixture was homogenized by a homogenizer (Micra D-8, ART Prozess- & Labortechnik GmbH & Co. KG, Müllheim, Germany), and then transferred into a polypropylene centrifuge tube. As in the ascorbic acid analysis, the homogenized mixture was centrifuged at $9,000 \times g$ for 15 minutes at 5°C. At the end of this procedure, phase separation was achieved in the centrifuge tubes and the ethanol-hexane phase collected in the upper part was transferred into glass tubes using a Pasteur pipette. Supernatants collected in the glass tubes were passed through a 0.45 µm membrane filter before injection into the HPLC device (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan).

Chromatographic separations were carried out using a GL Sciences C18 (250×4.6 mm, ID 5 mm) column with isocratic elution. Mobile phase consists of 40% acetonitrile, 20% methanol, 20% ethanol and 20% dichloromethane. The column was equilibrated for 10 min prior to each analysis. Flow rate was 0.45 mL/min and injection volume was 20 µL.

2.4.3. Statistical Analysis

Statistical analyses of the data obtained as a result of the trials carried out in two parallels and two replications. Analysis of variance was applied to determine the effects of storage conditions, storage

time, and interactions between samples on ascorbic acid content and β -carotene content, and the significant differences were subjected to Duncan multiple comparison test ($p < 0.05$) [8].

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Changes in the Amount of Ascorbic Acid and β -Carotene During Freezing of Red Peppers

During the freezing of red peppers at -30°C , -35°C , and -40°C , samples were taken at certain temperatures and the amounts of ascorbic acid and β -carotene in the samples were determined. The values and the results of the analysis of variance are presented in Table 1.

The initial amount of ascorbic acid in red pepper was 65.12 ± 4.82 mg/100g dry matter. In a study, it was reported that fresh red peppers contain 107.4 ± 2.3 mg/100 g of dry matter ascorbic acid [9]. In another study in the literature, it was reported that fresh red pepper contains 41.7 mg/100 g of dry matter ascorbic acid. As can be understood from the results, the ascorbic acid content of red peppers may vary depending on many factors such as the species, growth conditions, maturity level [10, 11].

When the ascorbic acid values of the red peppers frozen at different freezing temperatures until reaching the -20°C core temperature were examined, it was determined that the ascorbic values of the red peppers frozen at -30 degrees were statistically different from the values at -35°C and -40°C during the freezing process. On the other hand, it was determined that ascorbic acid was preserved more as the freezing temperature decreased and that the lowest loss was at -40°C among the freezing temperatures studied. This shows that the freezing process applied for the preservation of fruits and vegetables preserves the nutrient content with the minimum loss. In a similar study conducted by Leong and Oey [12], it was stated that there was a slight decrease in the amount of ascorbic acid in frozen red peppers; however, this decrease was not statistically significant.

As for ascorbic acid, the change in the amount of β -carotene at the determined temperature ranges during the freezing of red pepper at different temperatures was tested. In the analyses performed prior to the freezing process, the amount of β -carotene was 31.09 ± 1.35 mg/100g of dry matter in fresh red pepper. As is known, the amount of carotenoid compounds in fruits and vegetables varies according to various factors such as variety, species, maturity, and growth conditions [13, 14]. It was seen that the amount of β -carotene contained in red peppers used in the study is consistent with the values given in the literature. In a study, it was reported that fresh red peppers contain 0.84 ± 0.18 mg/g of dry matter β -carotene [12]. Topuz and Özdemir [15] stated in their study that the amount of β -carotene in fresh red pepper was 359.6 ± 7.80 mg/kg dry matter.

Table 1. Average experimental data of ascorbic acid and β -carotene changes during the freezing process of red pepper samples at different temperatures*

Core Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	-30°C		-35°C		-40°C	
	Ascorbic Acid content (mg/100 g DM)	β -Carotene content (mg/100 g DM)	Ascorbic Acid content (mg/100 g DM)	β -Carotene content (mg/100 g DM)	Ascorbic Acid content (mg/100 g DM)	β -Carotene content (mg/100 g DM)
Fresh	65.12 ± 4.82^{aA}	31.09 ± 1.35^{aA}	65.12 ± 4.82^{aA}	31.09 ± 1.35^{aA}	65.12 ± 4.82^{aA}	31.09 ± 1.35^{aA}
0	61.61 ± 0.59^{abA}	29.52 ± 0.35^{aA}	65.07 ± 3.77^{aB}	29.23 ± 0.89^{aA}	65.03 ± 2.24^{aB}	29.74 ± 1.54^{aA}
-5	60.20 ± 1.43^{abA}	28.99 ± 0.74^{aA}	64.36 ± 4.33^{aB}	29.25 ± 0.60^{aA}	64.60 ± 2.17^{aB}	30.51 ± 1.02^{aA}
-10	58.38 ± 5.38^{abA}	29.63 ± 0.85^{aA}	63.66 ± 1.31^{aB}	30.28 ± 1.23^{aA}	64.47 ± 2.54^{aB}	29.98 ± 0.93^{aA}
-15	57.49 ± 2.78^{bcA}	30.28 ± 1.70^{aA}	61.75 ± 2.13^{aB}	29.64 ± 0.39^{aA}	64.57 ± 6.89^{aC}	30.53 ± 0.60^{aA}
-20	57.20 ± 2.53^{bcA}	29.09 ± 0.27^{aA}	61.31 ± 6.12^{aB}	29.95 ± 1.71^{aA}	63.95 ± 0.92^{aC}	30.23 ± 0.82^{aA}

*Values indicated with different letters in the same column are significantly different from each other ($p < 0.05$).

Table 1 presents the experimental values regarding the amount of change in β -carotene during the processing of red pepper frozen at -30°C , -35°C , and -40°C . It was determined that there was a slight decrease in the amount of β -carotene during the freezing of red pepper samples at different freezing temperatures and that this decrease was not statistically significant ($p > 0.05$). In the freezing process carried out at -30°C , the amount of β -carotene decreased from 31.09 ± 1.35 mg/100 g of dry matter to

29.09±0.27 mg/100 g of dry matter. It was determined that the amount of β -carotene decreased from 31.09±1.35 mg/100 g of dry matter to 29.95±1.71 mg/100 g of dry matter in the freezing application performed at -35°C and to 30.23±0.82 mg/100 g of dry matter at -40°C. It was determined that the amount of β -carotene was higher in red pepper samples frozen at -40°C than the samples frozen at -30°C and -35°C and that β -carotene was better preserved as the freezing temperature decreased. It was determined that β -carotene values of red peppers frozen at three different temperatures were not statistically significantly different during the freezing process. In a study, it was stated that the amount of β -carotene in fresh red peppers containing 0.84±0.18 mg/g dry matter β -carotene after freezing at -20°C increased to 1.30±0.28 mg/g dry matter level, but this increase was not statistically significant [12]. In a study conducted on broccoli, one of the frozen vegetables other than red pepper, Alanis-Garza et al. [16] froze seven different commercial broccoli varieties and determined the β -carotene contents of fresh and frozen samples. As a result, it was reported that there was no statistically significant difference between the β -carotene contents of fresh and frozen samples ($p>0.05$).

3.2. Changes in the Amount of Ascorbic Acid and β -Carotene During Frozen Storage of Red Peppers

Red pepper samples were stored at -20°C for three months after being frozen at -30, -35, and -40°C until the core temperature reached -20°C. Ascorbic acid analyses were performed at the end of each month during storage and the amounts of ascorbic acid and β -carotene were determined. The obtained values are given in Table 2.

The amount of ascorbic acid in red pepper samples after freezing (0th month) was determined according to the freezing temperature (-30°C, -35°C, and -40°C). The initial amount of ascorbic acid after freezing at -30°C was 57.20±2.54 mg/100g of dry matter. During the storage of these samples at -20°C, the amount of ascorbic acid decreased to 57.04±6.00 mg/100 g of dry matter at the end of the 1st month, to 52.67±2.73 mg/100 g of dry matter at the end of the 2nd month, and to 50.84±3.93 mg/100 g of dry matter at the end of the 3rd month. There was also a significant decrease in the amount of ascorbic acid in red pepper samples that were frozen at -35°C and -40°C and stored at -20°C. As seen in Table 2, there was a statistically significant difference ($p<0.05$) between the amount of ascorbic acid in the fresh red pepper samples and the amount of ascorbic acid in the samples frozen at different temperatures and stored for 3 months. The amount of ascorbic acid in frozen red pepper samples changed to lower levels depending on the process during storage at -20°C, however, as a result of the statistical analysis, it was determined that these changes were not at a significant level ($p>0.05$), beside a few exceptions. On the other hand, the amount of ascorbic acid in the samples frozen at -40°C and stored at -20°C was higher than in the samples frozen and stored at other temperatures.

Table 2. Average experimental data of ascorbic acid and β -carotene changes during frozen storage of red pepper samples at -20°C.*

Storage period (month)	-30°C		-35°C		-40°C	
	Ascorbic Acid content (mg/100 g DM)	β -Carotene content (mg/100 g DM)	Ascorbic Acid content (mg/100 g DM)	β -Carotene content (mg/100 g DM)	Ascorbic Acid content (mg/100 g DM)	β -Carotene content (mg/100 g DM)
Fresh	65.12±4.82 ^{aA}	31.09±1.35 ^a	65.12±4.82 ^{aA}	31.09±1.35 ^a	65.12±4.82 ^{aA}	31.09±1.35 ^a
0	57.20±2.54 ^{abA}	29.09±0.27 ^{aA}	61.30±6.12 ^{abB}	29.95±1.71 ^{aA}	63.95±0.79 ^{abC}	30.23±0.82 ^{aA}
1	57.04±6.00 ^{abA}	29.99±0.47 ^{aA}	59.11±1.58 ^{abB}	29.22±0.56 ^{aA}	59.96±5.60 ^{abcB}	29.62±0.56 ^{aA}
2	52.67±2.73 ^{bcA}	29.24±0.49 ^{aA}	56.93±3.69 ^{abcB}	29.46±0.42 ^{aA}	57.65±1.55 ^{bcB}	29.33±0.45 ^{aA}
3	50.84±3.93 ^{bcA}	29.09±0.70 ^{aA}	49.65±1.85 ^{cA}	29.34±0.42 ^{aA}	55.34±4.90 ^{cB}	29.26±0.67 ^{aA}

*Values indicated with different letters in the same column are significantly different from each other ($p<0.05$).

The findings obtained in the study are consistent with the literature data. Indeed, in the study of Oruna-Concha et al. [10], the frozen pepper samples were stored at -22°C for 1, 2, 3, 5, 7, 9, and 12 months and it was stated that the amount of ascorbic acid in the samples decreased starting from the 1st month. Gębczyński and Lisiewska [17] stored frozen broccoli at -20 and -30°C for 12 months. Ascorbic acid

analyses of the samples were performed at the 4th, 8th, and 12th months of storage. As a result, it was determined that the amount of ascorbic acid in the samples decreased during storage at both storage temperatures.

Table 2 shows β -carotene contents of red pepper samples frozen at different temperatures during storage at -20°C for three months. The initial amount of β -carotene after freezing (0th month) at -40°C was 30.23 ± 0.82 mg/100 g of dry matter. During storage at -20°C , the amount of β -carotene was 29.62 ± 0.56 mg/100 g of dry matter at the end of the 1st month, 29.33 ± 0.45 mg/100g of dry matter at the end of the 2nd month, and 29.26 ± 0.67 mg/100g of dry matter at the end of the 3rd month. Considering the values, although the amount of β -carotene decreased during storage, this decrease was not statistically significant ($p > 0.05$). A decrease in the amount of β -carotene was also observed in red pepper samples that were frozen at -30°C and -35°C and stored at -20°C . However, this decrease was not statistically significant ($p > 0.05$), as in the samples frozen at -40°C and stored. As a result, it was determined that there was no significant change in the amounts of β -carotene in red pepper samples frozen at different temperatures and stored at -20°C . Morais et al. [18] examined the effects of scalding and freezing storage (6 months) on the stability of β -carotene and capsanthin pigments in three different red pepper varieties and stated that the stability of pigments varies depending on scalding conditions, storage time and pepper cultures and that storage time has a higher effect on pigment stability than scalding conditions. In another study, Lisiewska and Kmiecik [19] stored sliced frozen tomatoes at -20 and -30°C for 12 months and reported that the amount of β -carotene in the samples decreased at the end of the storage.

4. CONCLUSION

The freezing process followed by a frozen storage is a good preservative process to maintain almost unchanged the ascorbic acid and β -carotene contents of red peppers. Frozen storage does not significantly affect the ascorbic acid and β -carotene contents of red peppers.

It can be seen in the literature that the effect of freezing on fruits and vegetables is still not clearly revealed and that there are different findings reported in the studies. However, it is important to examine the effect of the freezing process in more detail due to the preservation of nutritional properties of frozen and stored products, high levels of bioactive components, and the widespread consumption of these products by consumers.

According to the results of the study, it is seen that ascorbic acid is better preserved at -40°C than the other two temperatures in the freezing of red peppers. When the results obtained in terms of β -carotene are examined, it is seen that there is no significant change in β -carotene value at all three freezing temperatures. As a result, it was determined that freezing at -40°C would be more appropriate when both components were taken into consideration. In the 3-month storage process, similar results were obtained.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Pamukkale University Research Fund (2010FEBE059).

REFERENCES

- [1] D. Arslan and M. Özcan, Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annuum* L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content, Food and Bioproduct Processing. 89, 504 – 513, 2011.
- [2] K. Rybak, A. Wiktor, D. Witrowa-Rajchert, O. Parniakov, and M. Nowacka, The quality of red bell pepper subjected to freeze-drying preceded by traditional and novel pretreatment, Foods. 10(2), 226, 2021.
- [3] G. Bonat Celli, A. Ghanem, and M. Su-Ling Brooks, Influence of freezing process and frozen storage on the quality of fruits and fruit products, Food Reviews International. 32, 280 – 304, 2016.
- [4] E. Demiray and Y. Tulek, Quality changes in fruits and vegetables during frozen storage, Academic Food Journal. 8, 36 – 44, 2010.

-
- [5] K. Sanatombi and S. Rajkumari, Effect of processing on quality of pepper: A review, *Food Reviews International*. 36(6), 626-643, 2020.
 - [6] T. Hernández-Pérez, M. D. R. Gómez-García, M. E. Valverde, and O. Paredes-López, *Capsicum annuum* (hot pepper): An ancient Latin-American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential. A review, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 19(6), 2972-2993, 2020.
 - [7] E. Demiray, Y. Tulek, and Y. Yilmaz, Degradation kinetics of lycopene, β -carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying, *LWT-Food Science and Technology*. 50, 172-176, 2013.
 - [8] R. D. Freed, *MSTATC: Microcomputer Statistical Program. Experimental Design, Data Management and Data Analysis*, Michigan State University, Michigan, USA, 1991.
 - [9] S. M. Castro, J. A. Saraiva, J. A. Lopes-da-Silva, I. Delgadillo, A. Van Loey, C. Smout, and M. Hendrickx, Effect of thermal blanching and of high pressure treatments on sweet green and red bell pepper fruits (*Capsicum annuum* L.), *Food Chemistry*. 107, 1436-1449, 2008.
 - [10] M. J. Oruña-Concha, M. J. Gonzalez-Castro, J. Lopez-Hernandez, and J. Simal-Lozano, Monitoring of the vitamin C content of frozen green beans and Padrón peppers by HPLC, *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 76, 477-480, 1998.
 - [11] K. Sanatombi, Antioxidant potential and factors influencing the content of antioxidant compounds of pepper: A review with current knowledge, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 22(4), 3011-3052, 2023.
 - [12] S. Y. Leong and I. Oey, Effects of processing on anthocyanins, carotenoids and vitamin C in summer fruits and vegetables, *Food Chemistry*. 133, 1577-1587, 2012.
 - [13] J. C. Rickman, C. M. Bruhn, and D. M. Barrett, Nutritional comparison of fresh, frozen, and canned fruits and vegetables II. Vitamin A and carotenoids, vitamin E, minerals and fiber, *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 87, 1185-1196, 2007.
 - [14] H. Jia, F. Ren, and H. Liu, Effects and improvements of storage conditions and processing on the bioaccessibility and bioavailability of phytochemicals in fruits and vegetables, *International Journal of Food Science and Technology*. 60(1), vvae040, 2025.
 - [15] A. Topuz and F. Ozdemir, Influences of γ -irradiation and storage on the carotenoids of sun-dried and dehydrated paprika, *Food Chemistry*. 86, 509-515, 2004.
 - [16] P. A. Alanís-Garza, A. Becerra-Moreno, J. L. Mora-Nieves, J. P. Mora-Mora, and D. A. Jacobo-Velázquez, Effect of industrial freezing on the stability of chemopreventive compounds in broccoli, *Journal of Food Sciences and Nutrition*. 66, 282-288, 2015.
 - [17] P. Gębczyński and Z. Lisiewska, Comparison of the level of selected antioxidative compounds in frozen broccoli produced using traditional and modified methods, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 7, 239-245, 2006.
 - [18] H. Morais, P. Rodrigues, C. Ramos, V. Almeida, E. Forgács, T. Cserhádi, and J. S. Oliveira, Note. Effect of blanching and frozen storage on the stability of β -carotene and capsanthin in red pepper (*Capsicum annuum*) fruit, *Food Science and Technology International*. 8, 55-59, 2002.
 - [19] Z. Lisiewska, and W. Kmiecik, Effect of storage period and temperature on the chemical composition and organoleptic quality of frozen tomato cubes, *Food Chemistry*. 70, 167-173, 2000.

**YÜKSEK GERİLİM HATLARINDA TOPRAKLAMA ÇÖZÜMLERİ İLE YILDIRIM
ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF LIGHTNING ELECTROMAGNETIC PULSES WITH GROUNDING
SOLUTIONS IN HIGH VOLTAGE LINES**

Turan ÇAKIL^{*1} 

¹ Hazine ve Maliye Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

ABSTRACT

This study evaluated the grounding improvement works in power transmission lines in a technical and scientific framework. The aim of the study is to detail the grounding improvement processes to increase the reliability and efficiency of power transmission lines. Lightning and Electromagnetic Pulse (LEMP) intensities and current amplitudes obtained from the General Directorate of Meteorology (MGM) were taken into account in the analyses. The electrical performance of the line and its resilience against LEMP induced faults are evaluated using simulations with Electromagnetic Transients Program (ATP-EMTP) software. As an example, the Isparta (Keciborlu)-Burdur power transmission line is analysed and the reductions in the number of LEMP-induced tripping are investigated as a result of grounding improvement works. Guy Wires (GW) increased the coupling between the phase conductors, enabling more effective transfer of the LEMP current to earth and reducing the equivalent earth resistance. In the study, it is recommended that the use of low-cost and easy-to-install methods such as GW should be widespread due to the high cost of line surge arresters. In addition, GW applications on 154 kV power transmission lines were analysed in detail and it was found that this technique provides a reduction of up to 66% in the jump voltage at the insulator end. The study emphasizes the importance of grounding improvement methods for the creation of a reliable, sustainable and economical infrastructure in power transmission lines. These findings are expected to contribute to the literature for the development of more effective and cost-effective solutions in power systems.

Keywords: Electromagnetic Fields, Energy Transmission Lines, HV, LEMP, Power Systems.

ÖZET

Bu çalışma, enerji iletim hatlarındaki topraklama iyileştirme çalışmalarını teknik ve bilimsel bir çerçevede değerlendirmiştir. Çalışmanın amacı, enerji iletim hatlarının güvenilirliğini ve verimliliğini artırmaya yönelik topraklama iyileştirme süreçlerini detaylandırmaktır. Analizlerde, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) alınan Yıldırım ve Elektromanyetik Darbe (YEMD) yoğunlukları ve akım genlikleri dikkate alınmıştır. Hattın elektriksel performansı ve YEMD kaynaklı arızalara karşı dayanıklılığı, Elektromanyetik Transient Program (ATP-EMTP) yazılımı ile yapılan simülasyonlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Örnek olarak, Isparta (Keçiborlu)-Burdur enerji iletim hattı analiz edilmiş ve topraklama iyileştirme çalışmaları sonucunda YEMD kaynaklı açma sayılarında meydana gelen azalmalar incelenmiştir. Guy Wires (GW), faz iletkenleri arasındaki kuplajı artırarak YEMD akımının toprağa daha etkili bir şekilde aktarılmasını sağlamış ve eşdeğer toprak direncini düşürmüştür. Çalışmada, hat parafudurlarının yüksek maliyeti nedeniyle GW gibi düşük maliyetli ve kolay kurulabilen yöntemlerin kullanımının yaygınlaştırılması önerilmektedir. Ayrıca 154 kV enerji iletim hatlarında GW uygulamaları, detaylı şekilde incelenmiş ve bu tekniğin izolatör ucundaki atlama geriliminde %66'ya varan bir düşüş sağladığı tespit edilmiştir. Çalışma, enerji iletim hatlarında güvenli, sürdürülebilir ve ekonomik bir altyapının oluşturulması için topraklama iyileştirme yöntemlerinin önemini vurgulamaktadır. Bu bulgular, güç sistemlerinde daha etkili ve maliyet avantajlı çözümler geliştirilmesi için literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Alanlar, Enerji İletim Hatları, Güç Sistemleri, YEMD, YG.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: turan_cakil23@hotmail.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
19.01.2025	17.02.2025	04.03.2025	01.06.2025

1. GİRİŞ

Çalışmada, enerji iletim hatlarındaki topraklama iyileştirme çalışmalarına yönelik özel teknik şartname detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, enerji iletim hatlarında topraklama sistemlerinin iyileştirilmesiyle sağlanabilecek güvenlik ve verimlilik artışını teknik ve bilimsel bir çerçevede değerlendirmektir. Bu kapsamda, topraklama iyileştirmesine konu olacak iletim hatlarının açma sayıları, MGM verilerinden elde edilen YEMD yoğunlukları ve akım genlikleri dikkate alınarak analiz edilmiştir. Ardından, belirlenen hatların elektriksel davranışları ve YEMD kaynaklı arızalara karşı performansları simülasyon tabanlı bir yaklaşımla incelenmiştir. Simülasyon çalışmaları, ATP-EMTP yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve YEMD'in hatta direk düşmesi sonucu Isparta (Keçiborlu)-Burdur enerji iletim hattı örneği üzerinden somutlaştırılmıştır. Bu süreçte, bilgisayar ortamında yapılan analizlerle, hatlarda meydana gelebilecek olası akım değerlerinin tahmin edilmesi, uygulanacak topraklama iyileştirme çalışmaları sonrasında YEMD kaynaklı açma sayılarındaki değişimin ölçülmesi hedeflenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, topraklama iyileştirme çalışmalarının enerji arz güvenliği ve can güvenliği üzerindeki olumlu etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Günümüze kadar literatürde sayısız çalışma olsa da güncel üç çalışmadan biri, R. Batista ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada derin dikey elektrotlardan oluşan topraklama sistemine sahip 230 kV'luk bir iletim hattına yıldırım düşmesi sonucu meydana gelen etkileri analiz etmişlerdir. Bir diğer güncel çalışma ise Leonid Grcev ve Blagoja Markovski, yıldırım darbesinin topraklama ızgaralarının empedansı üzerindeki etkilerini inceleyerek, ızgara tipi topraklama modellerinin etki alanı ve empedansına bağlı olarak oluşan indüklenmiş gerilimleri belirlemeye çalışmışlardır. Diğer bir çalışmada K. Ishimoto ve arkadaşları, dağıtım hatlarının doğrudan koruma iletkenine yıldırım elektromanyetik darbesi düşmesi sonucu üç boyutlu sonlu fark zaman alanı yöntemi ile etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmalar, enerji iletim hatlarının yıldırım etkilerine karşı korunması ve topraklama sistemlerinin etkinliğinin artırılması açısından önemli bulgular sunmaktadır [1-9]. Bu çalışmada ise topraklama iyileştirme süreçlerinin teknik gerekliliklerini ortaya koymanın yanı sıra, bu süreçlerin fayda-maliyet analizine dayalı olarak nasıl optimize edilmesi gerektiğine dair öneriler sunmaktadır. Böylelikle, enerji iletim hatlarında daha güvenilir, sürdürülebilir ve ekonomik bir altyapının oluşturulmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Değişken İletim Hattı Modeli

YEMD akım modelleri, genel olarak dört ana sınıfa ayrılmaktadır: gaz dinamiği veya fiziksel modeller, elektromanyetik modeller, RLC iletim hattı modelleri ve mühendislik modelleridir [3-5,7-10]. Literatürde, YEMD kaynaklı yansıyan akımların hesaplanmasında en yaygın olarak tercih edilen yaklaşım, mühendislik modelleri olmuştur. Bu çalışmada ise, kullanılan mühendislik modeli olan Değişken İletim Hattı Modeli (DİH) modeli kullanılmıştır. Kullanılmasının nedeni ise daha gerçekçi bir yaklaşımla YEMD'in enerji iletim hattına etkisini tespit etmeye çalışmaktır. Bu model, Denklem (1, 2 ve 3)'de açıklanmıştır. Açıklanan denklemler, simülasyon modeline eklenmiştir [6,8,9,11-12].

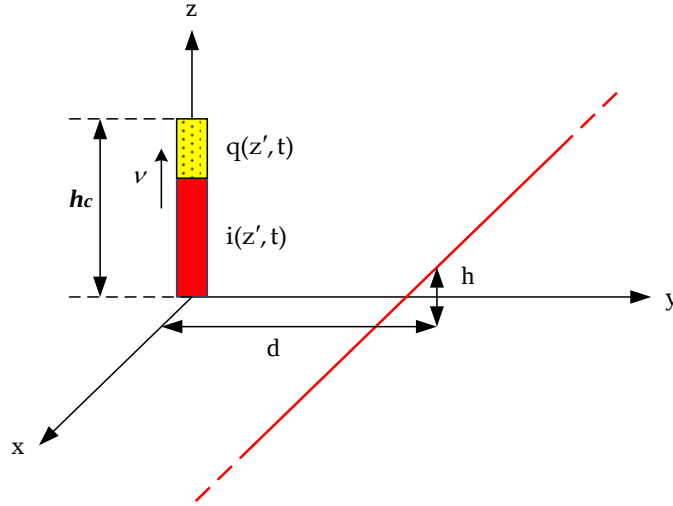
$$i(z', t) = \begin{cases} i\left(0, t - \frac{z'}{v}\right) \cdot (1 - z'/H), & z' \leq vt \\ 0, & z' > vt \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho(z', t) = \frac{1 - z'/H}{H} + \frac{i(0, t - z'/v_f)}{v_f} + \frac{1}{H} \cdot Q(t) \quad (2)$$

Burada $Q(t)$ t zamanda topraktan kanala toplam yükün şarj transferidir:

$$Q(t) = \int_{z'/V}^t i(0, \tau - z'/v) d\tau \quad (3)$$

Şekil 1'de gösterilen geometrik yapı ve mükemmel iletken bir düzlem üzerinde dikey bir anten olarak kabul edilen yıldırım kanalı boyunca z yüksekliğinde ve d uzunluğunda bir dipolden yayılan elektromanyetik alan ifadelerini içerir.



Şekil 1. YEMD'in enerji iletim hatlarına dolaylı ve doğrudan etkisini gösteren YEMD kanalı

2.2. YEMD Kanalının Akım Tespiti için Kullanılan Heidler Modeli

Çalışmada kullanılan YEMD akım modeli Heidler modelidir. Heidler akım modeli, yıldırım elektromanyetik darbe (YEMD) akımlarının mühendislik perspektifinden analitik olarak temsil edilmesinde sıkça başvurulan bir yaklaşımdır. Model, YEMD akımının zamana bağlı dalga formunu, fiziksel süreçlerin mühendislik bağlamında yalınlaştırılmış bir temsili olarak, matematiksel ifadelerle açıklar. YEMD akımının zamansal profiline ilişkin temel parametreler olan tepe akımı, yükselme zamanı ve sönümlenme süresi, modelin doğruluğunu ve uygulama başarısını belirleyen ana unsurlar arasında yer alır. Denklem 4' de ve Denklem 5' te model gösterilmiştir [6,13-15].

$$i(0,t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)}{1 + (t/\tau_2)} \cdot \exp(-t/\tau_2) \cdot u(t) \quad (4)$$

$$\eta = \exp[-(\tau_1/\tau_2) \cdot (n\tau_2/\tau_1)^{1/n}] \quad (5)$$

Burada:

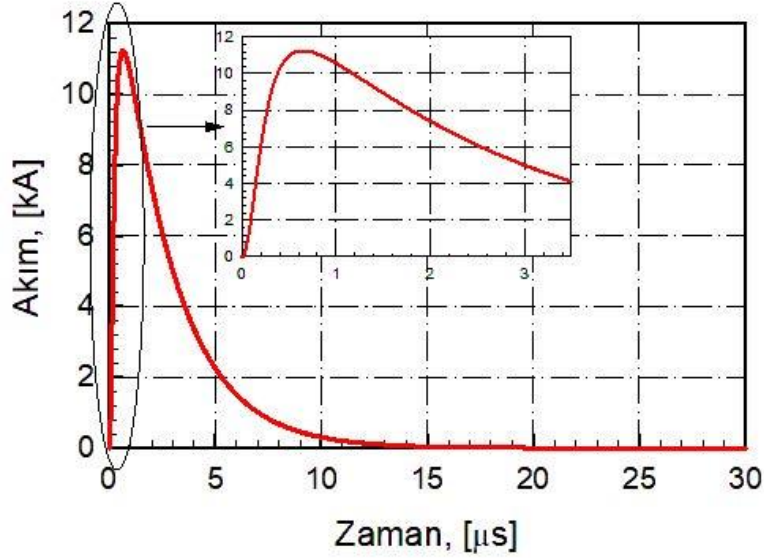
τ_1 : yükselen akımın zaman sabiti

τ_2 : yükselen akımın dalga formunun bozunma sabiti

n: belirtilen diklik faktörü (2-10 arasında)

I_0 : kanal taban akımının genlik değeri

Heidler akım modeli, YEMD' in fiziksel gerçekliğine uygun bir şekilde, akımın hızlı yükselme evresi ile daha yavaş sönümlenme evresini ayrı ayrı modelleyerek, YEMD olaylarının sistemlere etkilerini simüle etme açısından güçlü bir araç sunar. Modelin en önemli avantajlarından biri, fiziksel ve elektromanyetik süreçlerin karmaşıklığını basitleştirilmiş analitik ifadelerle ifade etmesine rağmen, gerçeğe oldukça yakın sonuçlar üretmesidir. Bu özellik, enerji iletim hatları, topraklama sistemleri ve diğer güç iletim altyapılarında YEMD kaynaklı akımların etkilerinin analizinde modelin sıklıkla tercih edilmesini sağlamaktadır. Heidler akım modeli, özellikle enerji iletim sistemlerinde aşırı gerilimlerin yayılımının hesaplanması, izolator performanslarının değerlendirilmesi ve YEMD koruma sistemlerinin tasarımında geniş bir uygulama alanına sahiptir [16-26]. Heidler modeli, YEMD akımlarının zamansal özelliklerini modellemede sağladığı denge ile hem mühendislik uygulamalarında pratik bir araç hem de akademik araştırmalarda yaygın bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Modelin parametrik sadeliği, geniş bir senaryo yelpazesinde uygulanabilirliğini mümkün kılarken, yıldırım kaynaklı elektromanyetik etkilerin değerlendirilmesinde etkinliğini kanıtlamaktadır. Heidler akım modeli Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. YEMD kanalının Heidler akım modeli ile gösterimi

2.3. YEMD Verilerinin İstatistikleri

Bu çalışmada MGM ile TEİAŞ'ın 2018 – 2023 yılları arasındaki YEMD verilerinden (şimşek verileri dahil edilmemiştir) yararlanılmıştır. Çalışmada Türkiye’de en fazla YEMD düşmelerine maruz kalan iki bölgesinden biri olan Burdur-Antalya-Konya bölgesi verileri materyal olarak incelenmiştir [25]. Bu başlık altında YEMD verileri kullanılarak düşen YEMD’lerin akım genlikleri incelenmiştir. Etki süreleri tespit edilmediğinden eşit alınmıştır.

Tablo 1’de bölgeye düşen YEMD akımlarının hangi değerlerde daha çok düştüğü ve bu değerlerin üzerinde düşen YEMD akımlarını sayısal olarak gösterilmektedir [22]. Tümünün ortalaması alındığında 18,3 kA olarak tespit edilmiştir. Tablo 2’de ise bölgeye yıl boyunca düşen YEMD’ in yüzdesel dilimine karşılık gelen sayıyı gösterilmektedir [22]. Tablo 3’te bölgeye yıllara bağlı düşen YEMD akımının maksimum ve minimum değerlerini gösterilmektedir [22].

Tablo 1. Yüzdesel ifadesi karşılığındaki YEMD akım değerleri [22]

(bu akım değeri ve daha üstü değerlerin olma olasılığını ifade eder.) (Burdur-Antalya-Konya Bölgesi)

Yıl	%1	%5	%10	%20	%30	%40	%50	%60	%70	%80	%99
2018(kA)	82	42	29	20	15	12	10	8	7	5	2
2019(kA)	87	41	28	18	14	10	8	6	5	4	2
2020(kA)	74	39	27	17	12	9	8	7	6	5	3
2021(kA)	69	31	21	14	9	7	6	5	5	4	2
2022(kA)	77	38	26	17	11	8	7	6	5	4	2
2023(kA)	62	32	22	14	10	8	7	6	5	4	2
Ort. (kA) Değeri	75.2	37.2	25.5	16.6	11.8	9	7.6	6.3	5.5	4.3	2.2

Tablo 2. Yıl boyunca düşen YEMD sayısı [22]
(Burdur-Antalya-Konya Bölgesi)

Yıl	%1	%5	%30	%40	%50	%70	%99
2018	418 ₍₈₂₎	2092 ₍₄₂₎	13837 ₍₁₅₎	18151 ₍₁₂₎	21903 ₍₁₀₎	30093 ₍₇₎	40705 ₍₂₎
2019	466 ₍₈₇₎	2433 ₍₄₁₎	14359 ₍₁₄₎	20085 ₍₁₀₎	25070 ₍₈₎	38625 ₍₅₎	45552 ₍₂₎
2020	254 ₍₇₄₎	1233 ₍₃₉₎	7940 ₍₁₂₎	11716 ₍₉₎	13858 ₍₈₎	19567 ₍₆₎	24059 ₍₃₎
2021	504 ₍₆₉₎	2583 ₍₃₁₎	17170 ₍₉₎	24425 ₍₇₎	30337 ₍₆₎	38020 ₍₅₎	48459 ₍₂₎
2022	596 ₍₇₇₎	3058 ₍₃₈₎	19370 ₍₁₁₎	28267 ₍₈₎	33996 ₍₇₎	49848 ₍₅₎	57786 ₍₂₎
2023	771 ₍₆₂₎	3818 ₍₃₂₎	24459 ₍₁₀₎	33243 ₍₈₎	40543 ₍₇₎	61684 ₍₅₎	73383 ₍₂₎
Ort. Değer	501.5	7510.6	2536.1	22647.8	27617.8	39639.5	48324

Tablo 3. Yıllara bağlı düşen YEMD akımının maksimum ve minimum değerleri [22]
(Burdur-Antalya-Konya Bölgesi)

Yıl	Minimum (kA)	Maksimum (kA)
2018	1	290
2019	2	280
2020	2	266
2021	2	267
2022	2	279
2023	2	336
Ort. Değer	1.83	286.3

2.4. Enerji İletim Hattında YEMD Kaynaklı Darbe Akımlarına Karşı Topraklama Yönünden İyileştirme Metotları için Sahada Tespit Edilen Bulgular

Ülkemizde 154 ve 400 kV direklerde YEMD kaynaklı açmaların sıklığı bazı bölgelerde önemli bir sorundur. Bu sorunu çözmek için üç temel yaklaşım önerilmektedir:

- Topraklama iyileştirmesi
- İzolatör boyunu artırma
- Parafudur kullanımı

Son dönemde güncellenen topraklama şartnamesinde topraklama direncinin 10 ohm seviyesine düşürülmesini hedeflemektedir. Bu bağlamda, mevcut 20 ohm'luk topraklama direncinin 10 ohm'a indirilebilmesi için dört ek kazık çakılmasının gerektiği ifade edilmektedir. Ancak yapılan kapsamlı analizler, ilave kazık çakılmasının topraklama direncinde anlamlı bir düşüş sağlamadığını ortaya koymaktadır. Yüksek gerilim direklerinin mevcut yapısal tasarımında, direğin dört çelik ayağı çelik donatılar ve betonla desteklenmiş bir yapı oluşturmakta ve bu tasarımın zaten yeterli bir topraklama performansı sunduğu belirlenmiştir [18]. Dolayısıyla, ekstra kazık uygulaması, sistemin toplam empedansında kayda değer bir azalmaya neden olmamaktadır. Bu çalışmada, bu nedenle özel topraklama sistemleri kullanılması önerilmiş ve simülasyonlarla bu durum açıklanmaya çalışılmıştır.

2.4.1. Enerji İletim Hattında YEMD Kaynaklı Darbe Akımlarına Karşı Topraklama Yönünden İyileştirme Metotları

YEMD akımlarının yüksek topraklama değerine sahip direklere isabet etmesi, direk üzerinde daha yüksek gerilimlerin oluşmasına ve izolatör dayanım (atlama) geriliminin aşılması durumunda Geri Atlama (Back Flashover) oluşmasına yol açar. Bu sorunun önlenmesi için izolatör atlama gerilimini artıracak faz-toprak mesafesi artırılabilir veya topraklama değerleri düşürülerek direkte oluşan gerilim azaltılabilir. İki yöntemin birlikte uygulanması, açma sayılarında önemli ölçüde azalma sağlar [19]. Topraklama iyileştirmelerinde dikey kazık kullanımından ziyade, yatay iletkenlerin ve düşük özgül dirence sahip humuslu toprağın daha etkili olduğu belirtilmiştir. Kayalık arazilerde kazık yerine yalnızca yatay iletkenler ve humus kullanımı önerilirken, uygun koşullarda kazık, yatay iletken ve humus uygulamaları birlikte yapılmalıdır [20-22]. Topraklama sisteminin temel bileşeni direğin kendisi olduğundan, iyileştirme çalışmaları bu yapıyı göz önünde bulundurarak planlanmalıdır.

2.4.2. Dört Kazık Mesh Tipi Metodu

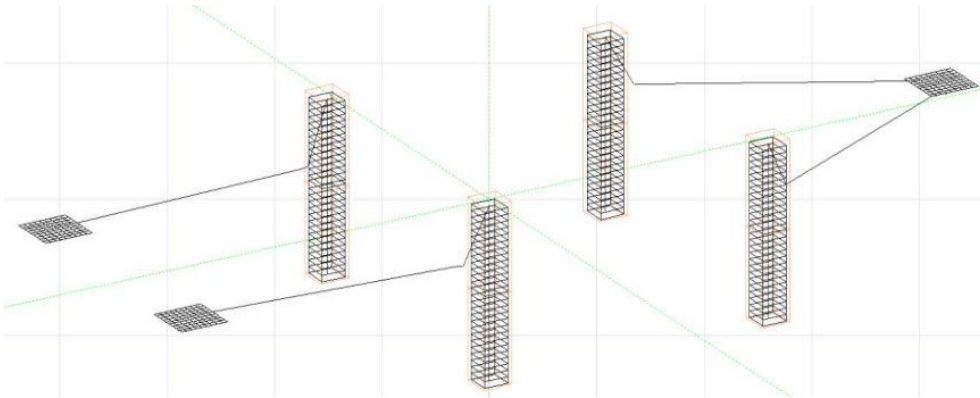
Bu uygulamada; direğin etrafına çelik iletken yerin 1 metre altından serilip 4 kazık ve direk ile birleştirilmiştir. Bu uygulamanın zor olacağı düşünülen yerlerde Dört kazık + hasır + humus metodu seçilmelidir.

2.4.3. Dört Kazık + Hasır + Humus Tipi Metodu

Bu uygulamada, her bir direk ayağı çevresine 3 metre çapında çukur kazılması önerilmektedir. Arazinin özelliklerine bağlı olarak, hasır boyutları 1 ila 2 metre arasında değişiklik gösterebilir. Bu hasır, kazıklar ve direk ayağı ile etkin bir şekilde irtibatlandırılmalıdır. Uygulama sırasında, hasırın altına ve yanlarına 25 cm kalınlığında humuslu toprak serilmeli, ardından hasır yerleştirildikten sonra üzerine yeniden humus eklenerek ana toprak ile kaplama işlemi tamamlanmalıdır. Her bir hasır için dört göz oluşturulması yeterli olacaktır. Hasır uygulamasının yalnızca iki köşeye yapılmasının nedeni, işletme sırasında direğin örülmüş olduğu durumlarda çalışma koşullarının zorluğudur. Ancak tesisin ilk kurulum aşamasında, tüm köşelere hasır yerleştirilmesi mümkündür ve bu tercih, sistemin topraklama verimliliğini artırabilir.

2.4.4. Counterpoise + Hasır + Humus Metodu

Counterpoise ve hasır uygulamalarının doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi ve uygulanacağı yönlerin belirlenmesi, topraklama sisteminin etkinliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda yapılan modelleme çalışmaları, direğin uygun iki tarafına ayaklardan yatay iletken bağlanması ve direkten yaklaşık 5-10 metre mesafedeki hasır ile irtibat kurulması durumunda, topraklama değerlerinin iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur. Şekil 3'te bu topraklama metodu gösterilmiştir.

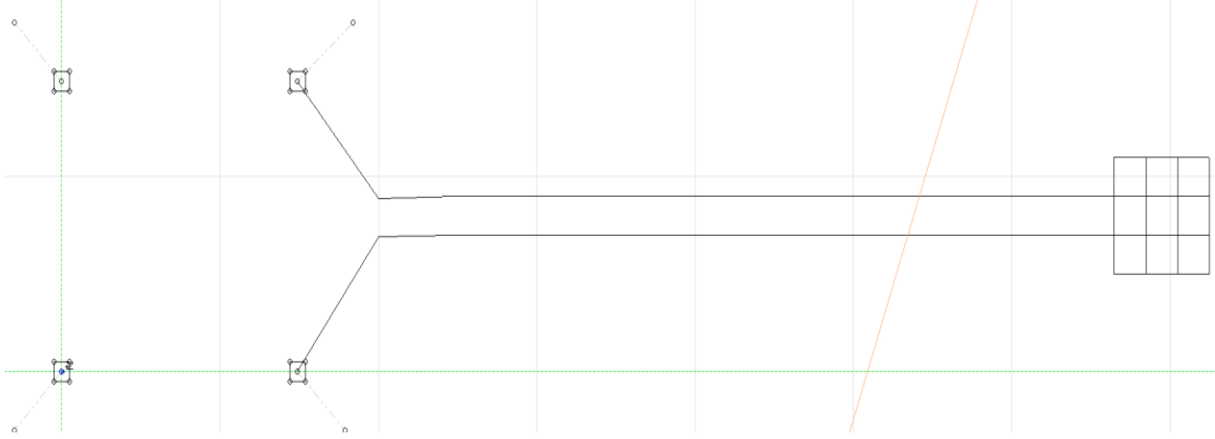


Şekil 3. Counterpoise ve Hasır Uygulaması

2.4.5. Uydur Topraklaması

Bu etkili topraklama yöntemi, direğin bulunduğu kaya veya yüksek özgül dirençli alan ile düşük özgül dirençli toprak arasında yatay bir iletkenin yerleştirilmesiyle uygulanabilir (Şekil 4). Bu uygulama, topraklama dirençlerinde önemli iyileştirmeler sağlar. Örneğin, sol tarafta 10.000 ohm-m, sağ tarafta ise

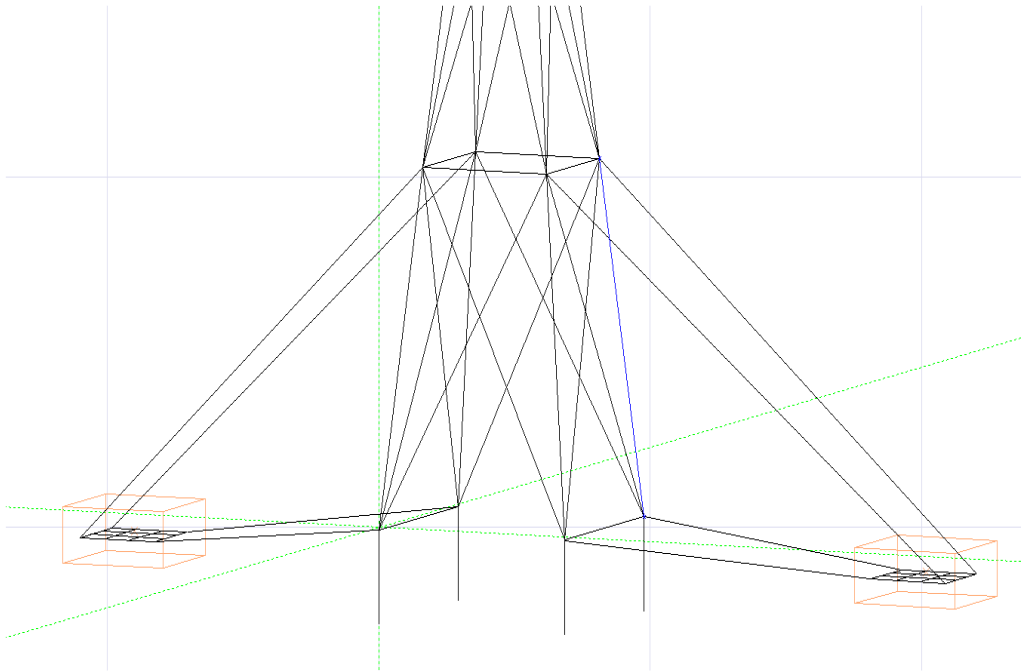
1.000 ohm-m özgül direnç değerlerine sahip bir sistemde, beş kat iyileştirme elde edilebilir. Ancak, bu yöntem her alanda uygulanabilir olmamakla birlikte, uygun yerlerde kullanıldığında parafudur ihtiyacını minimize eder. Topraklama iyileştirmesi yapılırken ilk olarak direklerde bu yöntemin uygulanabilirliği değerlendirilir. Eğer bu yöntem uygulanabilir ise, tercih edilmesi faydalıdır; ancak uygulanabilir değilse, alternatif olarak ikinci bir yöntem tercih edilmelidir. Bu ikinci yöntem, toprağın 1 metre derinliğinde kazılarak, direğin 10-50 metre uzaklığındaki 3x3 metre boyutlarındaki hasır ile bağlantı sağlanmasını içerir. Şekil 4'te topraklama metodu gösterilmiştir.



Şekil 4. Uydu Topraklaması Uygulaması

2.4.6. Guy Wires (sadece belirli hatlarda yapılacak uygulama ve yeni bir metot)

Bu uygulama, direğin yaklaşık 10 metre yüksekliğinden dört farklı noktadan toprak ile irtibat sağlanarak, topraklama değerinin azaltılması ve direğin darbe empedansının düşürülmesi yoluyla YEMD kaynaklı açmaların azaltılmasını hedefler. Böylece, direğin çevresindeki topraklama sisteminin verimliliği artırılarak, elektriksel darbe olaylarının olumsuz etkilerinin minimize edilmesi amaçlanır. Bu yöntem, topraklama değerlerinin iyileştirilmesiyle hem güvenliği arttırmakta hem de olası hasarları azaltmaktadır. Yüksek kesimler de ve nüfusun az olduğu bölgelerde kullanılacak bir yöntem olarak önerilmektedir. Şekil 5'te gösterilmiştir. Ülkemiz de şu anda bu uygulama yapılmamaktadır. Bu nedenle çalışmada bu metot detaylı incelenmiştir.



Şekil 5. Guy Wires Topraklaması

3. BULGULAR

Bu bölümde araştırmanın bulguları ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Yapılan analizler ve deneyler, araştırmanın ana hedeflerine ve hipotezlerine dair önemli bilgiler sağlamaktadır. Bulgular hem nicel hem de nitel verilerin analizini içermekte ve araştırma soruları doğrultusunda kapsamlı yanıtlar sunmaktadır. Araştırmanın başlangıcında belirlenen amaçlar çerçevesinde, YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin etkileri ve bu gerilimlerin azaltılmasına yönelik kullanılan yöntemlerin etkinliği üzerinde durulmuştur. Bulgular, literatürle karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve yeni bakış açıları elde edilmiştir. Sonuçlar, elektrik hatları ve enerji tesislerinde YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin yönetimi ve azaltılmasına yönelik stratejiler geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

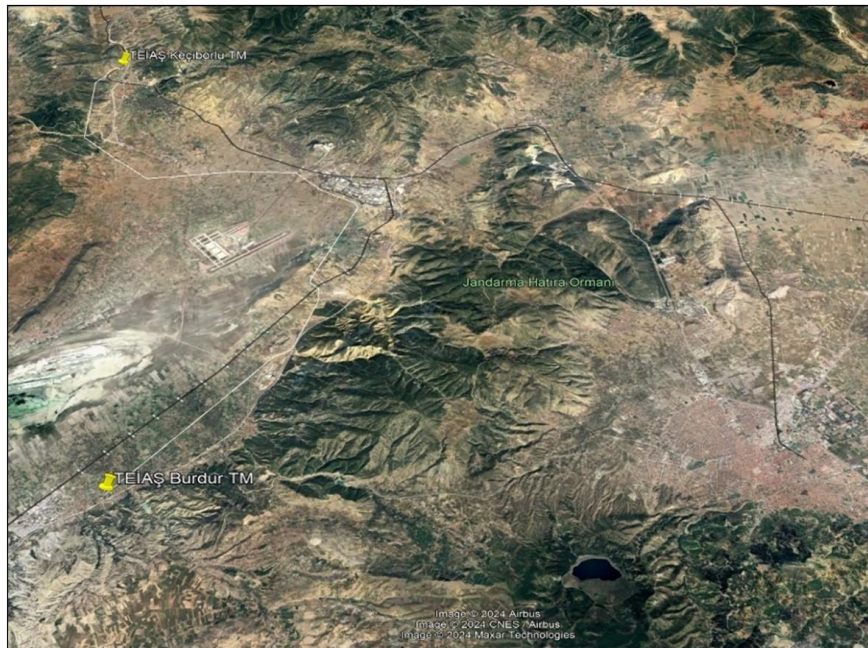
3.1. Topraklamanın iyileştirilmesi ile Yıldırım Elektromanyetik Darbelerine Karşı Koruma: Gerçekçi Yüksek Gerilim Güç Hattı Bölgesi İçin Bir Simülasyon Çalışması

Bu çalışmada, enerji iletim hatlarındaki topraklama iyileştirme işine ait özel teknik şartname incelenmiştir. Bu kapsamda, topraklama iyileştirme yapılacak hatların açma sayıları, MGM'den alınan YEMD yoğunluğu ve akım genlikleri değerlendirilmiş, ardından bu hatlar simüle edilmiştir. Bilgisayar ortamında yapılan bu analizlerde, hatlarda yapılacak topraklama iyileştirme çalışması sonrasında hattın YEMD' in direk düşmesi kaynaklı açmalarındaki iyileştirme oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma da gerçek bir enerji iletim hattı olan Isparta (Keçiborlu)-Burdur-Antalya iletim hattı, ATP-EMTP de Guy Wires topraklama metodu kullanılarak YEMD' in direk düşmesine göre topraklama ölçüm analizi yapılmıştır.

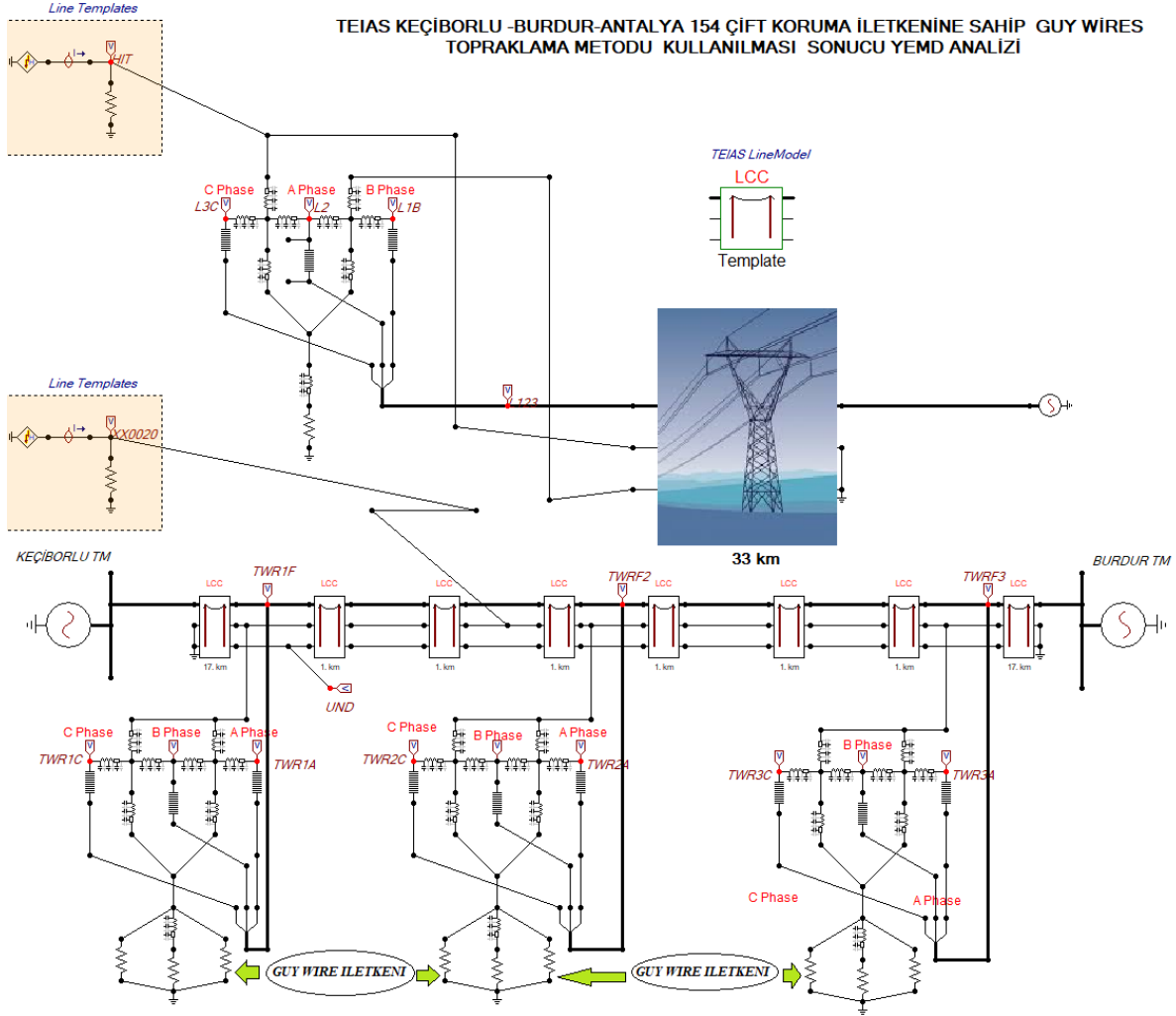
3.1.1. Simülasyon Bulguları

Bu çalışma, Antalya-Burdur-Keçiborlu enerji iletim hattı üzerindeki YEMD performansını incelemektedir. Hattın toplam uzunluğu 33 km olup, 110 adet direk bulunmakta ve bu direklerin 2020 ile 2023 yıllarına ait Ground Flash Density (GFD) değerleri sırasıyla 3.82 ve 4.47 olarak ölçülmüştür; bu değerler oldukça yüksektir. Direklerin topraklama değerlerine bakıldığında, 20 ohm' un üzerinde topraklama değerine sahip 41 direk tespit edilmiştir. Özellikle, 166, 196 ve 650 ohm gibi yüksek geçiş direncine sahip direkler dikkat çekmektedir. 2015 yılında hattın 7 açma yaptığı, ancak 2018 yılında hiç açma yaşanmadığı gözlemlenmiştir. Bu analiz, hattın mevcut durumunun değerlendirilmesi ve YEMD kaynaklı sorunların minimize edilmesine göre Guy Wires tekniği kullanılmasına yönelik yapılmıştır.

Şekil 6'da çalışmada kullanılan, hattın uydu görüntüsü gösterilmiştir. Şekil 7'de ise çalışmanın ATP-EMTP simülasyon modeli gösterilmiştir.



Şekil 6. Çalışmada simüle edilen enerji iletim hattının gerçek uydu görüntüsü



Şekil 7. Çalışmada simüle edilen 154 kV gerilim taşıyan enerji iletim hattının ATP-EMTP görüntüsü

Bu yüksek GFD değerine ve yüksek toprak geçiş direncine rağmen hattın açma sayılarının düşük olmasının temel nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

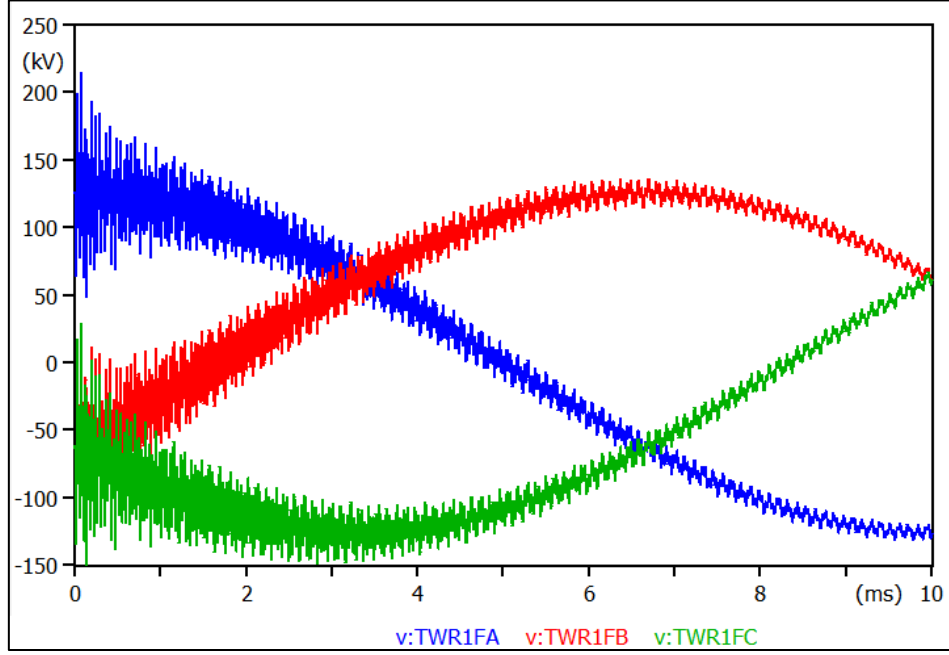
- Araziye düşen YEMD genliklerinin nispeten küçük olması,
- Direk boylarının kısa olması nedeniyle hatta YEMD düşme oranının düşük olması,
- Çift koruma teline sahip direklerin varlığı sayesinde, direklerde oluşan gerilim seviyelerinin sınırlı kalması

Özellikle 2023 yılına ait GFD ve topraklama değerleri kullanılarak, hattın YEMD performans analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, hattın mevcut performansının detaylı bir şekilde değerlendirilmesi ve YEMD kaynaklı potansiyel sorunların en aza indirgenmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmada, YEMD için kritik öneme sahip olan topraklama direnç değerleri, incelenen hattaki tüm direkler için sahada ölçülerek tespit edilmiştir. Simülasyon aşamasında, elektrik güç sistemine ait elemanların modellenmesi amacıyla Alternatif Geçici Program (ATP) kullanılmıştır. ATP, geçici olayların simülasyonu için son derece etkili bir araç olup, özellikle hata durumlarında zaman alanında ayrıntılı dalga biçimlerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, ATP-EMTP yazılımı kullanılarak Antalya-Burdur-Keçiborlu 154 kV tek devreli havai iletim hattı modellenmiş ve YEMD' e karşı korunmasında yeni bir koruma yöntemi önerilerek bu yöntemin etkinliği analiz edilmiştir. Çalışma hem simülasyon sonuçları hem de saha ölçümleri doğrultusunda, önerilen yöntemin YEMD etkilerinin azaltılmasına katkısını değerlendirmiştir.

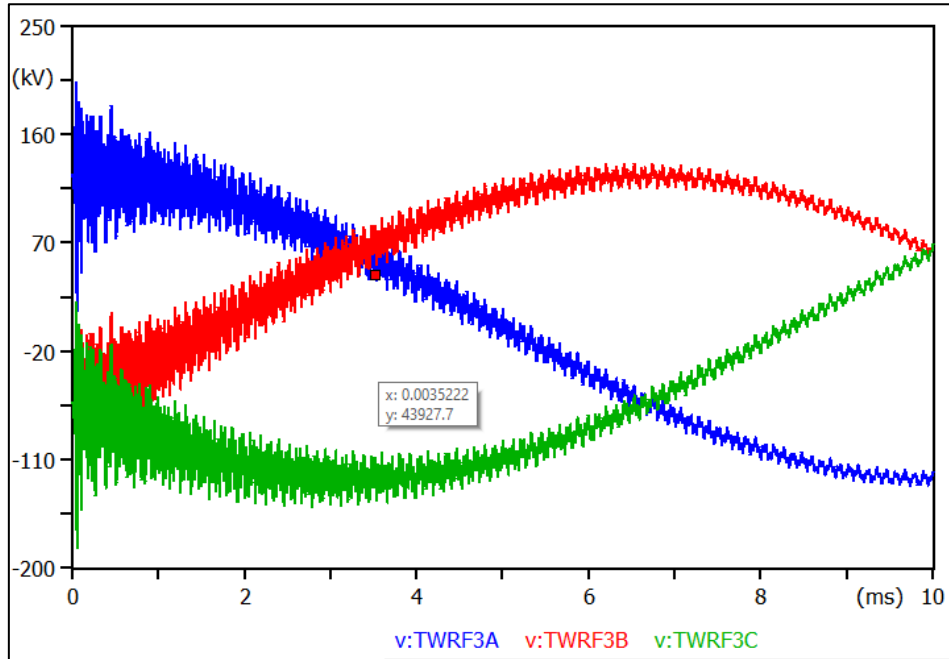
Şekil 7'de YEMD bloğunun hatta eklenmiş halinde gösterilmiştir. YEMD bloğunun içerisindeki YEMD' in akım büyüklüğü düşen darbelerin ortalaması alınarak 18.3 kA olarak tespit edilmiştir. Guy Wires

(Ayak İletkenleri), hattın bağlı olduğu direğin toprak direncine paralel olarak düşenmesi prensibidir. GW, ekranlama telleri gibi faz iletkenlerini korumaz, ancak sadece faz iletkenleri ile kuplaj faktörünü artırır, bu nedenle enerji iletim hatlarının izolasyonlarındaki gerilimi azaltır. Bu yöntemle YEMD akımının direkt oluşturduğu gerilimin azaltılması hedeflenmiştir.

Hattın ortasına (koruma iletkenine düşen) düşen YEMD, hattın iki tarafına yayılmaya başlamıştır. Düşen noktadan 2 km gerisinde fazlar üzerinde indüklenen gerilim Şekil 8’de gösterilmiştir. Düşen noktadan 4 km ilerisinde fazlar üzerinde indüklenen gerilim Şekil 9’da gösterilmiştir.

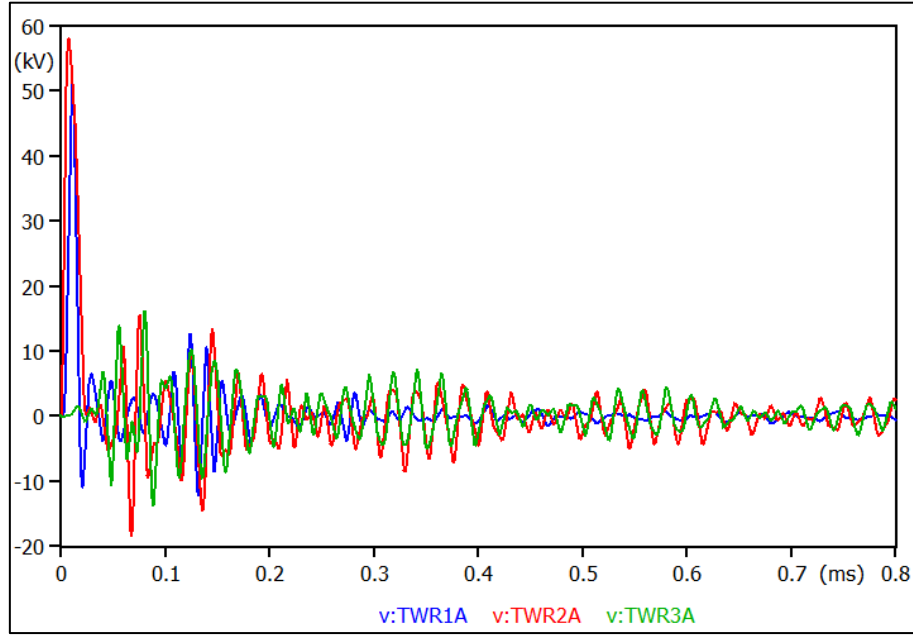


Şekil 8. YEMD darbesinin düştüğü bölgeden 2 km gerisinde fazlar üzerindeki indüklenen gerilim (Burdur TM 16 km uzakta L₁: TWR1FA, L₂: TWR1FB L₃: TWR1FC)



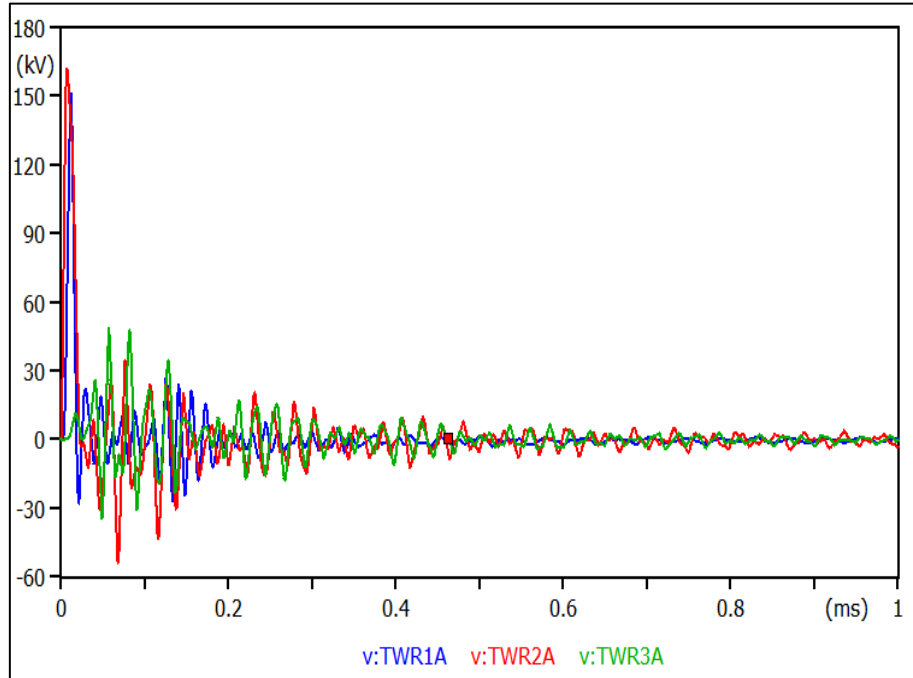
Şekil 9. YEMD darbesinin düştüğü bölgeden 4 km gerisinde fazlar üzerindeki indüklenen gerilim (Keçiborlu TM 16 km uzakta L₁: TWR3FA, L₂: TWR3FB L₃: TWR3FC)

Şekil 10'da ise GW iletkeni kullanılması durumunda hattın darbeye yakınlığına göre L_1 fazlarının izolatörleri ucundaki oluşan gerilim gösterilmiştir.



Şekil 10. YEMD darbesinin düştüğü bölgedeki direklerde Guy Wires iletkeni kullanılması sonucu izolatör ucu gerilim seviyesi (Darbeye yakın L_1 fazı sıralaması **TWR2A**, **TWR1A**, **TWR3A**)

Şekil 11'de ise GW iletkeni kullanılmaması durumunda hattın darbeye yakınlığına göre L_1 fazlarının izolatörleri ucundaki oluşan gerilim gösterilmiştir.



Şekil 11. YEMD darbesinin düştüğü bölgedeki direklerde Guy Wires iletkeni kullanılmaması sonucu izolatör ucu gerilim seviyesi (Darbeye yakın L_1 fazı sıralaması **TWR2A**, **TWR1A**, **TWR3A**)

Simülasyon sonuçlarına göre direklerde GW iletkeni kullanılmaması durumunda fazların bulunduğu izolatör uçlarındaki atlama gerilimi 180 kV iken, GW iletkeni kullanılması durumunda ise bu değer 60 kV 'ya kadar düştüğü görülmüştür.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmada kullanılan direk parametreleri, faz iletkenleri, koruyucu iletkenler, izolasyonlar ve temel direnç verileri Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından sağlanmıştır [21]. Bir GW (ayak iletkenleri) kullanıldığında, fazın maksimum kuplaj faktöründe %20'ye kadar bir artış sağlanabilir. Bu durum, izolatör üzerinde deşarja neden olan gerilimi azaltarak enerji iletim hattının YEMD'e karşı korunma performansını artırmaktadır. 220 kV'luk bir iletim hattının izolatöründeki gerilim, bir veya iki GW kurulumuyla %13 ila %20 oranında düşüş göstermektedir [23]. Ek olarak, guy wires, faz iletkenleri arasındaki kuplaj faktörünü artırarak YEMD akımının bir kısmını yeni toprak iletkeni kolları aracılığıyla toprağa aktarılmasını kolaylaştırmaktadır [24]. Bu sayede, toprak direncine paralel bir yapı oluşturularak eşdeğer toprak direnci azaltılmaktadır. Hat parafudurlarının her bir direk için kullanılması durumunda ortaya çıkan yüksek yatırım maliyeti göz önünde bulundurulduğunda, GW gibi alternatif korunma yöntemleri, kolay kurulumu ve düşük maliyeti sayesinde giderek daha fazla tercih edilmelidir. Bu çalışma kapsamında, 154 kV'lık enerji iletim hatlarında GW uygulamaları incelenmiş ve bu yönetime dair çözüm önerileri geliştirilerek yeni bir bakış açısı sunulmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak GW tekniği kullanıldığı takdirde, izolatör ucundaki atlama geriliminde %66'lık bir gerilim düşmesini sağlamıştır.

REFERANSLAR

- [1] B. Raphael, Louro P., And Paulino J., Lightning Performance of a Critical Path from A 230-Kv Transmission Line with Grounding Composed by Deep Vertical Electrodes, Electric Power Systems Research, Vol. 195, 2021.
- [2] G. Leonid, Markovskı B. And Todorovskı M., Lightning Performance of Multiple Horizontal, Vertical and Inclined Grounding Electrodes, In IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 37, No. 5, Pp. 3782-3791, Oct. 2022.
- [3] J.C. Maxwell, A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 155, pp. 459-512, 1865.
- [4] M.A. Uman, D.K. Mclain, Magnetic Field of Lightning Return Stroke, Journal of Geophysics Research, Vol. 74, 1969.
- [5] R. Lundholm, Induced Over voltages on Transmission lines and their bearing on the lightning performance of medium voltage networks, Duplic Goteborg, 1955.
- [6] F. Heidler, Travelling current source model for LEMP calculation, Proc of the 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zurich, March 5-7, 1985.
- [7] H.K. Hoidalén, Analytical Formulation of Lightning-Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines Above Lossy Ground, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol.45, no.1, pp.92-100, Feb. 2003.
- [8] IEEE Standards 1410 "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines", 2004.
- [9] K. Ishimoto, F. Tossani, F. Napolitano, A. Borghetti, C.A. Nucci, LEMP and ground conductivity impact on the direct lightning performance of a medium-voltage line. Electr. Power Syst. Res. 2023.
- [10] T. Cakil, H.F. Carlak, S. Ozen, Protection Analysis of Surge Arresters and Isolators Against Over Voltages Caused by Lightning Electromagnetic Pulses, International Conference on Advances and Innovations in Engineering, Elazig, Turkey, 10-13 May 2017.
- [11] C. Jinxin et al., Comprehensive Assessment of Lightning Protection Schemes for 10 kV Overhead Distribution Lines, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 3, pp. 2326-2336, June 2022.
- [12] T. Cakil, H.F. Carlak, S. Ozen, The Analysis of Transient Phenomena on Power Transmission Lines Due to Lightning Electromagnetic Pulses, Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2017, St. Petersburg, Russia, 22,25 May 2017.

-
- [13] G. Jun, W.C. Xie, Y. Xie and Tkachenko S., An Efficient Model of High-Frequency Electromagnetic Field Coupling to Multiconductor Transmission Lines with the Presence of the Lossy Ground, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 64, no. 6, pp. 2261-2272, 2022.
- [14] T. Cakil, H.F. Carlak, S. Ozen, The Indirect Effect of Lightning Electromagnetic Pulses on Electrostatic, Electromagnetic Fields and Induced Voltages in Overhead Energy Transmission Lines. Appl. Sci., 14, 3090, 2024.
- [15] S. Kauche and B. Nekhoul, Modelling of Lightning Surges on A Grounding System of a Tower Cascade. Electrical Engineering. 2023.
- [16] C. Li, et al., Electromagnetic Fields of Lightning Return Stroke to Wind Turbines with Discontinuous Impedance Model, Electric Power Systems Research, Volume 233, 2024.
- [17] G. Leonid, Markovski B. And Todorovski M., Lightning Performance of Multiple Horizontal, Vertical and Inclined Grounding Electrodes, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 5, pp. 3782-3791, Oct. 2022.
- [18] L. Prikler and H. K. Hoidalen ATPDraw version 6.1 for Windows XP/7/8, 2024, <http://www.atpdraw.net/index.php> [Son erişim tarihi: 22.06.2024]
- [19] B. Raphael, Louro P., And Paulino J., Lightning performance of a critical path from a 230-kV transmission line with grounding composed by deep vertical electrodes, Electric Power Systems Research, Vol. 195, 2021.
- [20] N. Arı, Ş. Özen, Elektromanyetik Uyumluluk, ISBN 978-9944-341-72-1, Palme Yayıncılık, 2008.
- [21] TEİAŞ, Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların ve Jeneratörlerin Elektrik'i Karakteristiği, Sistem Araştırma ve Kontrol Müdürlüğü, 2024.
- [22] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Tahminler Daire Başkanlığı, Analiz ve Tahminler Şube Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/sondurum/yildirim-takip.aspx> [Son erişim tarihi: 18.06.2024]
- [23] B. Zhang, Li C., Liu Z. And He J., Analysis of Transient in Secondary Cable Due to a Direct Lightning Strike on Grounding Grid, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 65, no. 4, pp. 1183-1190, Aug. 2023.
- [24] T. Çakıl, H. F. Carlak, and Ş. Özen, "Modeling of Power Network System of The High Voltage Substation: a simulation study", IJEAS, vol. 7, no. 3, pp. 39-57, 2015.
- [25] Y. Eroğlu, S. Çakıl, Türkiye'deki Yıldırım Ve Şimşeklerin Akım Düzeyleri Ve Sayıları Hakkında İnceleme, Uluslararası Katılımlı V. Meteorolojik Uzaktan Algılama Sempozyumu (UZAKTEM), pp. 708-727, Antalya, Türkiye, 14-17 Kasım 2023.
- [26] T. Cakil, H. F. Carlak and S. Ozen, "Protection against Lightning Electromagnetic Pulses Using Surge Arresters: A Simulation Study for the Realistic High-voltage Power Line Region," 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), pp. 2465-2473 Hangzhou, China, 2021.

**ANADOLU SAFRANI (*CROCUS SATIVUS* L.) SULU EKSTRAKTI İLE GÜMÜŞ
NANOPARTİKÜLLERİN (AGNP) YEŞİL SENTEZİ, ANTİOKSİDAN AKTİVİTELERİ VE
İNSAN PROSTAT KANSERİ HÜCRELERİ ÜZERİNDEKİ SİTOTOKSİK ETKİLERİ**

**GREEN SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLES (AGNPS) USING ANATOLIAN
SAFFRON (*CROCUS SATIVUS* L.) AQUEOUS EXTRACT AND THEIR ANTIOXIDANT
ACTIVITY AND CYTOTOXIC EFFECTS ON HUMAN PROSTATE CANCER CELLS**

Tolga ÖZKAN¹  Sueda Nur ELLİALTIOĞLU¹  Kemal BAŞ²  Serdar KARAKURT^{*1,2} 

¹ Biyokimya, Fen Fakültesi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye.

² KBRN, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye.

ABSTRACT

Saffron (*Crocus sativus* L.) is a valuable plant in traditional medicine, known for its pharmacological properties due to its components, such as rosetin, picrocrocin, and safranal. These components have therapeutic effects in various fields, including antidepressant, anticancer, immune, and respiratory systems. This study aimed to investigate the total phenolic, flavonoid, and antioxidant capacity of saffron extract. Additionally, silver nanoparticles (AgNPs) were synthesized using green synthesis from the saffron plant. The antioxidant capacity of saffron extract was determined using the DPPH and CUPRAC methods. The cytotoxic effect was evaluated under in vitro conditions using the Alamar blue assay. The AgNPs synthesized by green synthesis were characterized by UV-vis spectrophotometry and dynamic light scattering (DLS). It was confirmed that the synthesized AgNPs exhibited absorbance at 410 nm in the UV-vis spectrophotometer and had a size of 54 nm by DLS. The total phenolic content of saffron extract was 153.16 ± 0.03 mg GAE/g extract, and the flavonoid content was 1059.218 ± 0.003 mg QE/g extract. The IC50 value of saffron for DPPH was determined as 10.60 ± 0.2 µg/mL, while the A0.50 value for CUPRAC was 0.313 ± 0.4 µg/mL. The saffron extract and synthesized AgNPs exhibited significant cytotoxic effects on PC-3 prostate cancer cells. The IC50 value of AgNPs on PC-3 cells was measured as 25.34 ± 1.2 µg/mL. In summary, the silver nanoparticles derived from saffron and its extract exhibited antioxidant activity and have potential as a natural antioxidant source for health and industrial purposes, as well as a promising component in cancer therapy.

Keywords: Anatolian Saffron (*Crocus sativus* L.), Antioxidant Activity, Cytotoxicity, Green Synthesis, Human Prostate Cancer (PC-3), Silver Nanoparticles (AgNPs).

ÖZET

Safran (*Crocus sativus* L.), geleneksel tıpta önemli bir yer tutan ve rosetin, pikrokrosin ve safranal gibi farmakolojik bileşenlere sahip bir bitkidir. Bu bileşikler, antidepresan, antikanser, bağışıklık sistemi ve solunum sistemi gibi farklı tedavi alanlarında terapötik etkilere sahiptir. Bu çalışmanın amacı, safran ekstresi ile toplam fenolik, flavonoid ve antioksidan kapasiteyi incelemektir. Ayrıca, safran bitkisinden yeşil sentez yöntemi ile gümüş nanopartiküller (AgNP'ler) sentezlenmiştir. Safran ekstraktının antioksidan kapasitesi DPPH ve CUPRAC yöntemleri ile belirlenmiştir. Sitotoksik etki ise in vitro koşullarda Alamar blue yöntemiyle ölçülmüştür. Yeşil sentezle elde edilen AgNP'ler, UV-vis spektrofotometri ve dinamik ışık saçılma (DLS) teknikleriyle karakterize edilmiştir. Sentezlenen AgNP'lerin UV-vis spektrofotometresinde 410 nm'de absorpsiyon verdiği ve DLS ile 54 nm boyutunda olduğu tespit edilmiştir. Safran ekstresinin toplam fenolik içeriği 153.16 ± 0.03 mg GAE/g ekstre ve flavonoid içeriği ise 1059.218 ± 0.003 mg QE/g ekstre olarak belirlenmiştir. DPPH için safranın IC50 değeri 10.60 ± 0.2 µg/mL, CUPRAC için ise A0.50 değeri 0.313 ± 0.4 µg/mL olarak hesaplanmıştır. Safran ekstresi ve sentezlenen AgNP'ler, PC-3 prostat kanseri hücrelerinde belirgin bir sitotoksik etki göstermiştir. PC-3 hücrelerinde AgNP'lerin IC50 değeri 25.34 ± 1.2 µg/mL olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, safrandan elde edilen gümüş nanopartiküller ve safran ekstresi, antioksidan aktivite göstermekte olup, safran sağlık ve endüstriyel amaçlar için doğal bir potansiyel antioksidan kaynağı ve kanser tedavisinde kullanılabilir bir bileşen olarak değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Anadolu Safranı (*Crocus sativus* L.), Antioksidan Aktivite, Gümüş Nanopartiküller (AgNP), Sitotoksikite, İnsan Prostat Kanseri (PC-3), Yeşil Sentez.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: kserdar1@yahoo.com

1. GİRİŞ

Safran (*Crocus sativus* L.), geleneksel tıpta ve gıda endüstrisinde uzun yıllardır kullanılan değerli bir bitkidir. Fenolik bileşikler ve flavonoidler açısından zengin olan safran, güçlü antioksidan özelliklere sahip olmasıyla bilinir. Bu özellikleri nedeniyle, safran, çeşitli sağlık yararları ve terapötik etkiler için yaygın olarak araştırılmaktadır. Spesifik olarak, *Crocus sativus* L. (safran) Iridaceae familyasına ait bir bitkidir ve dünyanın en pahalı baharatı olarak bilinir. Bu bitki yüzyıllardır geleneksel İslam ve Arap tıbbında tıbbi bir bitki olarak kullanılmaktadır ve yiyecek ve içeceklerle renk, lezzet ve aroma verme özelliği nedeniyle kullanılmaktadır [1]. Başlıca biyoaktif sekonder metabolitleri olan krosinler, krosetin, pikrokrosin ve safranalın önemli antioksidan aktiviteye sahip olduğu bilinmektedir. Çeşitli *in vivo* ve *in vitro* çalışmalar safranın farmakolojik ve biyolojik etkilerini göstermiş olup, antioksidan potansiyelinin safranın tüm biyoaktif bileşenlerinin sinerjik etkisinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir [2]. Safranın biyoaktif bileşiklerinin, serbest radikal temizleme aktivitesinin en belirgin olduğu farklı mekanizmalar yoluyla hastalıkların tedavisinde önemli rol oynadığı bulunmuştur [2]. Kanserin önlenmesine ilişkin literatür, krosin ve krosetinin (karotenoid ailesine ait moleküller) tümöral hücre büyümesini inhibe etme yeteneğine sahip olduğunu belirtmektedir ve bu durum, farklı tümör tipleri üzerindeki terapötik potansiyellerini ortaya çıkarmak amacıyla safran ve bileşenlerinin karakterizasyonuna yönelik araştırmalara yol açmıştır [3]. Safranın çok sayıda mekanizmayı etkileyerek antitümör etki gösterdiği *in vitro* ve *in vivo* çalışmalarda raporlanmıştır [4]. Son yıllarda, safranın biyolojik aktiviteleri ve çevre dostu özellikleri, gümüş nanopartiküllerin (AgNP) sentezi gibi yenilikçi alanlarda da kullanılmaktadır.

Boyutları 1 ila 100 nm arasında değişen nanopartiküller, benzersiz fizikokimyasal ve optik özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir [5]. Günümüzde, çeşitli potansiyel uygulamaları nedeniyle gümüş nanopartiküller (AgNP'ler) üzerinde kapsamlı araştırmalar yürütülmektedir. AgNP'ler optik sensörler [6], elektrikli piller [7], süperkapasitörler [8], nanoseramikler [9], alev geciktiriciler, biyosensörler, ilaç dağıtım sistemeleri [10], katalizörler ve antimikrobiyal, antioksidan, anti-enflamatuar ve antikanser ajanlar [11, 12] dâhil olmak üzere çeşitli malzemelerde kullanılma potansiyeline sahiptir. AgNP'ler antibakteriyel özellikleri nedeniyle diş implantları, cerrahi cihazlar, kemik ve doku mühendisliği uygulamaları ve diğer biyomedikal cihazlar dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [13, 14]. AgNP'ler ayrıca gıda ambalajlarına, boyalara ve kaplamalara da dahil edilmiştir [15]. AgNP'lerin Alzheimer, Parkinson ve kardiyovasküler hastalıklar da dahil olmak üzere oksidatif stresle ilişkili bir dizi hastalığa karşı koruma sağladığı gösterilmiştir [16, 17]. AgNP'ler, kanser hücrelerinde apoptozu indüklemeye yetenekleri nedeniyle potansiyel antikanser ajanları olarak umut vadetmektedir. Ek olarak, AgNP'lerin normal hücrelere karşı düşük toksisiteye sahip olduğu gösterilmiştir ve bu da onları geleneksel kemoterapi ilaçlarına potansiyel bir alternatif haline getirir [18, 19]. AgNP'ler, küçük boyutları ve benzersiz fizikokimyasal özellikleri nedeniyle potansiyel ilaç dağıtım araçları olarak araştırılmaktadır. Özgüllüklerini ve etkinliklerini artırmak için ilaçlar veya hedefleme ligandları gibi farklı moleküllerle kolayca işlevselleştirilebilirler [20, 21]. Genel olarak, AgNP'ler çeşitli alanlarda (tıbbi cihazlar, tanısal implantlar, ilaç, peptit protein ve gen iletimi, bisensörler, biyoalgılama, kanser tedavisi, antimikrobiyaller, biyo-görüntüleme, sensörler, elektrotlar, optik cihazlar, doku onarımı, yara iyileşmesi, kardiyovasküler hastalıkların teşhisi) büyük potansiyel göstermiştir ve etki mekanizmalarını tam olarak anlamak ve farklı alanlarda kullanımlarını optimize etmek için bu alanda sürekli araştırma yapılması gerekmektedir.

AgNP'lerin sentezi için buharlaştırma yoğunlaştırma yöntemi, solvotermal sentez, kimyasal indirgeme yöntemi, gama ışınlama, ultrason yöntemi, UV ışınlama ve mikrodalga yöntemleri dahil olmak üzere ışınlama yöntemleri, litografi, elektrokimyasal yöntem, Tollen yöntemi, polianilin, termal ayrışma ve lazer ablasyon yöntemleri gibi çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler bildirilmiştir [22-25]. Bitkisel kaynakları ve çevre dostu yöntemleri kullanan bir süreç olan yeşil sentez, Zn, nO, Cu, CuO, Ti, TiO₂, Mg ve MgO dahil olmak üzere metal ve metal oksit nanopartiküllerinin üretiminde büyük ilgi görmektedir [26]. Doğal kaynakları kullanan yeşil sentez, bitkiler, algler, mantarlar, bakteriler gibi çeşitli doğal özütlerin yanı sıra enzimatik reaksiyonlar, polisakkaritler, uçucu yağlar, doğal bal ve polenlerin gücünden yararlanır [27]. Bu yeşil sentez yaklaşımları, geleneksel kimyasal yöntemlere sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Yeşil sentezde, fitokimyasalların, enzimlerin, polisakkaritlerin ve bu ekstraktlarda bulunan diğer doğal bileşiklerin doğal indirgeyici ve stabilize edici özellikleri nanopartiküllerin üretiminde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu biyoaktif bileşenler, metal ve metal

oksit nanopartiküllerinin hassas ve çevre dostu sentezini kolaylaştırarak hem biyoindirgeyici hem de stabilizatör görevi görür [28, 29]. Yeşil sentezin sayısız uygulamaları arasında, özellikle biyomedikal ve çevre sektörlerinde AgNP'lerin üretimindeki rolü öne çıkmaktadır. Yeşil sentez, canlı organizmaların nanoparçacıkları oluşturma ve kullanma şeklini kopyalayarak çeşitli uygulamalar için ideal olan olağanüstü özelliklere sahip nanoparçacıklar elde edilmesini sağlar [30]. Biyomedikal bağlamlarda, yeşil olarak sentezlenen AgNP'ler, tıbbi uygulamalarda biyouyumluluk, güvenlik ve etkinlik gibi katı gerekliliklerle uyumlu benzersiz nitelikleri nedeniyle büyük umut vaat etmektedir. Bu nanopartiküller çevre dostudur, düşük toksisite ve mükemmel stabilite sergileyerek onları ilaç dağıtımını, yara iyileşmesi, tanısal görüntüleme ve antimikrobiyal tedaviler için uygun adaylar haline getirir [31]. Bitki özleri, güçlü indirgeyici özelliklere sahip polifenoller, flavonoidler, terpenoidler ve alkaloidler gibi çeşitli fitokimyasallar içerir. Örneğin, bitkilerde bulunan flavonoidler ve fenolik bileşikler gümüş iyonlarına (Ag⁺) elektron vererek Ag⁺'ın AgNP'lere indirgenmesini sağlayabilir [32]. Bu indirgeme süreci genellikle aktif bileşikler ve gümüş iyonları arasındaki etkileşim tarafından başlatılır ve nanopartiküllerin çekirdeklenmesine ve büyümesine yol açar [33]. Bitki özlerinin biyoredüktan olarak kullanılması, geleneksel yöntemlerde tipik olarak kullanılan sert kimyasal redüktanlara olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Bu da zararlı yan ürünlerin oluşma riskini azaltır ve çevre kirliliğini en aza indirir [34]. Bitki özleri ayrıca AgNP'ler için etkili stabilize edici ajanlar olarak da işlev görür. Ekstraktlarda bulunan polifenoller gibi fitokimyasallar, elektrostatik etkileşimler ve hidrojen bağı veya Van der Waals kuvvetleri yoluyla nanopartikül yüzeyine adsorbe olabilir. Bu adsorpsiyon, AgNP'lerin aglomerasyonunu veya agregasyonunu önlemeye yardımcı olarak zaman içinde stabilitelerini sağlar [35]. Bu stabilite, nanopartiküllerin biyomedikal ve katalitik olanlar da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda düzgün dağılımını ve uzun vadeli etkinliğini sağlamak için çok önemlidir. Bitki özlerinden elde edilen stabilize edici maddeler, küçük partikül boyutunun korunmasına yardımcı olur ve çökelmeyi önleyerek nanopartiküllerin dağınık kalmasını sağlar [36]. Bitki özleri kullanılarak sentezlenen AgNP'lerin biyouyumluluğu, onları tıbbi ve biyolojik uygulamalar için çok uygun hale getirmektedir. Bu nanopartiküller ilaç dağıtım sistemlerinde, yara iyileşmesinde, doku mühendisliğinde ve canlı organizmalar üzerinde olumsuz etkileri olmadan antimikrobiyal ajanlar olarak kullanılabilir. Çeşitli kanser türleri ile safranın bileşenleri arasında bir korelasyon olduğu gösterilmiştir. Küresel olarak erkeklerde akciğer kanserinden sonra en sık görülen ikinci kanser olan prostat kanseri, 2020 yılında 1.414.259 yeni vaka ve 375.304 ölümle tüm erkeklerde kansere bağlı ölümlerin %3,8'ini oluşturmaktadır [37]. Dünya genelinde görülme ve ölüm oranları yaşla yakından ilişkilidir ve ortalama tanı yaşı 66'dır. Müdahale edilmediği takdirde, 2040 yılına kadar tahmini 2.293.818 yeni vaka görülmesi ve ölüm oranlarında küçük bir artış (%1.05) olması beklenmektedir [37]. Prostat kanseri genellikle erken evrelerinde belirti vermez ve yavaş ilerleyebilir, çok az tedavi gerektirir veya hiç tedavi gerektirmez. Günümüzde yapılan kemoterapi, radyoterapi ve cerrahi müdahaleler hastada bulunan kanserli dokuyu öldürmekle beraber kansersiz sağlıklı dokuları da öldürmektedir. Safran (*Crocus sativus* L.) bitkisi doğal kökenli olup toksik etki içermediğinden dolayı sağlıklı dokulara hasarı en aza indirerek doğrudan kanserli dokulara etki edebilir ve dolayısıyla prostat kanserinin tedavisinde önemli rol oynayabilir. Bu çalışmanın amacı, Anadolu safranı (*Crocus sativus* L.) sulu ekstraktı kullanılarak gümüş nanopartiküllerin (AgNP) yeşil sentezini gerçekleştirmek, sentezlenen AgNP'lerin yapısal ve kimyasal özelliklerini karakterize etmek ve antioksidan aktivitelerini değerlendirmektir. Ayrıca, sentezlenen AgNP'lerin insan prostat kanseri (PC-3) hücreleri üzerindeki sitotoksik etkilerini belirlemek ve potansiyel biyomedikal uygulamalarını araştırmak hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Ekstraksiyon Çalışmalar

2024 yılı Ekim ayında Karabük'ün Safranbolu ilçesinden hasadı yapılmış olan kurutulmuş safran stigma özütü, ağırlığının 5 katı kadar saf su içine eklenmiştir. Yatay çalkalayıcıda 14-16 saat süreyle 64 rpm'de maserasyonu işlemi yapılmıştır. Maserasyondan sonra evaporatörde çözücü uzaklaştırılmıştır. Ardından ekstrakt etanol ile çözüldükten sonra 24 saat etüv içerisinde 60°C'de kurutulmuştur.

2.2. Yeşil Sentez Yoluyla Gümüş Nanopartikül Sentezi

294 mg Trisodyumsitrat dihidrat 10 mL dH₂O içerisinde çözündürülmüştür. 10 mg AgNO₃, 80 mL dH₂O içerisinde çözündürülmüştür. 1.36 mL Trisodyumsitrat dihidrat çözeltisi ve 400 µL Sulu safran ekstraktı

birleştirilmiştir. Karışım üzerine 18.24 mL dH₂O eklenerek toplam hacim 20 mL olacak şekilde tamamlanmıştır.

80 mL AgNO₃ 60°C’de ısıtılmıştır. Isıtılan AgNO₃ üzerine Solüsyon A damla damla eklenmiş ve son damladan sonra 3 dakika daha 60°C bekletilmiştir. Süre sonunda karışım 100°C 20 dakika bekletilmiştir. Oda sıcaklığına gelen karışım ve 0.2 µm çaplı filtreden süzölmüştür. Sentezlenen Gümüş Nanopartiküller +4°C de saklanmıştır.

2.3. Karakterizasyon

Sentezlenen AgNP’lerin UV-Vis spektrumları 200-800 nm aralığındaki dalga boyunda UV-Vis spektrofotometre de alınmıştır (UV-1900I, SHIMADZU). Yeşil yöntemle sentezlenen AgNP’lerin ortalama partikül boyutu, dağılımı ve zeta potansiyeli (Zetasizer Nano ZS, ABD) kullanılarak tespit edildi.

2.4. Antioksidan aktivite çalışmaları

2.4.1. DPPH

Safran’nın serbest radikal süpürme aktivitesi, metanolün kontrol olarak kullanıldığı DPPH Serbest Radikal Süpürme deneyi ile belirlenmiştir. Reaksiyon karışımı 0.4 M DPPH ve çeşitli konsantrasyonlarda metanol ile seyreltilmiş safran içermektedir. Renk değişimi spektrofotometrik olarak 517 nm’de ölçölmüştür (Multiskan Go, Thermo Fisher Scientific, ABD).

2.4.2. Kuprik İyonu İndirgeyici Antioksidan Kapasitesi (CUPRAC)

Safranın Kuprik İyonu İndirgeyici Antioksidan Kapasitesi, Kuprik İndirgeyici Antioksidan Kapasite deneyi (CUPRAC) ile belirlenmiştir. Reaksiyon karışımı 10 mM Cu (II), 7.5 mM neokuproin, 1 M NH₄Ac tamponu ve farklı konsantrasyonlarda safran içermektedir. Bu karışım 96 kuyucuklu bir plakanın her bir kuyucuğuna eklenmiştir. 1 saatlik inkübasyondan sonra 450 nm’deki absorbans Multiskan Go mikropilaka okuyucu (Thermo Fisher Scientific, ABD) kullanılarak ölçölmüştür. Sonuçlar 0.500 absorbans sağlayan konsantrasyona karşılık gelen A_{0.50} olarak verilmiştir.

2.5. Toplam Fenolik ve Flavonoid Tayini

Folin Ciocalteu yöntemine göre, safran ekstraktları toplam fenolik madde açısından ölçölmüştür [38]. 750-765 nm dalga boyunda absorbans UV vis spektrofotometre kullanılarak ölçölmüştür. Toplam fenolik madde, gallik asit çözeltisinin (0-200 µg/mL) kalibrasyon eğrisinin ekstrapolasyonu ile hesaplanmıştır.

Ekstraktın toplam flavonoid içeriği Djeridane ve arkadaşlarının yöntemine göre belirlenmiştir [39]. Kısaca, eşit hacimlerde %2 AlCl₃ çözeltisi ve numune (safran ekstraktı) karıştırılmıştır. 10 dakika sonra karışımın absorbansı 430 nm’de ölçölmüştür. Toplam Flavonoid İçeriği, gram kuru ekstrakt/mg kuersetin eşdeğeri olarak ifade edilmiştir (mg QE/g ekstrakt).

2.6. *In Vitro* Sitotoksiste Çalışmaları

2.6.1. Hücre Kültürü

İnsan prostat kanseri hücre hattı PC-3, ATCC (American Type Culture Collection, Rockville, MD) kuruluşundan temin edilmiştir. Hücreler, %10 FBS (fetal bovine serum) ve 2 mM L-glutamin içeren Ham’s F12 besiyerinde, 37°C ve %5 CO₂ içeren bir inkübatörde kültüre edilmiştir. Aynı besiyeri, AgNP’lerin seyreltilmesi için de kullanılmıştır.

2.6.2. Sitotoksiste Analizi

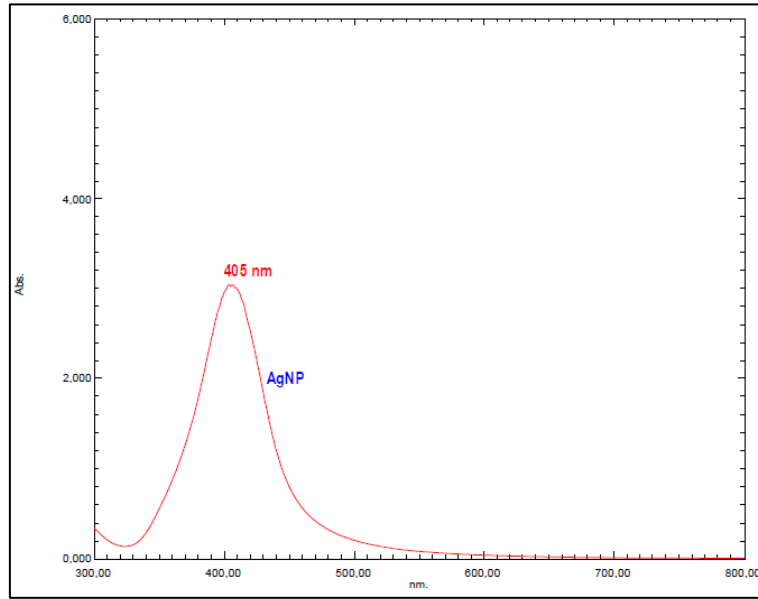
Her bir 96 kuyucuklu plakanın kuyucuklarına 1 × 10⁴ PC-3 hücresi ekilmiş ve 0 ile 200 µg/mL arasında değişen konsantrasyonlarda AgNP’lere maruz bırakılmıştır. Hücre canlılığını değerlendirmek için Alamar Blue yöntemi (Invitrogen, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) kullanılmıştır. Canlı ve ölü hücre oranlarının belirlenmesi, %0.04 Trypan Blue ile boyama yapılarak Biorad TC20 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.7. İstatiksel Analiz

Veriler ortalama değer $\pm$ standart sapma (SD) olarak gösterilmiştir. Gruplar arasındaki farklılıklar tek yönlü ANOVA ve Student's t-testi kullanılarak değerlendirilmiştir. İstatistiksel anlamlılık * $p < 0.05$; ** $p < 0.001$ olarak ifade edilmiştir. Tüm hesaplamalar, grafikler ve istatistiksel analizler GraphPad Prism (GraphPad Software 8.0.2) kullanılarak oluşturulmuştur.

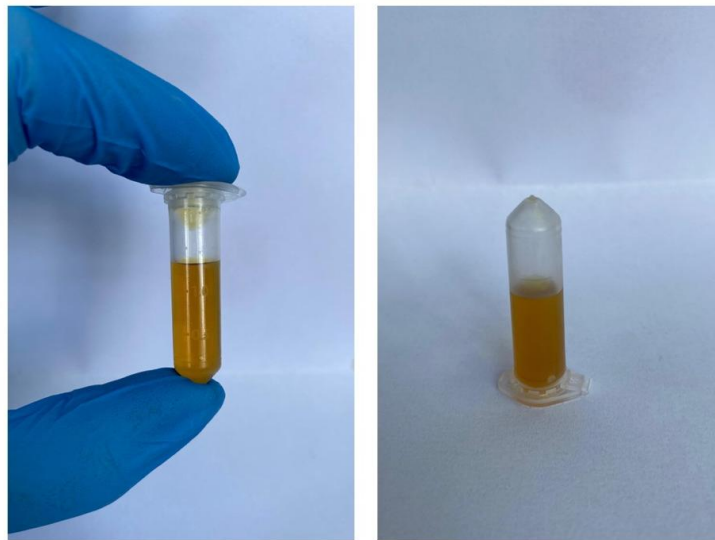
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gümüş nanopartiküllerin UV-Vis absorpsiyon spektrumu Şekil 1'de gösterilmektedir. Whelan ve ark. [40] ile Kırkljcs ve ark. [41] göre gümüş nanopartiküller 400-410 nm absorpsiyon spektrum bandı sergilemektedir. AgNP sentezinin absorpsiyon spektrumunda, AgNP'nin karakteristik yüzey plazmon rezonansına karşılık gelen 405 nm'de maksimum absorpsiyon ile tek ve iyi tanımlanmış bir pik verdiği görülmektedir.



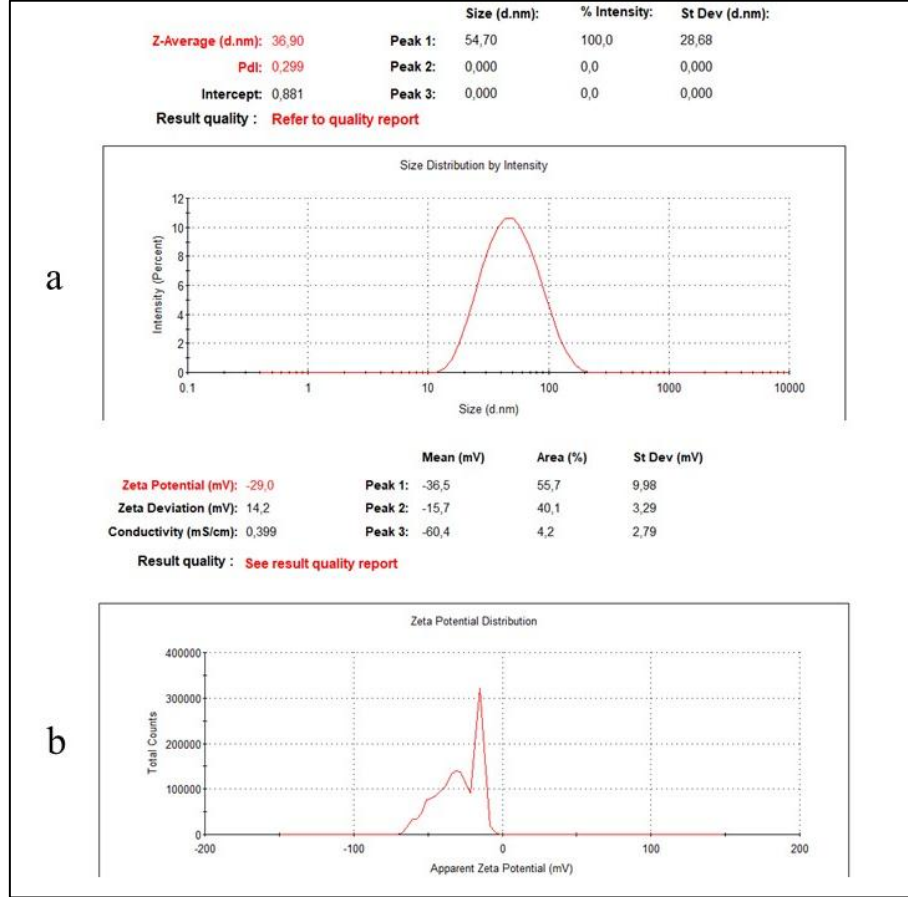
Şekil 1. Safran bitkisinden yeşil sentezle sentezlenen AgNP'lerin UV-Vis spektrumları

Ayrıca AgNP'lerin sarı rengi ile birlikte iyi tanımlanmış pik, AgNP'lerin oksidasyonunun olmadığına bir kanıttır [42,43]. Bu çalışma safradan sezenelenen AgNP'lerin renginde sarımsı-kahverengi olduğu görülmüştür (Şekil 2).



Şekil 2. Safran bitkisinden yeşil sentezle sentezlenen AgNP'lerin gün ışığında görüntüleri

Dinamik ışık saçılımı (DLS) ile safrandan yeşil sentezle sentezlenen AgNP'lerin parçacık boyutunun 54 nm olduğunu ve polidispersite indeksinin (PdI) 0.299 olduğunu tespit edilmiştir (Şekil 3). Bir çözeltideki bir NP'nin ortalama homojenliği PdI değeri ile tahmin edilir, çünkü daha büyük bir değer bir çözeltideki NP'lerin daha büyük bir boyut dağılımını göstermektedir. NP'lerin toplanması da PdI değeri ile gösterilir, çünkü PdI değeri 0.1'den küçükse bir numune tek dağılımlıdır [43]. Dolayısıyla, sonuçlarımızda DLS ve PdI tarafından gösterilen değerler NP'lerin çok az toplandığını göstermektedir.



Şekil 3. AgNP'lerin Zeta Potansiyeli

Toplam biyoaktif içeriği tahmin etmek için çeşitli spektrofotometrik yöntemler kullanılmıştır. Safran ekstresinin yüksek fenolik içeriğe (153.16 ± 0.03 mg GAE/g ekstrakt) ve flavonoid içeriğine (1059.218 ± 0.003 mg QE/g ekstrakt) sahip olduğu tespit edilmiştir (Tablo 1). Karimi ve ark. Safran'ın metanolik, etanolik ve kaynar su ekstraktlarının fenolik içeriğinde sırasıyla 6.54, 6.35 ve 5.70 mg GAE/g olduğunu tespit etmiştir [44]. Benzer şekilde, flavonoid içeriklerini metanolik ekstrakta 5.88 mg rutin eşdeğeri/g, kaynar su ekstraktı 3.86 mg rutin eşdeğeri/g ve etanolik ekstrakta 2.91 mg rutin eşdeğeri/g olarak belirlemiştir.

Tablo 1. Safran Ekstraktının Toplam Fenolik ve Toplam Flavonoid Miktarı

	Toplam Fenolik (mg GAE/g ekstrakt)	Toplam Flavonoid (mg QEb /g ekstrakt)
Safran	$153.16 \mu\text{g/mL} \pm 0.03$	$1059.218 \mu\text{g/mL} \pm 0.003$

Safran ekstraktının antioksidan aktivitesinin tespitinde DPPH ve CUPRAC yöntemleri kullanılmıştır. DPPH radikalleri kararlı azot merkezli radikallerdir ve antioksidatif gıdaların, sağlık ürünlerinin ve farmasötiklerin antioksidan kapasitesi için önemli göstergelerden biridir [45]. DPPH radikalinin tek bir elektronu vardır, alkol çözeltisi mordur ve 515 nm'de güçlü bir absorpsiyona sahiptir. Antioksidanlar mevcut olduğunda, DPPH serbest radikalleri uzaklaştırılır, çözeltisinin rengi daha açık hale gelir, 515

nm'lik absorbans azalır ve absorbansdaki değişim, belirli bir aralıktaki serbest radikal uzaklaştırma derecesi ile orantılıdır [45]. Tablo 2, örnek konsantrasyonu azaldığında, safran tarafından DPPH temizlenme oranının azaldığını ortaya göstermektedir. Safranın IC_{50} değeri 10.60 ± 0.2 $\mu\text{g/mL}$ olarak belirlenmiştir. Bu değerin literatürdeki değerlerden daha düşük olduğu görülmüştür. Örneğin Li ve ark. safranın taç yaprakların IC_{50} değerini 28.37 mg/mL , stigmaların IC_{50} değerini ise 38.99 mg/mL olarak tespit etmiştir [46]. CUPRAC yöntemi kullanılarak yapılan antioksidan kapasite sonuçlarına göre Safran ekstresinin toplam antioksidan kapasitesi 59.25 ile 88.18 $\mu\text{g/mL}$ arasında değişmektedir. Safran'ın $A_{0.50}$ değeri 0.313 ± 0.4 $\mu\text{g/mL}$ olarak tespit edilmiştir.

Tablo 2. Safran ekstresinin antioksidan aktivitesi

DPPH Aktivite (% İnhibisyon)										
	100 µg/mL	200 µg/mL	500 µg/mL	1000 µg/mL						IC ₅₀ µg/mL
Safran	-68.91±0.1	-58.26±0.1	-49.40±0.01	-30.02±0.00						10.60±0.2
	1.56 µg/mL	3.125 µg/mL	6.25 µg/mL	12.5 µg/mL	25 µg/mL	50 µg/mL	100 µg/mL	200 µg/mL	IC ₅₀ µg/mL	
Kuarsetin	-59.25±0.08	-39.83±0.02	-17.36±0.005	24.59±0.08	74.97±0.02	86.63±0.005	87.39±0.006	88.18±0.007	5.30±0.8	
CUPRAC Aktivite (Absorbans)										
	100 µg/mL	200 µg/mL	400 µg/mL	800 µg/mL						A _{0.50} µg/mL
Safran	0.0557±0.005	0.1226±0.01	0.3109±0.02	0.6286±0.07						0.313±0.4
	0 µg/mL	25 µg/mL	50 µg/mL	100 µg/mL						A _{0.50} µg/mL
Gallik asit	0.00 ± 0.005	0.35 ± 0.02	0.67 ± 0.04	1.42 ± 0.16						3546±0.9

4. SONUÇ

Bu çalışmada safran ekstresi kullanılarak gümüş nanopartiküllerin (AgNP) başarılı bir şekilde yeşil sentezinin gerçekleştirildiğini göstermiştir. UV-Vis absorpsiyon spektrumu, 405 nm’de gözlenen karakteristik yüzey plazmon rezonans (SPR) piki ile iyi tanımlanmış ve stabil AgNP’lerin oluştuğunu doğrulamıştır. Dinamik ışık saçılımı (DLS) analizi, AgNP’lerin ortalama parçacık boyutunun 54 nm olduğunu ve polidispersite indeksinin (PDI) 0.299 olduğunu belirleyerek minimal agregasyon gösterdiğini ortaya koymuştur. Safran ekstresinin yüksek toplam fenolik ve flavonoid içeriği, DPPH ve CUPRAC testleri ile doğrulanan güçlü antioksidan aktiviteye katkı sağlamıştır.

Ayrıca, insan prostat kanseri PC-3 hücreleri üzerinde gerçekleştirilen sitotoksikite analizleri, AgNP’lerin hücre canlılığını anlamlı şekilde azalttığını ve IC50 değerinin 49.1 µg/mL olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, safran ile sentezlenen AgNP’lerin güçlü antioksidan kapasiteye sahip olduğunu ve kanser hücreleri üzerinde seçici sitotoksik etki gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

TEŞEKKÜRLER

Bu proje TUBİTAK 2209A kapsamında desteklenmiştir.

REFERANSLAR

- [1] José Bagur, M., et al., *Saffron: An old medicinal plant and a potential novel functional food*. Molecules, 2017. **23**(1): p. 30.
- [2] Bukhari, S.I., M. Manzoor, and M. Dhar, *A comprehensive review of the pharmacological potential of Crocus sativus and its bioactive apocarotenoids*. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2018. **98**: p. 733-745.
- [3] Ma, A., et al., *The effects and underlying mechanisms of medicine and food homologous flowers on the prevention and treatment of related diseases*. Journal of Food Biochemistry, 2022. **46**(12): p. e14430.
- [4] Christodoulou, E., et al., *Saffron: a natural product with potential pharmaceutical applications*. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2015. **67**(12): p. 1634-1649.
- [5] Khan, I., K. Saeed, and I. Khan, *Nanoparticles: Properties, applications and toxicities*. Arabian journal of chemistry, 2019. **12**(7): p. 908-931.
- [6] Beck, F., M. Loessl, and A.J. Baeumner, *Signaling strategies of silver nanoparticles in optical and electrochemical biosensors: Considering their potential for the point-of-care*. Microchimica Acta, 2023. **190**(3): p. 91.
- [7] Luo, Z., et al., *Highly dispersed silver nanoparticles for performance-enhanced lithium oxygen batteries*. Journal of Materials Science & Technology, 2021. **73**: p. 171-177.
- [8] Sun, Y.-A., et al., *Silver nanoparticles-decorating manganese oxide hybrid nanostructures for supercapacitor applications*. Langmuir, 2019. **35**(44): p. 14203-14212.
- [9] Kapil, N., S.V. Mayani, and K.G. Bhattacharyya, *Environmental implications of nanoceramic applications*. Results in Chemistry, 2023. **5**: p. 100724.
- [10] Prasher, P., et al., *Emerging trends in clinical implications of bio-conjugated silver nanoparticles in drug delivery*. Colloid and Interface Science Communications, 2020. **35**: p. 100244.
- [11] Skóra, B., et al., *Noncytotoxic silver nanoparticles as a new antimicrobial strategy*. Scientific Reports, 2021. **11**(1): p. 13451.
- [12] Sharifi-Rad, M. and P. Pohl, *Synthesis of biogenic silver nanoparticles (Agcl-NPs) using a pulicaria vulgaris gaertn. aerial part extract and their application as antibacterial, antifungal and antioxidant agents*. Nanomaterials, 2020. **10**(4): p. 638.
- [13] Narciso, A.M., et al., *Antimicrobial green silver nanoparticles in bone grafts functionalization for biomedical applications*. Biocatalysis and agricultural biotechnology, 2021. **35**: p. 102074.

- [14] Damle, A., et al., *A concise review on implications of silver nanoparticles in bone tissue engineering*. Biomaterials Advances, 2022. **141**: p. 213099.
- [15] Asafa, T., et al., *Physico-mechanical properties of emulsion paint embedded with silver nanoparticles*. Bulletin of Materials Science, 2021. **44**: p. 1-11.
- [16] Kim, K.S., C.G. Song, and P.M. Kang, *Targeting oxidative stress using nanoparticles as a theranostic strategy for cardiovascular diseases*. Antioxidants & redox signaling, 2019. **30**(5): p. 733-746.
- [17] Huang, C.-L., et al., *Silver nanoparticles affect on gene expression of inflammatory and neurodegenerative responses in mouse brain neural cells*. Environmental research, 2015. **136**: p. 253-263.
- [18] Kumari, R., et al., *Apoptosis induction in lung and prostate cancer cells through silver nanoparticles synthesized from Pinus roxburghii bioactive fraction*. JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry, 2020. **25**: p. 23-37.
- [19] Raj, A., et al., *Exploring the cytotoxicity on human lung cancer cells and DNA binding stratagem of camptothecin functionalised silver nanoparticles through multi-spectroscopic, and calorimetric approach*. Scientific Reports, 2023. **13**(1): p. 9045.
- [20] Hussein, H.A. and M.A. Abdullah, *Novel drug delivery systems based on silver nanoparticles, hyaluronic acid, lipid nanoparticles and liposomes for cancer treatment*. Applied Nanoscience, 2022. **12**(11): p. 3071-3096.
- [21] Burduşel, A.-C., et al., *Biomedical applications of silver nanoparticles: an up-to-date overview*. Nanomaterials, 2018. **8**(9): p. 681.
- [22] Marinescu, L., et al., *Comparative antimicrobial activity of silver nanoparticles obtained by wet chemical reduction and solvothermal methods*. International Journal of Molecular Sciences, 2022. **23**(11): p. 5982.
- [23] Quintero-Quiroz, C., et al., *Optimization of silver nanoparticle synthesis by chemical reduction and evaluation of its antimicrobial and toxic activity*. Biomaterials research, 2019. **23**(1): p. 27.
- [24] He, C., et al., *Formation and characterization of silver nanoparticles in aqueous solution via ultrasonic irradiation*. Ultrasonics sonochemistry, 2014. **21**(2): p. 542-548.
- [25] Scuderi, M., et al., *Nanoscale study of the tarnishing process in electron beam lithography-fabricated silver nanoparticles for plasmonic applications*. The Journal of Physical Chemistry C, 2016. **120**(42): p. 24314-24323.
- [26] Roy, N., et al., *Green synthesis of silver nanoparticles: an approach to overcome toxicity*. Environmental toxicology and pharmacology, 2013. **36**(3): p. 807-812.
- [27] Shameem Ahamed, S., R. Chola, and R. Venkatachalam, *Green Synthesis of Nanoparticles Using Plant and Biological Organisms and Their Biomedical Applications*, in *Modern Nanotechnology: Volume 2: Green Synthesis, Sustainable Energy and Impacts*. 2023, Springer. p. 91-121.
- [28] Abbasi, R., et al., *Structural parameters of nanoparticles affecting their toxicity for biomedical applications: a review*. Journal of Nanoparticle Research, 2023. **25**(3): p. 43.
- [29] Simon, S., et al., *Biomedical applications of plant extract-synthesized silver nanoparticles*. Biomedicines, 2022. **10**(11): p. 2792.
- [30] Raj, R., et al., *Biogenic silver based nanostructures: Synthesis, mechanistic approach and biological applications*. Environmental Research, 2023. **231**: p. 116045.
- [31] Shaikh, W.A., et al., *A review of the phytochemical mediated synthesis of AgNP (silver nanoparticle): The wonder particle of the past decade*. Applied Nanoscience, 2021. **11**(11): p. 2625-2660.

-
- [32] Adeyemi, J.O., et al., *Plant extracts mediated metal-based nanoparticles: synthesis and biological applications*. Biomolecules, 2022. **12**(5): p. 627.
- [33] Xu, L., et al., *Silver nanoparticles: Synthesis, medical applications and biosafety*. Theranostics, 2020. **10**(20): p. 8996.
- [34] Hosseingholian, A., et al., *Recent advances in green synthesized nanoparticles: From production to application*. Materials Today Sustainability, 2023. **24**: p. 100500.
- [35] Sharma, N.K., et al., *Green route synthesis and characterization techniques of silver nanoparticles and their biological adeptness*. ACS omega, 2022. **7**(31): p. 27004-27020.
- [36] Javed, R., et al., *Role of capping agents in the application of nanoparticles in biomedicine and environmental remediation: recent trends and future prospects*. Journal of Nanobiotechnology, 2020. **18**: p. 1-15.
- [37] Ferlay, J., et al., *Global cancer observatory: cancer today*. Lyon: International agency for research on cancer, 2020. **20182020**.
- [38] Slinkard, K. and V.L. Singleton, *Total phenol analysis: automation and comparison with manual methods*. American journal of enology and viticulture, 1977. **28**(1): p. 49-55.
- [39] Djeridane, A., et al., *Antioxidant activity of some Algerian medicinal plants extracts containing phenolic compounds*. Food chemistry, 2006. **97**(4): p. 654-660.
- [40] Whelan, A.M., et al., *Enhanced third-order optical nonlinearity of silver nanoparticles with a tunable surface plasmon resonance*. Journal of Nanoscience and nanotechnology, 2004. **4**(1-2): p. 66-68.
- [41] Krklješ, A., *Radiolytic synthesis of nanocomposites based on noble metal nanoparticles and natural polymer, and their application as biomaterial*. 2011.
- [42] Varkey, A. and A. Fort, *Some optical properties of silver peroxide (AgO) and silver oxide (Ag₂O) films produced by chemical-bath deposition*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1993. **29**(3): p. 253-259.
- [43] Clayton, K.N., et al., *Physical characterization of nanoparticle size and surface modification using particle scattering diffusometry*. Biomicrofluidics, 2016. **10**(5).
- [44] Karimi, E., et al., *Evaluation of Crocus sativus L. Stigma Phenolic and Flavonoid Compounds and Its Antioxidant Activity*. Molecules, 2010. **15**(9): p. 6244-6256.
- [45] Sharma, O.P. and T.K. Bhat, *DPPH antioxidant assay revisited*. Food Chemistry, 2009. **113**(4): p. 1202-1205.
- [46] Li, X., et al., *"Plant Golden" C. sativus: Qualitative and quantitative analysis of major components in stigmas and petals and their biological activity in vitro*. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2024. **243**: p. 116115.

FARKLI ÖZELLİKTE KAPLAMALI KUMAŞ İÇEREN SANDVIÇ KOMPOZİT YAPILARIN TERMAL VE AKUSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THERMAL AND ACOUSTIC PROPERTIES OF SANDWICH COMPOSITE STRUCTURES CONTAINING COATED FABRIC WITH DIFFERENT PROPERTIES

Sena ARSLAN ATMACA^{*1}  Öznur İSKENDER¹ 

¹ Formfleks Otomotiv Yan Sanayi ve Ticaret A.Ş., Bursa, Türkiye.

ABSTRACT

In motor vehicles such as buses, trucks, trailers, and passenger cars, composite materials are utilized to enhance driving comfort by providing thermal and acoustic insulation within the cabin. In this study, multi-layered structures were produced using a combination of coated felt and phenolic felt for the top and bottom layers, and single or double-layered configurations of coated fabrics, such as aluminum foil-coated fiberglass fabric, silicone-coated fiberglass fabric, and vermiculite-coated silica fabric, for the intermediate layers. The structures were fabricated in flat molds under conditions of 185°C temperature, 170 bar pressure, and 120 seconds duration. The sound absorption coefficients of these structures were measured using an alpha cabin test device, and their thermal conductivity coefficients were determined using a thermal conductivity measurement device. The acoustic performance tests revealed that the K3 composite, consisting of phenolic felt, vermiculite-coated silica fabric, and phenolic felt sandwiched between two coated felts, was most effective at absorbing noise from the engine compartment. Evaluation of the thermal conductivity coefficients ranked the thermal insulation performance of the sandwich panels as follows: K1> K2> K3> K6> K4> K5. Based on the obtained data, it was determined that the K3 sample provides an optimal balance of acoustic and thermal insulation performance, making it the most suitable sandwich composite structure for these applications.

Keywords: Acoustic Performance, Composite Material, Sandwich Structure, Thermal Insulation.

ÖZET

Otobüs, kamyon, tır veya binek araç gibi farklı motorlu taşıtların iç kabininde, termal ve akustik izolasyon sağlayarak, sürüş konforunu artırmaya yönelik olarak kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, alt ve üst katmanda kaplama telası ve fenolik keçe kombinasyonu, ara katmanlarda ise özellikle termal izolasyon özellikleri ile ön plana çıkan alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş, silikon kaplı cam elyaf kumaş ve vermikülit kaplı silika kumaş gibi kaplamalı kumaşların tekli ve ikili kombinasyonları kullanılarak düz kalıpta 185°C sıcaklık, 170 bar basınç ve 120 saniye süre ile çok katmanlı yapılar oluşturulmuş ve bu yapıların alfa kabin test cihazında ses yutumu katsayıları, termal iletkenlik ölçüm cihazında ise termal iletkenlik katsayıları ölçülerek birbiri ile karşılaştırılmıştır. Akustik performans test sonuçları incelendiğinde, motor bölgesinde meydana gelen gürültülerin absorpsiyonunu sağlamak üzere, iki kaplama telası arası, fenolik keçe, vermikülit kaplı silika kumaş ve fenolik keçe içeren K3 kompozisyonu olduğu tespit edilmiştir. Termal iletkenlik katsayısı sonuçları değerlendirildiğinde ise elde edilen sandviç plakaların termal izolasyon performansı K1> K2> K3> K6> K4> K5 şeklinde sıralanmaktadır. Elde edilen veriler göz önüne alındığında hem akustik hem de termal izolasyon performansını bir arada sunabilecek sandviç kompozit yapı K3 numunesi ile sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akustik Performans, Kompozit Malzeme, Sandviç Yapı, Termal İzolasyon.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: sena.arslan@ff-rd.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
20.12.2024	04.02.2025	26.03.2025	01.06.2025

1. GİRİŞ

Günümüzde otomotiv endüstrisi, kullanıcı deneyimini iyileştirmek ve sürüş konforunu artırmak amacıyla sürekli gelişim göstermektedir. Otomobil kabinleri, yeni nesil araçlarda yalnızca bir ulaşım aracı olmaktan ziyade, konforlu bir yaşam alanı olarak tasarlanmaktadır. Konfor beklentisi ses ve termal izolasyon ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Kabin içi termal denge ve akustik konfor, kullanıcıların sürüş deneyimi doğrudan etkilemektedir. Sıcak veya soğuk hava koşullarında termal izolasyonun yetersiz olması, yolcu konforunu ve sürüş güvenliğini olumsuz etkilemektedir [1]. Aynı zamanda kabin içi gürültü seviyesinin düşük olması, sürücü ve yolcuların yorgunluk hissinin azalmasına yardımcı olmaktadır [2].

Bu hedefler doğrultusunda, otomobillerde taban, tavan, motor bölgesi, kaput altı, egzoz hattı ve bagaj alanı gibi çeşitli bölgelerde ses ve termal izolatörler kullanılır. Bu izolatörlerin üretiminde genellikle, kompozit malzeme olarak adlandırılan, iki veya daha fazla farklı bileşenden oluşan malzemeler kullanılmaktadır [3]. Kompozit malzemeler, bireysel özelliklerini korumakla beraber, diğer malzemeler ile birleştirildikleri için daha üstün mekanik, termal ve akustik özellikler kazanan mühendislik materyallerine dönüşmektedir.

Kompozit malzemeler yaklaşık 80 yıldır otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır [4]. Hafiflik, yüksek mekanik dayanım, korozyon direnci ve tasarım kolaylığı gibi özellikler sayesinde otomotiv endüstrisinde sıklıkla tercih edilmektedir [5]. 2020 yılında elde edilen verilere göre, küresel otomotiv kompozit malzemeleri pazarının yaklaşık 9,4 milyar ABD doları olduğu tahmin edilmiş olup, 2027 yılına kadar yaklaşık 19,4 milyar ABD dolarına ulaşması öngörülmektedir [6].

Otomobillerde termal ve akustik performans beklentileri nedeniyle, karbon elyaf takviyeli, cam elyaf takviyeli, seramik matrisli, alüminyum matrisli, doğal elyaf ve sentetik elyaf kompozitler gibi birden fazla tipte kompozit malzeme kullanılmaktadır [7]. Her iki performans beklentisini karşılamak amacıyla, farklı kompozit malzemelerden oluşan çok katmanlı yapılar oluşturularak, sandviç malzemeler elde edilebilir.

Bir araç içerisinde gürültü üç temel kaynaktan yayılır. Bunlar motor gürültüsü, yol gürültüsü ve rüzgâr gürültüsüdür. Motor gürültüsü, güç aktarma elemanlarının çalışması esnasında ortaya çıkan gürültü ve titreşimlerinden kaynaklanmakta olup, frekans aralığı 50-500Hz'dir. Düşük devirlerde düşük frekanslarda ses çıkarırken, motor devri arttıkça frekans da yükselir. Yol gürültüsü, yol yüzeyi ve lastik arasındaki etkileşimden kaynaklanmakta ve frekans aralığı 500-1300Hz'dir. Yol gürültüsü genellikle 40 km/saat üzerindeki araç hızlarında fark edilmeye başlar, ancak genel iç gürültüye maksimum katkısı 50 ila 80 km/saat arasındadır ve daha sonra aerodinamik gürültünün baskın olduğu yüksek hızlarda azalır. Rüzgâr gürültüsü ise, aracın 100 km/saat üzerindeki hızlarda sabit bir ortam içerisinde hareket ederken çıkan aerodinamik gürültüdür. 1000-5000Hz frekans aralığındadır [8].

Bununla birlikte, bir araçta motor, egzoz sistemi, fren sistemi, elektrikli veya hibrit araçlar için batarya sistemi ve elektronik bileşenler başlıca ısı kaynaklarıdır. Özellikle motor, batarya ve egzoz gibi yüksek ısı üreten bileşenlerin, düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip kompozit malzemeler ile kaplanması ve çevresindeki ısı transferinin minimize edilmesi, aracın içindeki sıcaklık dengesini korumak için oldukça önemlidir. Örneğin, bir yolcu otobüsünde sürüş esnasında motor bölgesi 80°C sıcaklığa ulaşmaktadır [9].

Literatürde akustik performansı iyileştirmeye yönelik olarak, kabin içi gürültü seviyesini azaltmak amacıyla, dıştan içe doğru iki kaplama telası arasında PP/GF, PE film, taş yünü içeren bir kompozit sandviç yapı öneren bir çalışma ortaya koyulmuştur [10]. Başka bir çalışmada ise, hindistan cevizi lifi ve hindistan cevizi kabuğu kullanılarak kompozit ses emici malzemeler oluşturulmuş ve orta, düşük frekansta etkili sonuçlar elde edilmiştir [11]. Elektrikli araç batarya muhafazalarında kullanılmak üzere, termal yalıtım sağlamak amacıyla kompozit malzeme önerilen bir çalışma yapılmıştır. Önerilen kompozit malzemenin dış katmanlarında karbon fiber takviyeli kompozit, ara katmanlarda ise bakır kaplı polyster, melamin köpük ve grafit parçacıkları ile zenginleştirilmiş reçine bulunmaktadır [12].

Bu çalışmada, otobüs, kamyon, tır veya binek araç gibi farklı motorlu taşıtların iç kabininde, termal ve akustik izolasyon sağlayarak, sürüş konforunu artırmaya yönelik, yenilikçi bir, çok katmanlı kompozit

yapı geliştirilmiştir. Alt ve üst katmanda kaplama telası ve fenolik keçe kombinasyonu kullanılarak, akustik performansı ve mekanik dayanımı yüksek bir yapı oluşturulmuştur. Ara katmanlarda ise özellikle termal izolasyon özellikleri ile ön plana çıkan alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş, silikon kaplı cam elyaf kumaş ve vermikülit kaplı silika kumaş gibi farklı malzemeler ayrı ayrı ve ikili kombinasyonlar şeklinde kullanılmıştır. Her bir katmanda spesifik performans özellikleriyle ön plana çıkan bir materyal kullanılarak oluşturulan çok katmanlı kompozit yapının termal iletkenlik, ses yalıtımı ve dayanıklılık açısından fark yaratan bir kompozisyon olması hedeflenmiştir.

Bu çalışma, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak hem termal hem de akustik izolasyonu bir arada sağlamayı hedefleyen, her bir katmanda spesifik performans özellikleri sunan, yenilikçi bir kombinasyon önermektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde oluşturulan çok katmanlı yapı için, malzemelerin seçimi, üretimi ve test teknikleri anlatılmıştır.

2.1. Malzeme Kompozisyonunun Seçimi

Bu çalışmada, çeşitli motorlu taşıtların iç kabininde sürüş konforunu artırmak amacıyla, çok katmanlı kompozit plaka elde edilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tablo 1’de yer alan malzeme kombinasyonları kullanılarak, termal ve akustik izolasyon performansının artırılması hedeflenmiştir. Malzeme kombinasyonları, benzer izolatörlerin şartnameleri, akustik ve termal izolasyon ihtiyaçları dikkate alınarak belirlenmiştir. Belirlenen malzemeler düz bir kalıpta preslenerek çok katmanlı kompozit plakalar elde edilmiştir. Üretilen numunelerin termal ve akustik performansları, ısı iletkenlik ve empedans tüpü testleriyle değerlendirilmiş ve hedefe yönelik en iyi performansı gösteren malzeme kompozisyonu seçilmiştir.

Tablo 1. Malzeme kompozisyonları (K)

İçerik						
K1	%5,68 Tela	%34,93 Fenolik Keçe	%18,78 Alüminyum Folyo Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%34,93 Fenolik Keçe	%5,68 Tela	
K2	%5,16 Tela	%31,75 Fenolik Keçe	%18,78 Silikon Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%31,75 Fenolik Keçe	%5,16 Tela	
K3	%5,68 Tela	%34,93 Fenolik Keçe	%18,78 Vermikülit Kaplı Silika Kumaş	%34,93 Fenolik Keçe	%5,68 Tela	
K4	%4,41 Tela	%27,12 Fenolik Keçe	%22,37 Vermikülit Kaplı Silika Kumaş	%14,58 Alüminyum Folyo Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%27,12 Fenolik Keçe	%4,41 Tela
K5	%4,41 Tela	%27,12 Fenolik Keçe	%22,37 Vermikülit Kaplı Silika Kumaş	%14,58 Silikon Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%27,12 Fenolik Keçe	%4,41 Tela
K6	%4,78 Tela	%29,41 Fenolik Keçe	%15,81 Silikon Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%15,81 Alüminyum Folyo Kaplı Cam Elyaf Kumaş	%29,41 Fenolik Keçe	%4,78 Tela

Kompozit yapının en dış katmanında, kaplama malzemesi olarak, dokusuz yüzeye sahip bir tekstil malzemesi olan liflerin, ısı ve basınçla bağlanması sonucu elde edilen tela malzeme kullanılmıştır [13]. İzolasyonun konumlanacağı bölgede, parçanın su ve yağ ile temas etme olasılığı yüksek olduğundan, su ve yağ itici özellikli, deformasyona karşı dayanıklı ve termal stabiliteye sahip bir tela tercih edilmiştir. Bununla birlikte malzemenin hafif olması toplam ağırlığı arttırmamaktadır. Kullanılan kaplama telası, piyasada PANOX® ticari ismi ile bilinen, %50 karbon içerikli ve 130 kg/m³'tür yoğunluğa sahiptir.

Bununla birlikte özellikle akustik performans ve mekanik dayanımının yüksek, aynı zamanda diğer keçe'lere oranla maliyet avantajı sağlaması sebebiyle ana bileşen olarak fenolik keçe kullanımı kararlaştırılmıştır. Fenolik keçe, reçine ve elyaf hammaddesinin harmanlanması ile elde edilen bir tekstil malzemesidir. İçeriğinde bulunan fenolik reçine, formaldehit ve fenol türevleri arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonucu oluşan ürünleri kapsayan termoset bir polimerdir [14]. Kullanılan fenolik keçe, %60 oranında polyester & pamuk karışımından oluşan elyaf ve %40 oranında fenol formaldehit reçine içermektedir. 800 kg/m³ yoğunluğa sahiptir. Ara katmanda ise ısı iletkenlik katsayısını düşürmek amacıyla, sıcaklık dayanımı ile ön plana çıkan kaplamalı kumaşlar kullanılmıştır. Bu kapsamda Onse Kompozit firmasından tedarik edilen ve Şekil 1'de gösterilen, alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş, silikon kaplı cam elyaf kumaş ve vermikülit kaplı silika kumaş tek başına ve kombinasyonlar şeklinde çok katmanlı yapıya eklenmiştir.

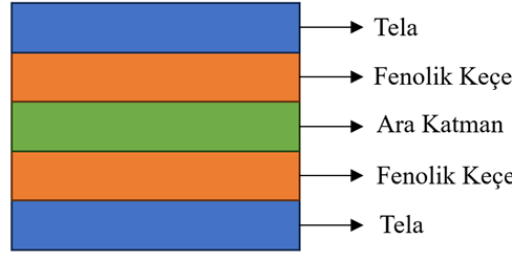


Şekil 1. Sırayla alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş, silikon kaplı cam elyaf kumaş, vermikülit kaplı silika kumaş

Cam elyaf, özel olarak tasarlanmış ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu özel bir ocaktan eritilmiş camın itilip katılaştırılması ile üretilmektedir. Bu ince lifler soğutulduktan sonra makaralara sarılarak ip haline getirilir [15]. E (elektrik) camı ise düşük maliyetli, yalıtkan, mukavemeti yüksek ve suya karşı dayanıklı bir cam tipidir. Genellikle nemli ortamlar için kullanılmaktadır [16]. Bu çalışmada kullanılan malzemelerden ikisi, 430 gr/m² yoğunluğunda E sınıfı cam elyafı ile üretilen ve farklı kaplamalar ile güçlendirilen kompozit malzemelerdir. Alüminyum folyo kaplanmış cam elyaf kumaş, bulundurduğu alüminyum folyo kaplama sayesinde yüksek ısı radyasyonunu yansıtarak, ısı dayanımını artırmaktadır. 180 °C'ye kadar ısıya dayanıklıdır. Cam elyafın dayanıklı ve esnek yapısı, alüminyum folyonun ısı ve ışık yansıtıcı özellikleriyle birleştirilerek termal izolasyon sağlamaktadır. Silikon kaplı cam elyaf kumaş ise, bulundurduğu silikon kaplama sayesinde sıvı, yağ vb. maddelerin kumaş altına geçişini engeller. Mekanik, termal ve elektrik gibi dış etkilere karşı yüksek direnç sağlar. Işık geçirmezliği, UV direnci ve oksidasyon direnci bulunmaktadır. 230 °C'ye kadar ısıya dayanıklıdır. Silika, silikon dioksit monomerlerinin polimerizasyonu sonucu oluşan ve doğada yaygın olarak bulunan bir bileşiktir [17]. Silika amorf ve kristal olarak iki ana türde doğada bulunmaktadır. Aynı zamanda bu türler sentetik olarak da elde edilebilmektedir [18]. Silika kumaş, amorf silika liflerinden oluşan ve olağanüstü ısı direncine sahip bir materyaldir. Termal şoka ve doğrudan alev etkisine karşı dirençlidir. Isıl iletkenlik katsayısı düşüktür ve 1000 °C'ye kadar dayanıklıdır. Vermikülit, silikat grubuna ait doğal, inorganik, toksik olmayan bir mineraldir. Hafifliği sayesinde, yaygın olarak yalıtım, kaplama gibi alanlarda kullanılmaktadır [19]. Ara katmanda kullanılan üçüncü malzeme 660 gr/m² yoğunluğa sahip, vermikülit kaplı silika kumaştır. Bu kompozit malzeme minimum %94 oranında silisyum dioksit içermektedir. Bulundurduğu vermikülit kaplama kumaşın ısı direncini artırır, kimyasal dayanıklılık sağlar ve aşınmaya karşı koruma sunmaktadır. Vermikülit kaplaması ayrıca kumaşa ekstra termal yalıtım özellikleri kazandırarak yüksek sıcaklık ortamlarında kullanımını daha uygun hale getirir. 1100 °C'ye kadar dayanıklıdır. Kullanılan tüm kumaş çeşitleri çift tarafı kaplamalı olacak şekilde ve saten dokuma tipinde tercih edilmiştir.

2.2. Prototip Ürünlerin Hazırlanması

Tüm prototip ürünlerde Şekil 2’de gösterildiği üzere, üst ve alt katmanda tela ve fenolik keçe kullanılmıştır.



Şekil 2. Çok katmanlı yapı gösterimi

Şekil 1’de gösterilen bu yapı, akustik performans ve termal yalıtım özellikleri açısından, ağır hizmet araçlarının bulunduğu zorlu koşullarda çalışan sistemlerin gereksinimlerini karşılamak için ideal kombinasyondur. Tablo 1’de verilen malzemeler 1 x 1,2 m ebatlarında hazırlanarak, üst üste olacak şekilde çok katmanlı yapı oluşturulmuştur. Prototip numune üretimleri, 250 tonluk hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her katmanın homojen bir şekilde yerleştirilmesi için düz yüzeye sahip metal bir kalıp tercih edilmiştir. Hidrolik pres, sıkıştırma kuvveti oluşturmak hidrolik silindir kullanan bir makinedir [20].

Üretim esnasında kullanılan parametreler, nihai ürünün mekanik, termal ve yapısal özelliklerini doğrudan etkileyeceğinden kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada 185 °C sıcaklık, 170 bar basınç ve 120 saniye kullanılmıştır. Makine parametreleri, yapıda bulunan temel hammadde olan fenolik keçe göre belirlenmiştir. Fenolik reçinelerin termoset özellikleri, ısı ve basınç uygulamasıyla ortaya çıkmaktadır. Fenolik keçe içerisinde bulunan fenol formaldehit reçinenin kürleşmesi ve moleküller arası bağların güçlenmesi için minimum 170 °C sıcaklık kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte, 185 °C sıcaklık ve 120 saniye presleme süresi, reaksiyonu hızlandırarak kürleşme sürecinin daha verimli olmasını sağlamaktadır. Düşük sıcaklıklar, reaksiyonun yavaşlamasına ve zayıf bağ yapılarının oluşmasına yol açabilir, bu da nihai ürünün dayanıklılığını olumsuz yönde etkiler. Daha yüksek sıcaklıklar ise, fenolik reçinenin yanmasına sebep olarak, ürünün mekanik ve termal özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Basınç, kompozit malzemenin homojenliğini ve katmanlar arasındaki yapısal bütünlüğü sağlamada önemli bir faktördür. 170 bar basınç, yapıda bulunan katmanların, homojen birleşmesini ve aralarında kuvvetli bir bağ oluşmasını sağlamaktadır. Yeterli basınç uygulanmadığı takdirde, katmanlar arasında istenen yapısal bütünlük sağlanamadığından, malzemenin performansını ve dayanıklılığı azalmaktadır. Daha yüksek basınç değerleri ise, malzemede deformasyona neden olarak, malzemenin fonksiyonel özelliklerini kaybetmesine yol açar. Bu çalışma kapsamında, benzer malzemelerin üretim süreçlerine dair yürütülen çalışmalar temel alınarak, oluşturulan kompozit yapının yüksek performanslı ve dayanıklı olmasını sağlamak üzere, en uygun makine parametreleri kullanılmıştır.

Kompozit malzemelerin üretiminde, numune kalınlığının sabit tutulması, performans özelliklerinin karşılaştırılabilmesi ve deneysel sonuçların güvenilirliği açısından kritik bir gerekliliktir. Otomotiv endüstrisinde, termal ve akustik izolasyon amacıyla üretilen çok katmanlı paneller genellikle 20-25 mm aralığında üretilmektedir. Bu aralık, hafiflik ve performans gerekliliklerini sağlamak açısından optimal bir seçimdir. Tüm numunelerin 20 mm kalınlıkta olmasını sağlamak üzere, presleme esnasında farklı kalınlıklarda stoper mekanizmaları kullanılmıştır. Stoper, kalıpta sıkıştırmayı sınırlandıran fiziksel bariyerlerdir. Bu mekanizmalar, numunenin istenilen kalınlıkta üretilmesine imkân tanıyarak, her bir katman arasındaki bağ yapısının homojen olmasını sağlamaktadır.

2.3. Ses Yutum Katsayısı Ölçümleri

Otomotiv sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin akustik özelliklerini belirlemek için birçok standart ve standart dışı (işe özel) test yöntemleri bulunmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan akustik test yöntemleri empedans tüpü, yarı yansız oda, çınlanım odası ve alfa kabin testleridir.

Çeşitli motorlu taşıtların iç kabininde sürüş konforunu artırmak amacıyla belirlenen 6 farklı malzeme kompozisyonu ile, kalıp sıcaklığı ve basıncı sabit tutularak elde edilen 6 adet prototip numunenin akustik performans testleri TS EN ISO 354 [21] standardına uygun olarak Formfleks Ar-Ge laboratuvarında yer alan alfa kabin test cihazı (Şekil 3) ile 400~10000 Hz ölçüm aralığında gerçekleştirilmiştir. Düz plaka formundaki bu prototip numunelerden, 1 x 1,2 m ebatlarında, 20 mm kalınlıkta hazırlanan test numuneleri, Şekil 3'te gösterildiği gibi alfa kabinin merkezine yerleştirilmiştir. Ölçüm sırasında tahrik alfa kabinin köşelerine yerleştirilmiş hoparlörler tarafından verilmekte olup, ses basıncı test numunesinin hemen üzerinde konumlu bulunan mikrofonlar aracılığı ile ölçülmektedir.



Şekil 3. Alfa kabin test cihazı

Alfa kabinler, sonuçların sağlıklı olması açısından çalışma aralığı olarak 400 Hz ile 10000 Hz frekans aralığında otomotiv endüstrisinin ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde üretilmekte olup, akustik hesaplamalar ses kaynağından oluşturulan sesin sönümlenmesi için geçen süre baz alınarak yapılmaktadır. Serbest alan mikrofonlarıyla ölçüm yapılan alfa kabin testlerinde ses yutum katsayısı (α), aşağıda formülü verilen Sabine formülü kullanılarak yapılmaktadır [22].

$$\alpha = \frac{0.163 \times V}{S} \left(\frac{1}{TR} - \frac{1}{TR0} \right) \times C \quad (1)$$

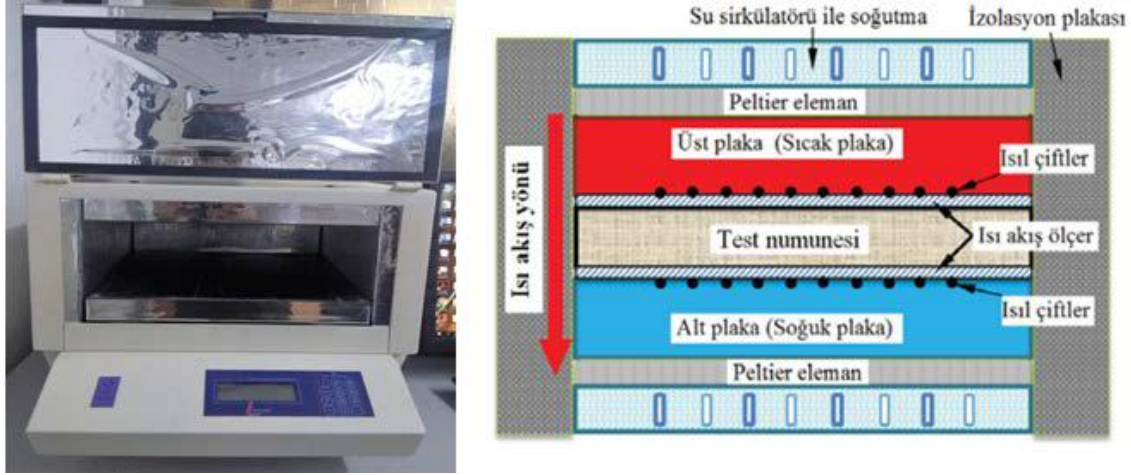
Burada V. Kabin hacmi, S: Numune Alanı, TR: Numune kabin içerisindeyken oluşan çınlanım süreleri, TR0: Kabin boş iken elde edilen referans çınlanım süreleri ve C: Kabin düzeltme katsayısıdır.

C katsayısı, kabin içindeki ses dalgalarının yayılımı ve sönümlenmesine ilişkin deneysel veya teorik olarak belirlenen bir faktördür. İdeal bir yankılanma odasında C genellikle 1 olarak kabul edilmektedir. Akustik performans testleri gerçekleştirilirken laboratuvar ortamı, 23 °C sıcaklık ve %45 bağıl neme sahip olacak şekilde şartlandırılmakta ve ortam, test esnasında dış ortamdan gelen gürültü minimum seviyede olacak şekilde izole edilmektedir.

2.4. Isıl İletkenlik Katsayısı Ölçümleri

Çalışma kapsamında elde edilen prototip numunelerinin ısı iletkenlik testleri, TA Instruments markalı, Lasercomp Fox 314 modeli cihazda gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri 30 x 30 x 2 cm ebatlarında hazırlanmış olup, TS ISO 8301 [23] standardına uygun olarak ısı iletkenlik testleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4'te ısı iletkenlik ölçüm cihazı ve cihazın çalışma prensibi verilmektedir. Buna göre, ölçüm yapılırken, numune farklı peltier etki ile sabit bir sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Bu esnada alt ve üst plakalarında bulunan ısı akış ölçer ile ısı akışı ve ısı çiftleri ile numune sıcaklıkları ölçülmektedir [24]. Test sırasında, alt plaka sıcaklığı 10 °C, üst plaka sıcaklığı 30 °C olarak ayarlanarak 10 farklı noktadan yapılan ölçümlerin ortalama değeri alınmakta ve ısı iletkenlik katsayısı λ (W/m.K) belirlenmektedir. Isıl iletkenlik katsayısının belirlenmesinde ise Fourier ısı iletim denklemi kullanılmaktadır [25].



Şekil 4. Isıl iletkenlik ölçüm cihazı ve cihazın çalışma prensibi [24]

$$Q = kA \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (2)$$

Bu denklemde, Q malzemeden geçen ısı enerjisini (ısı akışı), k (W/mK) ısı iletkenlik katsayısı, A (m²) alan, (T₂-T₁) sıcaklık farkı (K), L (m) numune kalınlığını, Q ise malzemeden geçen ısı enerjisini ifade etmektedir.

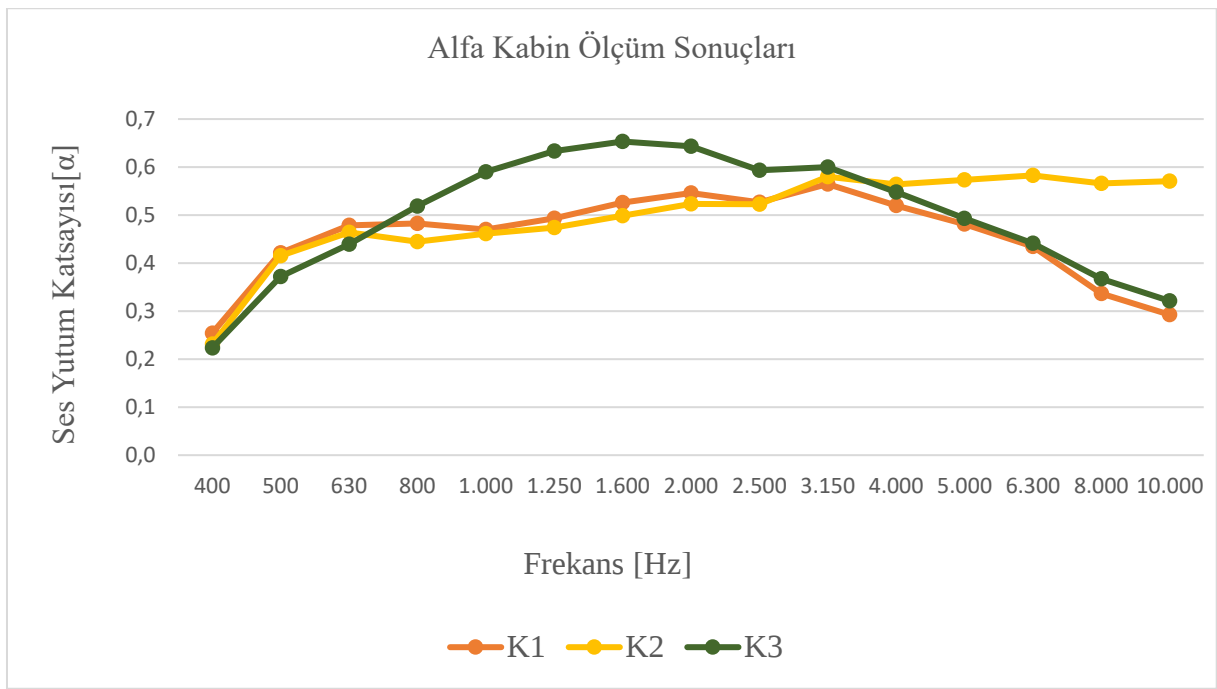
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, akustik ve termal performans test sonuçları incelenmiştir.

3.1. Ses Yutum Katsayısı Test Sonuçları

Akustik konfor, günümüzde hem endüstriyel hem de günlük yaşamda ön plana çıkan bir gereklilik haline gelmiştir. Gürültünün kontrol altına alınmasında kullanılan ses yalıtım malzemeleri, yalnızca tasarım olarak değil, aynı zamanda malzeme bileşimleri açısından da büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, belirli oranlarda tela, fenolik keçe ve özel kaplamalı kumaşlar ile hazırlanan akustik panel kombinasyonlarının ses yutum performansları analiz edilmiştir. Sonuçlar, her bir malzeme türünün ve oranının akustik özelliklere olan etkisini ortaya koymuştur.

Şekil 5'te tek ara katmana sahip numunelere ait ses yutum katsayısı-frekans grafiği, verilmiştir. X ekseninde verilen frekans değerleri, sesin titreşim hızını ifade etmektedir. Bu ekseninde, sesin düşük frekanslardan (400 Hz) yüksek frekanslara (10.000 Hz) kadar nasıl davrandığı analiz edilmektedir. Y ekseninde verilen ses yutum katsayısı, bir malzemenin ses enerjisini ne kadar iyi emdiğini göstermektedir. Ses yutum katsayısı, 0 ile 1 arasında değişmekte olup, 0, sesin tamamen yansıtıldığını, 1 ise tamamen yutulduğunu ifade etmektedir [22]. Buna ek olarak bir ses enerjisinin %55'inin yutulması durumunda ses yutma katsayısının, bahsedilen frekanslar için 0,55, sesin %100'ünün yutulması durumunda α değerinin 1, sesin %100 yansıtılması durumunda ise α değerinin 0 olduğu ifade edilmektedir [26].

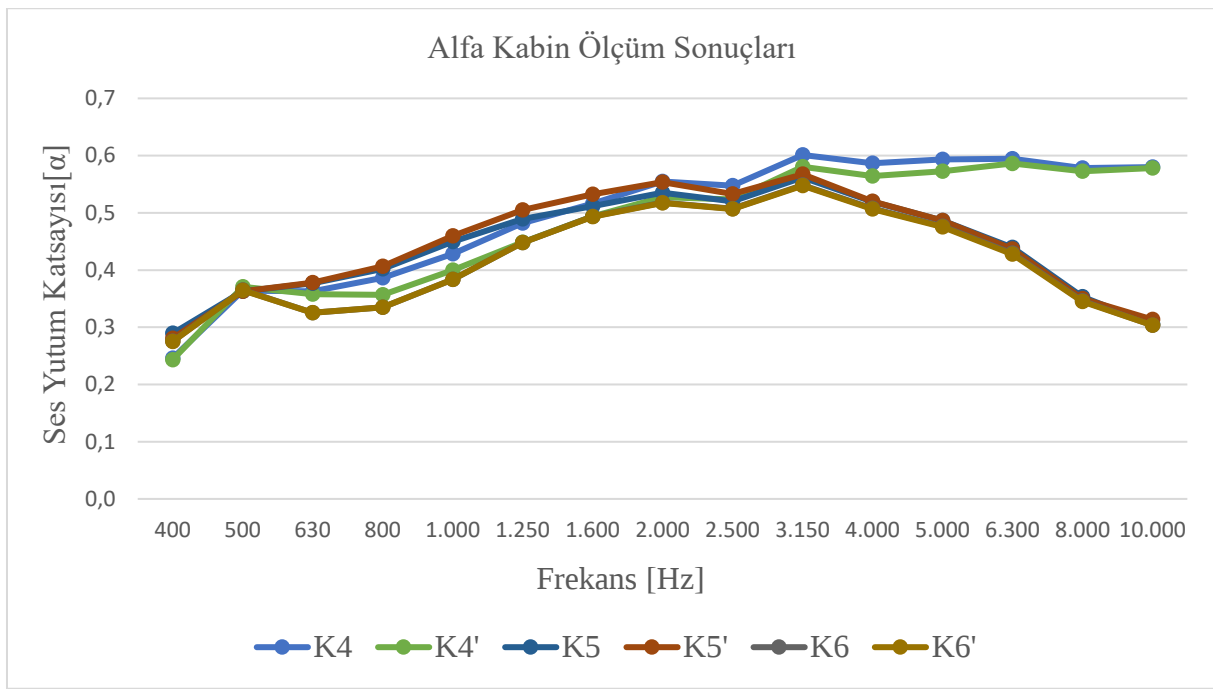


Şekil 5. Tek ara katmana sahip numunelerin ses yutum katsayısı-frekans grafiği

Tüm kombinasyonlar 400-800 Hz aralığında benzer performans sergilemiştir. Bu frekans aralığındaki ses dalgalarının dalga boyları oldukça uzundur. Bu dalgalar, genellikle malzemenin yüzeyinden geçip daha derin katmanlara ulaşır. Tüm kombinasyonların ses dalgalarının geçişini sağlayacak şekilde çok katmanlı bir yapıya sahip olmaları, sesin malzeme türünden bağımsız olarak benzer şekilde emilmesine yol açar. Kombinasyonlar arasında farklılık yaratan kaplamalı kumaşlar, düşük frekanslarda belirgin bir etki yaratmaz. Çünkü düşük frekansta ses dalgaları bu malzemeleri kolayca geçerek alt katmanlara ulaşabilir.

800-3500 Hz frekans aralığında, tüm kombinasyonlarda performans artışı gözlenmekte olup, özellikle vermikülit kaplı silika kumaş katkılı K3 numunesi, diğer numunelere göre yaklaşık %17 daha iyi bir performans göstermiştir. Alüminyum folyo ve silikon kaplamalı cam elyaf kumaşlardan oluşan K1 ve K2 numuneleri benzer ses yutum performansı göstermiştir. Üç numune arasındaki temel farklılık, kaplamalardan bağımsız olarak K3'ün silika kumaş, K1 ve K2'nin ise cam elyaf kumaş içermesidir. Cam elyaf kumaş, çok ince cam ipliklerinden yapılmakta olup, sert ve hafif bir yapıya sahiptir. Camın doğal yapısı ise ses dalgalarını yansıtmaya eğilimi göstermektedir. Yansıma, sesin malzeme tarafından geri gönderilmesi anlamına gelir, bu da sesin verimli bir şekilde emilmediğini göstermektedir. Bununla birlikte cam elyaf kumaşın gözenekliliği düşük bir malzeme olması sebebiyle, ses yutumu daha düşüktür. Silika kumaş ise, yüksek gözenekliliğe sahip, elastik ve daha pürüzlü bir yapıdadır. Pürüzlü yüzeylerde, ses dalgaları malzeme ile etkileşime girmektedir. Bu da ses dalgalarının daha iyi absorbe edilmesini sağlamaktadır. Örneğin, motor bölgesinde meydana gelen gürültülerin absorpsiyonunu sağlamak üzere, 1000-4000 Hz aralığında yüksek ses yutum performansı beklenmektedir. Bu durumda motor bölgesinde kullanılacak bir izolasyon parçası için K3 kompozisyonu iyi bir tercih olabilir. 3500-10000 Hz aralığında ise, silikon kaplı cam elyaf kumaş katkılı K2 numunesinin, diğerlerine oranla %28 daha iyi bir akustik performans gösterdiği görülmektedir.

Şekil 6'da çift ara katmana sahip numunelerin ses yutum katsayısı-frekans grafiği verilmiştir. Bu kısımda K' şeklinde verilen ölçüm sonuçları, numune plakanın ters çevrilerek ölçülmesi sonucu elde edilmiştir. Plakanın ters çevrilmesi, katman sıralamasını ve bağlantılı olarak ses dalgalarının ilk temas ettiği yüzeyi değiştirmektedir. Ses dalgalarının kompozisyonun farklı katmanlarına çarpması ile yansıma ve emilim gerçekleşir. Kompozisyonun ters çevrilmesi durumunda ilk karşılaşılan yüzey, ses dalgasının geçiş direncini etkileyerek ses yutum performansını değiştirebilir.



Şekil 6. Çift ara katmana sahip numunelerin ses yutum katsayısı-frekans grafiği

2000 Hz'e kadar olan düşük ve orta frekanslarda, vermikülit kaplı silika kumaş ve silikon kaplı cam elyaf kumaşın kombine kullanıldığı K5' numunesi en iyi akustik performansı göstermektedir. Silikon kaplama, ses dalgalarını geri yansıtarak silika kumaşın daha fazla enerji absorbe etmesine olanak tanır. Ses dalgaları iki katman arasında çoklu yansıma ve kırılma hareketi gerçekleştirerek enerjilerini kaybeder. Bu kombinasyon, düşük ve orta frekanslarda yüksek verimli bir akustik izolasyon çözümü sunmaktadır.

2000 Hz ve üzeri yüksek frekanslarda, vermikülit kaplı silika kumaş ve alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaşın kombine kullanıldığı K4 ve K4' numunesi en iyi akustik performansı sergilemiştir. Vermikülit kaplı silika kumaşın yüksek gözenekli yapısı ile alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaşın yoğun ve yansıtıcı özellikleri, birlikte kullanıldığında sinerjik etki oluşturarak yüksek frekansta ses yutum katsayısını artırır. Alüminyum folyo, ses dalgalarını yansıtarak silika kumaş içinde çoklu geçiş sağlar ve enerji kayıplarını maksimize eder. Bu sayede, yüksek frekanslı ses dalgalarının etkili bir şekilde absorbe edilmesi sağlanmaktadır.

3.2. Termal İletkenlik Katsayısı Test Sonuçları

Çalışma kapsamında üretilen, prototip numunelere uygulanan termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları Tablo 2'de verilmektedir. Kompozisyonların tamamında alt ve üst katman olarak kullanılan ve iyi bir yalıtkan malzeme olan fenolik keçenin termal iletkenlik katsayısı 0,040 W/m.K şeklindedir. Termal iletkenlik katsayısını düşürmek üzere ara katmanda kullanılan kaplamalı kumaşların etkisi incelenmiştir.

Sonuçlara göre K1 numunesi en düşük ısı iletkenlik değerine sahiptir. Alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaşın varlığının yansıtıcı yüzeye sahip olması ile ek termal direnç sağladığı düşünülmektedir. Cam liflerinin sahip olduğu gözenekli ve hafif yapı, K1 numunesinin, ısıyı etkin bir şekilde emerek dağıtmasına ve buna bağlı olarak ısı iletkenliği minimize etmesine katkı sağladığı düşünülmektedir.

K2 numunesi ısı iletkenlik performansı bakımında K1 numunesine benzer özellik göstermektedir. Silikon kaplama alüminyum folyo kaplamaya oranla daha düşük performans göstermesi beklenmektedir ancak elde edilen termal iletkenlik katsayısı sonuçlarına göre yapısında bulunan cam elyaf sayesinde benzer performans sağladığı görülmüştür.

K3 numunesinin ara katmanında bulunan vermikülit kaplı silika kumaşın termal iletkenlik katsayısının, vermikülitin yüksek sıcaklıklara dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanımının bilinmesinden

dolayı, K1 ve K2 numunelerine oranla daha düşük çıkması beklenmektedir. Ancak elde edilen sonuçlar bu beklentiye doğrulamamaktadır. Bunun nedeninin, vermikülitin ısıya dayanıklı bir malzeme olmasına rağmen, ısı enerjisini yansıtmak yerine bir miktar absorbe etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla termal iletkenlik katsayısı K1 ve K2'ye oranla yüksektir.

Tablo 2. Termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları

Ölçüm Sayısı	K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	0,03542	0,03494	0,03543	0,03605	0,03624	0,03553
2	0,03562	0,03497	0,03536	0,03580	0,03633	0,03549
3	0,03497	0,03492	0,03536	0,03590	0,03597	0,03540
4	0,03481	0,03490	0,03533	0,03573	0,03608	0,03533
5	0,03464	0,03486	0,03528	0,03580	0,03628	0,03569
6	0,03469	0,03486	0,03530	0,03569	0,03651	0,03542
7	0,03487	0,03486	0,03529	0,03589	0,03608	0,03533
8	0,03463	0,03483	0,03525	0,03604	0,03602	0,03533
9	0,03455	0,03485	0,03525	0,03584	0,03603	0,03531
10	0,03395	0,03482	0,03525	0,03576	0,03602	0,03532
Ortalama Değer	0,03482	0,03488	0,03531	0,03585	0,03616	0,03542

Kaplamalı kumaşların ikili kombinasyon şeklinde kullanıldığı K4, K5 ve K6 numunelerinin termal iletkenlik katsayısının K1, K2 ve K3'e oranla daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Çift katmanlı yapılar, katmanlar arası ara yüzeyde ısı geçişi sırasında ek direnç yaratmaktadır. Buna karşılık, bu direnç düzgün dağıtılmadığında veya uyumsuz malzemeler birlikte kullanıldığında, toplam sistemin termal iletkenliği yüksekselebilmektedir.

Farklı termal iletkenlik katsayılarına sahip malzemeler birlikte kullanıldığında, toplam sistemin yalıtım performansı en düşük yalıtım sağlayan malzeme tarafından belirlenir. Buna uyumlu olarak, ikili kombinasyonlarda silikon kaplı cam elyaf kumaş ve alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaştan oluşan K6 numunesinin en iyi termal performansı sağlaması bunu doğrular niteliktedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, otobüs, kamyon, tır veya binek araç gibi farklı motorlu taşıtların iç kabininde, termal ve akustik izolasyon sağlayarak, sürüş konforunu artırmaya yönelik olarak alt ve üst katmanda kaplama telası ve fenolik keçe kombinasyonu, ara katmanlarda ise özellikle termal izolasyon özellikleri ile ön plana çıkan alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş, silikon kaplı cam elyaf kumaş ve vermikülit kaplı silika kumaş gibi kaplamalı kumaşların tekli ve ikili kombinasyonları kullanılarak akustik ve termal performansı yüksek bir yapı oluşturulmuştur. Söz konusu katmanlar ile düz bir kalıpta, 185 °C sıcaklık, 170 bar basınç ve 120 saniye süre ile yenilikçi sandviç kompozit plakalar elde edilmiştir. Elde edilen kompozit plakaların alfa kabin test cihazında ses yutum katsayıları, termal iletkenlik ölçüm cihazında ise termal iletkenlik katsayıları ölçülerek birbiri ile karşılaştırılmıştır. Akustik performans test sonuçları incelendiğinde, motor bölgesinde meydana gelen gürültülerin absorpsiyonunu sağlamak üzere, 1000-4000 Hz aralığında kararlı bir ses yutum performansı gösteren sandviç kompozit yapının, iki kaplama telası arası, fenolik keçe, vermikülit kaplı silika kumaş ve fenolik keçe içeren K3 kompozisyonu olduğu tespit edilmiştir. Ara katmanda kaplamalı kumaşların ikili kombinasyonlarının kullanıldığı sandviç plakalarda ise ısı ve ses üreten yapıya bakacak yönde iki kaplama telası arası fenolik keçe vermikülit kaplı silika kumaş, alüminyum folyo kaplı cam elyaf kumaş ve fenolik keçe içeren K4 kompozisyonu olduğu tespit edilmiştir. Termal iletkenlik katsayısı sonuçları değerlendirildiğinde ise elde edilen sandviç plakaların termal izolasyon performansı $K1 > K2 > K3 > K6 > K4 > K5$ şeklinde sıralanmaktadır. Elde

edilen veriler göz önüne alındığında hem akustik hem de termal izolasyon performansını bir arada sunabilecek sandviç kompozit yapı K3 numunesi ile sağlanmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, motorlu taşıtların ısı ve ses üreten motor bölgesinde akustik ve termal izolasyon sağlamaya yönelik kompozit yapılarının geliştirilmesinde, özellikle ara katmanda kaplamalı kumaş kullanımı konusunda uzmanlara destek olacak malzeme kompozisyonları ortaya koyulmuştur. Bu çalışmanın, gelecekte farklı malzeme kombinasyonlarını kullanarak NVH (Gürültü, Titreşim ve Sertlik) alanında uzmanlaşmak isteyenler için rehber niteliğinde bir kaynak oluşturabileceği öngörülmektedir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma, Formfleks Otomotiv A.Ş.- Ar-Ge Merkezi bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Yazarlar değerli katkılarından dolayı Ar-Ge Lideri Sn. İbrahim AYDIN'a teşekkür eder.

REFERANSLAR

- [1] Szczurek and M. Maciejewska, Categorisation for Air Quality Assessment in Car Cabin, Transportation Research Part D: Transport and Environment. 48, 161-170, 2016.
- [2] S.P. Mavuri, S. Watkins, X. Wang, S.S. Hill and D. Weymouth, An Investigation of Vehicle HVAC Cabin Noise, SAE Technical Paper. 2008-01-0836, 2008.
- [3] D. V. Rosato, Designing with reinforced composites: Hanser Gardner Publications, 1997.
- [4] M. Ağırhan, Otomotiv Endüstrisinde Kompozit Malzeme Kullanımı, Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges). 13(2), 51-64, 2023.
- [5] K. S. Suslick, Encyclopedia of physical science and technology. Sonoluminescence and sonochemistry, 3rd edn. Elsevier Science Ltd, Massachusetts, 2001.
- [6] Automotive Composites - Global Strategic Business Report, <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/02/27/2835828/28124/en/Global-Automotive-Composites-Strategic-Industry-Report-2024-Market-to-Reach-58-5-Billion-by-2030-Focus-on-Automotive-Lightweighting-Drives-Demand.html> [accessed 27 February 2024].
- [7] F. Khan, N. Hossain, J.J. Mim, S.M.M. Rahman, M.J. Iqbal, M. Billah and M.A. Chowdhury, Advances of Composite Materials in Automobile Applications– A Review. Journal of Engineering Research, 2024.
- [8] A. Ayvaz, Binek bir aracın gövde panellerinin yol gürültüsü performansına olan katkısının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2019.
- [9] S. Mezarcıöz, Değişik Sürüş Şartları Altında Bir Yolcu Otobüsünün Motor Odası Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi, Mühendis ve Makina, 2018.
- [10] İ. Aydın, S. Arslan, M. Çalışkan Akduman, D. Çay ve Ö. İskender, Ağır Hizmet Araçlarının Gürültü Kalkanı Parçasının Akustik ve Mekanik Dayanım Performansının İncelenmesi, Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences. 10(2), 300-311, 2024.
- [11] R. M. Gabor, P. Blaga, and B. M. Caseriu, Quantitative analysis of predictors of acoustic materials for noise reduction as sustainable strategies for materials in the automotive industry, 2024.
- [12] S. Hu, D. Wang, J. Večerník, D. Křemenáková and J. Militký, Electromagnetic Interference (EMI) Shielding and Thermal Management of Sandwich-Structured Carbon Fiber-Reinforced Composite (CFRC) for Electric Vehicle Battery Casings, Polymers. 16(16), 2291, 2024.
- [13] H. M. Buluklu, Farklı organik malzemelerin ses geçiş kaybı kapasitelerindeki etki ve verimliliğin araştırılması, Doktora Tezi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, 2023.
- [14] M.H. Choi, H.Y. Byun and I.J. Chung, The Effect of Chain Length of Flexible Diacid on Morphology and Mechanical Property of Modified Phenolic Resin, Polymer. 43(16), 4437-4444, 2002.

-
- [15] D. Asi, Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aşınma performansının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 2008.
- [16] M. Demirel, Cam elyaf takviyeli poliester kompozitlere yanmazlık özelliği kazandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2007.
- [17] H. Weill, R. Jones, W. Parkes, Silicosis and related diseases. Occupational lung disorders. Butterworth-Heinemann Ltd; London, England, 1994.
- [18] H.G. Anlar, M. Bacanlı ve N. Başaran, Silikanın Kullanım Alanları ve Silika Maruziyetine Bağlı Olası Toksik Etkiler. Hacettepe University Journal of the Faculty of Pharmacy. 39(1), 17-29, 2019.
- [19] F. Ali, L. Reinert, J.M. Lévêque, L. Duclaux, F. Muller, S. Saeed ve S.S Shah, Effect of Sonication Conditions: Solvent, Time, Temperature and Reactor Type on the Preparation of Micron Sized Vermiculite Particles. Ultrasonics Sonochemistry, 21(3), 1002-1009, 2014.
- [20] S. Kumar and B. Prashanth, Design and Fabrication of Hydraulic Press, Int. J. Sci. Develop. Res. 2(7), 227-230, 2017.
- [21] TS EN ISO 354 Akustik-Ses absorpsiyonun çınlama odasında ölçülmesi, 2006.
- [22] M. Gelen, Otomotiv endüstrisinde kullanılan akustik malzemeler ve malzeme özelliklerinin akustik parametrelere etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2016.
- [23] TS ISO 8301 Isı yalıtımı- Kararlı halde ısı direncin ve ilgili özelliklerin tayini- Isı akış tayini için metotlar, 2002.
- [24] M. Kuru ve C. Kaya, Isı Akış Ölçer ve Geçici Düzlem Kaynak Tekniği ile Klasik Yalıtım Malzemelerinin Isıl İletkenlik Katsayılarının Belirlenmesi, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi. 10(1), 1-18, 2018.
- [25] R. Kalkan, Kompozit yapı malzemelerinde ısı özellik ölçümü, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 2008.
- [26] F. A Everest, K. C. Pohlmann, Master Handbook of Acoustics, 2022.

**ERKEN MİYOSEN YAŞLI KÖMÜRLÜ ASPIRAS HAVZASI'NIN (KASTAMONU)
JEOLJİK EVRİMİ**

***GEOLOGICAL EVOLUTION OF THE COAL BEARING EARLY MIOCENE ASPIRAS BASIN
(KASTAMONU)***

Sariye Duygu DURAK^{*1}  Mehmet Serkan AKKİRAZ¹ 

¹ Jeoloji Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye.

ABSTRACT

This study investigates the geological evolution of the early Miocene Aspiras Basin. The basin is primarily represented by the Miocene Hançili Formation. This formation unconformably overlies the Mesozoic ophiolitic mélangé and Yaylacık Formation. The Hançili Formation, which constitutes the primary focus of this study, is composed of conglomerate, sandstone, marl, siltstone, gypsum, limestone, lignite and tuff. Field studies were conducted in the Kayaönü and Özal mining areas to elucidate the lithostratigraphic characteristics and spatial facies variations within the basin. It was determined that lignite seams in the Kayaönü area are sulphure-rich and interbedded with mudstones, while gypsums, mudstones and limestones are remarkable in the Özal mining. The discontinuity of lignite layers in certain locations are attributed to syndimentary tectonism and subsequent structural deformation. The southeastern part of the basin is characterized by extensive gypsum deposition, which is interpreted to have formed under high evaporation conditions. Conversely, the deeper, northwestern part of the basin exhibits a predominance of carbonate-rich deposits, suggesting a more distal, subaqueous setting with reduced siliciclastic input. The geological evolution of the basin is explained through a depositional model that incorporates both coastal and deepening environments, with the closing phase represented by the uppermost levels of limestone, marl and gypsum.

Keywords: Aspiras Basin, Early Miocene, Gypsum, Kastamonu, Lignite.

ÖZET

Bu çalışma, Erken Miyosen yaşlı Aspiras Havzası'nın jeolojik evrimini incelemektedir. Havza esas olarak, Mesozoyik yaşlı ofiyolitik melanj ve Yaylacık Formasyonu üzerine uyumsuz dokanakla gelen Miyosen yaşlı Hançili Formasyonu ile temsil edilmektedir. Bu çalışmanın odağını oluşturan Hançili Formasyonu, çakıltası, kumtaşı, silttaşı, marn, kireçtaşı, jips, linyit ve tüflerden oluşmaktadır. Havza içerisindeki litostratigrafik özellikleri ve alansal fasiyes değişimlerini ortaya koymak amacıyla Kayaönü ve Özal maden sahalarında arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmaları, Kayaönü ve Özal Madencilik sahalarında gerçekleştirilmiştir. Kayaönü bölgesindeki linyit damarlarının sülfürce zengin ve çamurtaşları ile ara katmanlı olduğu, Özal maden sahasında ise jipsler, çamurtaşları ve kireçtaşlarının dikkat çekici olduğu belirlenmiştir. Belirli yerlerdeki linyit tabakalarının süreksizliği, sinsedimanter tektonizmaya ve ardından gelen yapısal deformasyona bağlanmaktadır. Havzanın güneydoğu kısmı, yüksek buharlaşma koşulları altında olduğu yorumlanan yoğun jips birikimi ile karakterize edilir. Buna karşılık, havzanın daha derin, kuzeybatı kesiminde karbonat bakımından zengin çökellerin baskın olduğu görülmektedir; bu da daha uzak, daha az silisiklastik girdiye sahip bir su altı ortamına işaret etmektedir. Havzanın jeolojik evrimi, hem kıyı hem de derinleşen ortamları içeren bir çökeltme modeli ile açıklanmakta ve kapanış aşaması kireçtaşı, marn ve jipsin en üst seviyeleri ile temsil edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Aspiras Havzası, Erken Miyosen, Jips, Kastamonu, Linyit.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: duygu.ucbas@dpu.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi 18.02.2025	Revision Date Revizyon Tarihi 05.03.2025	Accepted Date Kabul Tarihi 10.03.2025	Published Date Yayın Tarihi 01.06.2025
---	--	---	--

1. GİRİŞ

Neojen döneminde etkili olan Alp tektoniği, Anadolu'nun yükselmesine neden olmuş ve bu durum denizel etkinin azalmasıyla birlikte yüksek arazilerin oluşumunu sağlamıştır [1,2]. Bu tektonik yükselme sonucunda karasal alanlar ortaya çıkmış ve Kretase/Paleojen döneminin sera koşulları ile Kuvaterner'in buzul dönemi arasında kalan süreçte Miyosen dönemine ait linyit içeren havzalar oluşmuştur [3,4]. Bu dönemde, Anadolu'nun farklı bölgelerinde linyit oluşumları yaygın olarak gözlenmiştir (Çanakkale-Çan, Aydın-Şahinali, Bolu-Göynük, Bursa-Harmancık, Denizli-Kale-Tavas, Kütahya-Tunçbilek-Seyitömer, Manisa-Gördes-Soma, Burdur-Kavak vb.) [5-18]. Erken Miyosen yaşlı Kastamonu-Aspiras Havzası kuzey Anadolu'daki kömürlü havzalardan biridir [19].

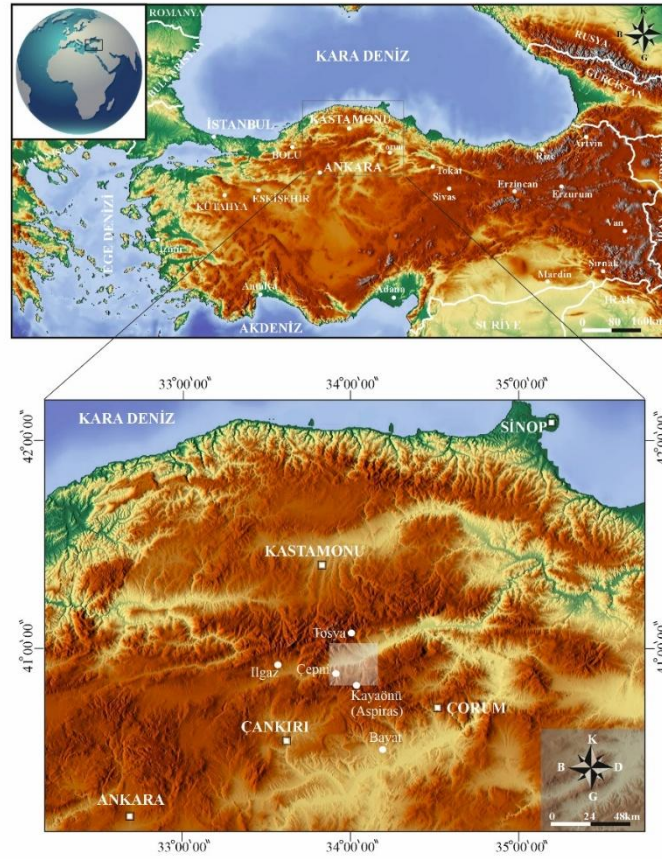
Çalışma alanı, Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Çankırı-G31 paftasında bulunmakta olup, Kastamonu ilinin 80 km güneydoğusunda, Tosya ilçesinin güneybatısında konumlanmaktadır (Şekil 1). Havzanın jeolojisi ilk olarak [20] tarafından incelenmiştir. Araştırmacı, bölgedeki tortulların Eosen yaşlı olduğunu ve tabanda çakıltaşlarıyla başlayıp, üzerine kömür içeren marn ve kalker serisinin geldiğini belirtmektedir. Araştırmacı ayrıca Tosya çevresinde gerçekleştirilen sondaj verilerini kullanarak, yörenin kömür potansiyelini incelemiş ve ekonomik açıdan önemli bir potansiyele sahip olmadığını ifade etmiştir. Linyitlerin yoğun kökürtlü olduğu da yazar tarafından ifade edilmektedir. Bölgede yayılım gösteren kömürlerin petrografisi üzerine doktora tezi çalışması bulunmaktadır [21]. Araştırmacı, Aspiras sahası kömürlerinin Eosen yaşlı ve rankının linyit aşamasında olduğunu ve linyitlerin suboksik denizel bataklıklarda çökeldiğini belirtmiştir. [19], bölgedeki kömürlü tortullardan ölçülü kesitler yardımıyla örnekler derleyerek, bölgedeki tortulların yaşı, mikropaleontolojisi (palinomorf ve ostrakod) ve çökeltme ortamına yönelik veriler sunmaktadır. Araştırmacılar, örneklerde spor türlerinin az olması ve ayrıca biyostratigrafik açıdan önemli olduğu bilinen *Dicopolopollis kockelii*, *Caryapollenites simplex* ve *Intratirporopollenites instructus* polenlerinin varlığına dayanarak havza tortullarının erken Miyosen'de gölsel koşullarda çökeldiğini ifade etmektedirler. Bu çalışmada, havzanın farklı noktalarından alınan ölçülü kesitler ve sondaj verileri yardımıyla, havzanın jeolojik evrimi ortaya konmaktadır.

1.1. Stratigrafi

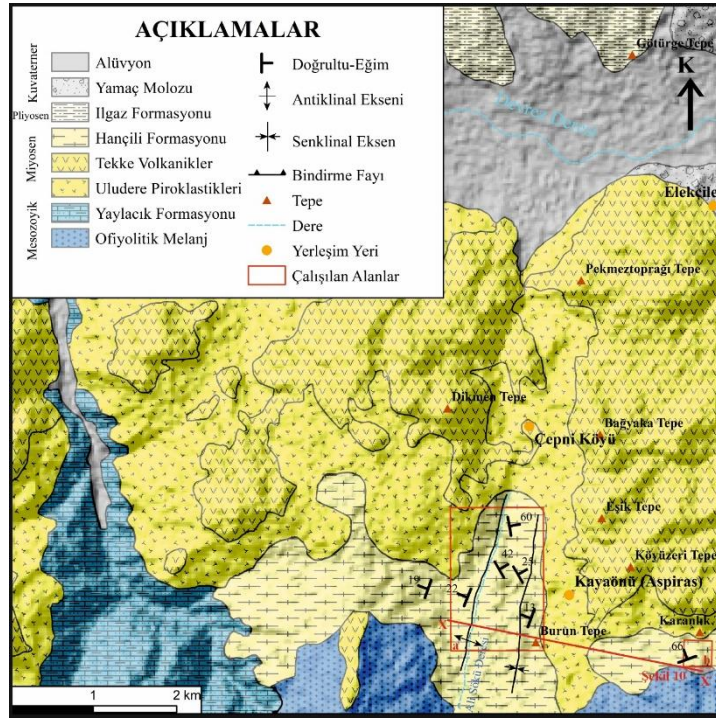
Kastamonu bölgesinin jeolojik evrimi, Paleotetis'in kapanma süreciyle yakından ilişkilidir. Paleotetis, Permo-Karbonifer ile Erken Tersiyer arasında kuzey yönlü bir yitimle Pontidlerin altında progresif olarak tüketilmiştir. Bu süreç, bölgedeki metamorfik kayaçların ve ofiyolitlerin oluşumuna katkıda bulunmuştur [22, 23].

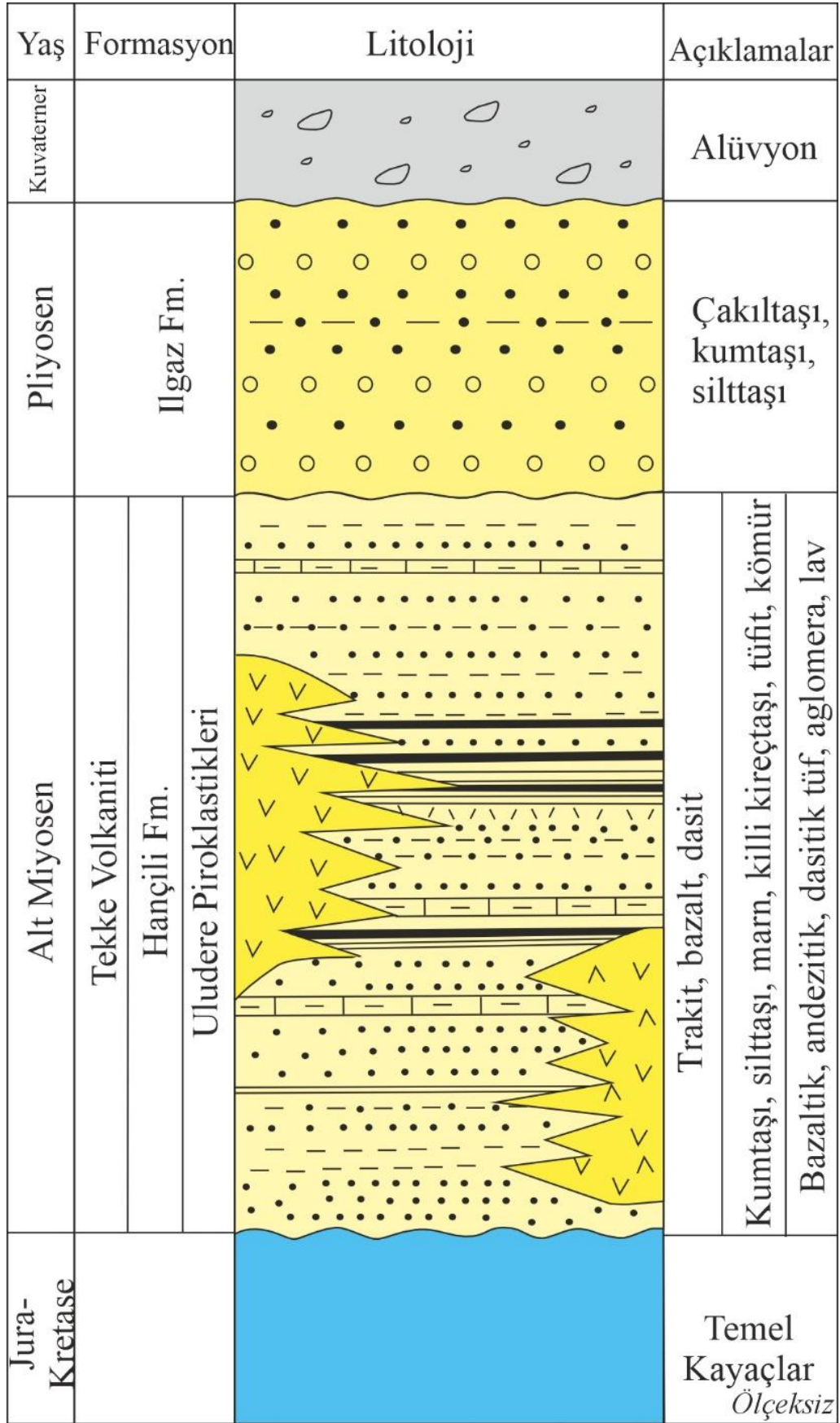
Aspiras Havzası'nın temelinde Mesozoyik yaşlı ofiyolitik melanj ve Yaylacık Formasyonu bulunmaktadır [4]. Bu birimlerin üzerinde, uyumsuz bir dokanakla Miyosen yaşlı Hançili Formasyonu bulunmaktadır. Çalışmanın konusunu oluşturan bu formasyon, Uludere Piroklastikleri ve Tekke Volkaniti ile geçişli gözlenmektedir [4]. Hançili Formasyonu, kırıntılı sedimanları (çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı), karbonatlı tortulları (marn, kireçtaşı), jips, linyit ve tuf içermektedir. Üzerinde uyumsuz dokanakla Ilgaz Formasyonu (Pliosen) gözlenmektedir. Tüm bu birimlerin üzerinde, Kuvaterner alüvyon, yamaç molozu ve alüvyon yelpazesi uyumsuz bir dokanakla örtü şeklinde bulunmaktadır (Şekil 2, 3).

Hançili Formasyonu, Karanlık Tepe ve Dikmen Tepe güneybatısında yaklaşık doğu-batı uzanımlıyken, havzanın ortasında kuzey güney uzanımlıdır (Şekil 2, 3). Kuzey güney uzanımlı olan bölgeden Ali Sökü deresi yine kuzey güney yönünde uzanmaktadır. Çalışma alanının bu bölümünden alınan tabaka konumları, yaklaşık kuzey güney uzanımlı antiklinal ve senklinallerin varlığını ortaya koymaktadır (Şekil 2, 3). Havzada gerçekleştirilen arazi çalışmaları, alandaki özel işletmelerde, Çepni Köyü'nün güneybatısında yer alan Ali Sökü Deresi çevresindeki Kayaönü maden sahasında ve Çepni Köyü'nün güneydoğusunda bulunan Özal maden sahalarında yürütülmüştür (Şekil 2a, b). Havzanın batı bölümündeki doğu batı uzanımlı alandan örtü nedeniyle kesit alınamamıştır.



Şekil 1. Aspiras Havzası'nın coğrafik konumu

Şekil 2. Aspiras ve çevresinin jeoloji haritası [4]
(a) Kayaönü madencilik; (b) Özal madenciligi içeren alanlar



Şekil 3. Aspiras Havzası genelleştirilmiş litostratigrafik kolon kesiti ([4]'ten basitleştirilerek)

2. BULGULAR

2.1. Saha Çalışmaları

Çalışmalar, haritanın güneyinde yoğunlaşan linyit içerikli bölümlerde gerçekleştirilmiştir. Bunlar, Aspiras güneydoğusunda, Çepni Köyü güneyinde ve kuzeyde de Çepni Köyü, Dikmen Tepe ve Bağkaya Tepesi ile çevrelenmiştir. Çalışma alanının kuzeyinde ise doğu-batı doğrultusunda uzanan Devrez Çayı yer almaktadır (Şekil 2).

Bu çalışmanın odağını oluşturan erken Miyosen yaşlı linyitli Hançili Formasyonu, tuf, silttaşı, kumtaşı, çakıltası, marn, kireçtaşı ve jips içermektedir (Şekil 3). Havzada yapılan çalışmalar, özel maden işletmelerinde gerçekleştirilmiştir. Bu işletmeler, Çepni Köyü güneybatısındaki Ali Sökü Deresi çevresinde bulunan Kayaönü Madencilik ve Çepni Köyü güneydoğusunda yer alan Özal Madencilik'tir (Şekil 2a, b). Arazi çalışmaları süresince havzanın belirli noktalarında ölçülü kesitlerden ve sondaj verilerinden yararlanılmıştır. Aşağıda, alınan kesitlerin litolojik özellikleri açıklanmaktadır.

2.1.1. Kayaönü Madencilik

Kayaönü madencilikte gözlenen linyitli tortullar, Ali Sökü deresinin doğu ve batı yamaçlarında yüzlek vermektedir (Şekil 2a).

2.1.1.1. Ali Sökü Sondajı

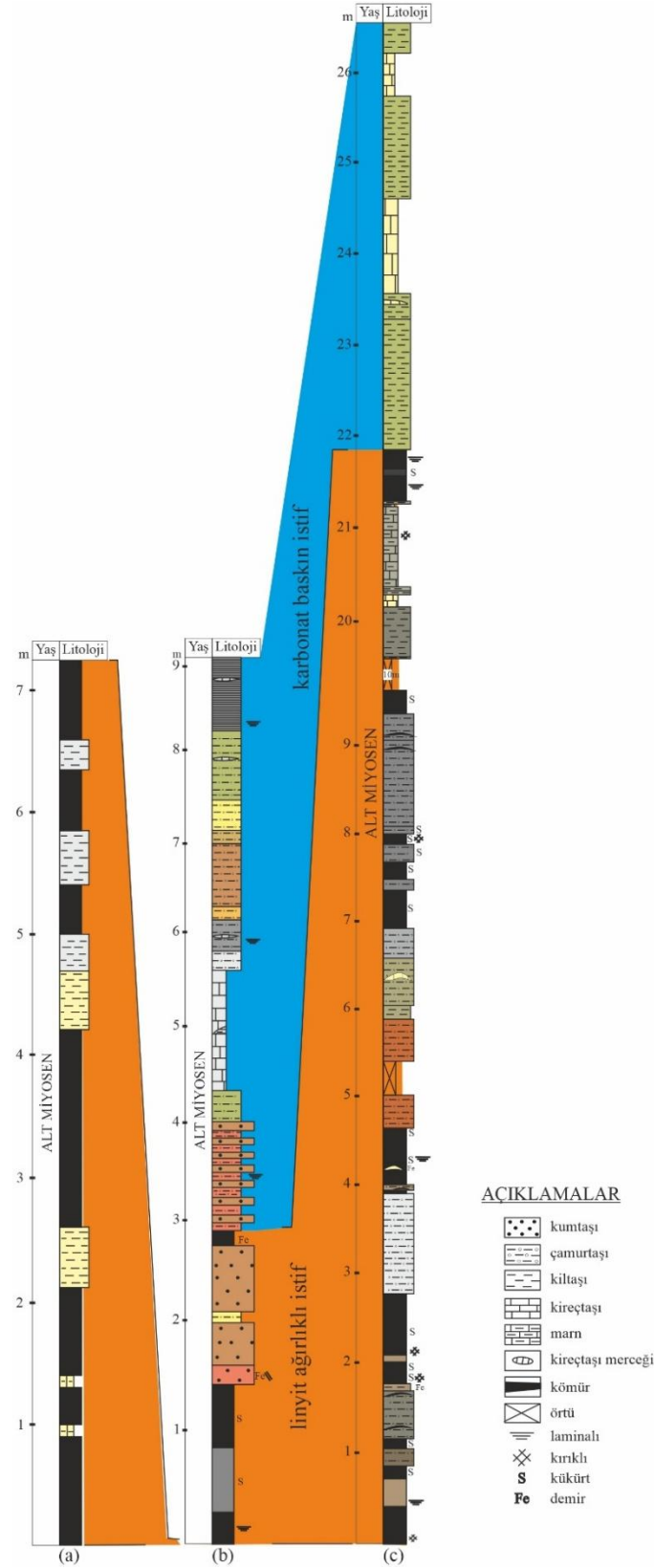
Bu kesit, deresinin batısında yer almaktadır. Ali Sökü sondajı dereye yaklaşık 10 metre mesafede işletme tarafından gerçekleştirilmiştir. Ölçülen karotun kalınlığı yaklaşık 7 m olup, tabanda 2 m kalınlığında gözlenen linyit damarı bulunmaktadır. Linyitli seviyenin içinde sarımsı ince marn tabakaları yer almaktadır (Şekil 4a). Marn tabakaları üzerine kalınlıkları değişkenlik gösteren sarı ve gri renklerde gözlenen kilaşları linyit tabakalarıyla ardalanmalı bulunmaktadır. İstifin tamamında ostrakodlar ve biçimi iyi korunamamış bitki kırıntıları gözlenmektedir. Bu karot, Kayaönü maden sahasından ölçülen tüm istiflerin tabanını oluşturmaktadır (Şekil 4a).

2.1.1.2. Ali Sökü Kesiti

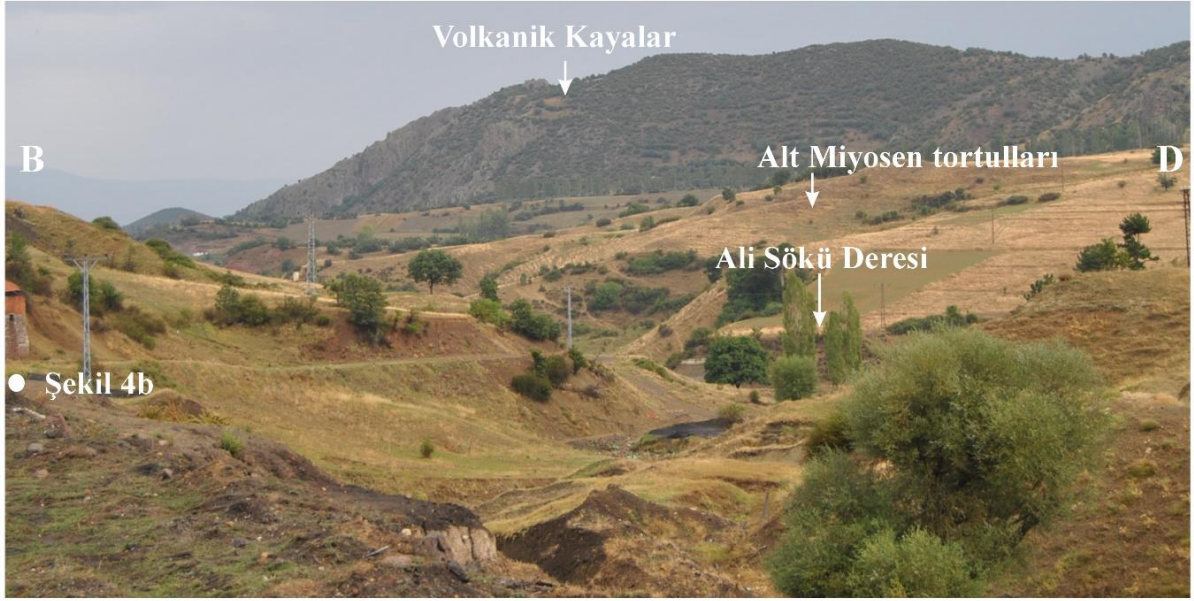
Toplam kalınlığı yaklaşık 9 m civarında olan Ali Sökü kesiti, Ali Sökü deresi batısından ölçülmüştür (Şekil 5). Ölçülen bu istif, Ali Sökü sondajı karotu üzerinde yer almaktadır (Şekil 4b). İstif, tabanında yer yer yoğun kükürt içeriğine sahip ve kalınlığı 1,5 metreye ulaşan linyit seviyeleriyle karakterize edilmektedir. Linyitli seviyelerin üzerine ilk birinci metrede kahverengi ve kırmızı renklerde gözlenen kumtaşları gelmektedir. Kırmızı renklerde gözlenen kumtaşları demir içeriği bakımından zengin olup, kahverengimsi kumtaşı tabakaları arasında ince bir seviyede sarı renkli çamurtaşı tabakaları bulunmaktadır. Kumtaşı tabakalarının üzerinde, çok ince seviyelerde linyit oluşumları yer almakta olup, bu linyitler demir içeriklidir. Linyit tabakasının üzerinde kahverengimsi kumtaşı-kırmızı çamurtaşı ardalanması (1 m kalınlığında) yer almaktadır. Üzerinde, yaklaşık kalınlığı 30 cm ölçülen yeşil renkli çamurtaşı tabakası gözlenmektedir. Yeşilimsi çamurtaşları üzerinde 1 m kalınlığında kireçtaşları yer almaktadır. İstifin üst seviyelerinde, toplam 2,5 m kalınlığına ulaşan grimsi, kahverengimsi ve sarımsı renklerde çamurtaşları gözlenmektedir. İstif, kireçtaşı merceği içeren, bol miktarda ostrakod barındıran organik şeyl tabakalarıyla sonlanmaktadır (Şekil 4b).

2.1.1.3. Kayaönü Kesiti

Bu istif, derenin güneyinde yer alan, önceden işletilmiş ancak şuan terk edilmiş durumda olan eski maden sahasının yüzleklerinden alınmıştır (Şekil 6). Toplam istif kalınlığı 26,5 m olarak ölçülmüştür. Linyit damarları genel olarak istifin alt seviyelerinde gözlenmekte olup, üst seviyelerinde ise karbonatlı tortullar yer almaktadır. (Şekil 4c). Linyitli seviyeler yoğun kükürt barındırmaktadır. Alt seviyelerde gözlenen linyit damarları çamurtaşları ile ardalanmalıdır. Çamurtaşı tabakaları içerisinde yer yer linyit mercceklerine rastlanmaktadır. İstifin yirminci metresinden itibaren kireçtaşı ve marn tabakalarına geçiş gözlenmektedir. Yirmibirinci metreden itibaren ise üstte bol kükürt içeren linyitli seviye gözlenmektedir. Bu linyit damarının üzerinde kilaşı-kireçtaşı ardalanması bulunmakta ve istif, kilaşı tabakalarıyla sonlanmaktadır (Şekil 4c).



Şekil 4. Ölçülü kesitler: **(a)** Ali Sökü sondajından ölçülen istif (Koordinat: 80414/28995); **(b)** Ali Sökü deresinin batısından ölçülen kesit (Koordinat: 80414/28995); **(c)** Kayaönü maden sahasından ölçülen kesit (Koordinat:80405/28300)

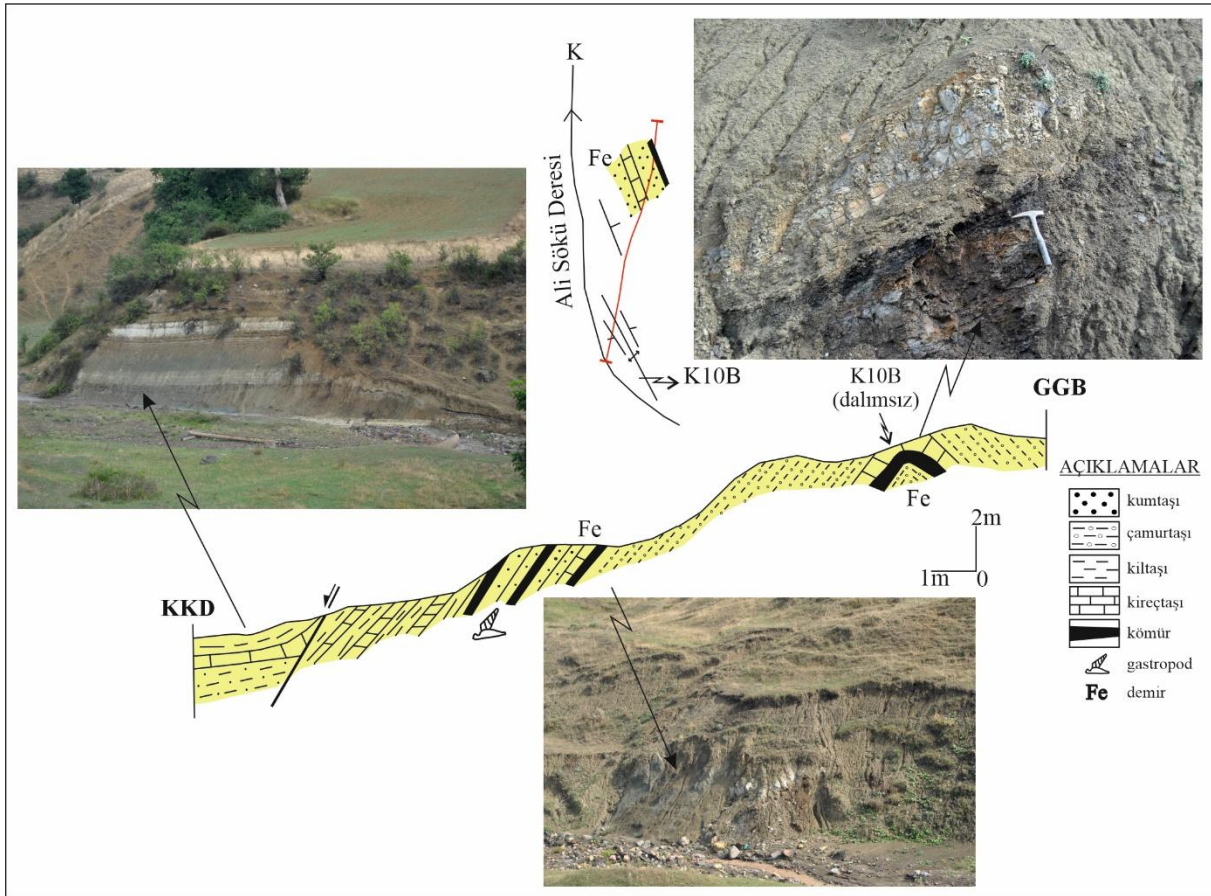


Şekil 5. Ali Sökü deresi ve derenin batısından ölçülen 80414/28995 koordinatlı kolon kesitin yerini gösterir fotoğraf



Şekil 6. Kayaönü maden sahasından ölçülen istifin kesit yeri (beyaz renkli daire, kesitin tabanını işaret etmektedir)

Ali Sökü deresi çevresinden ve Kayaönü maden sahasından derlenen ölçülü kesitler haricinde, bu derenin aşındırdığı, derenin her iki yamacında da (batı ve doğu) linyit içerikli tortullar yüzlek vermektedir (Şekil 7). Ali Sökü deresinin güney bölümünde K10B yönelimli dalımsız antiklinal eksenini de tespit edilmiştir (Şekil 7).



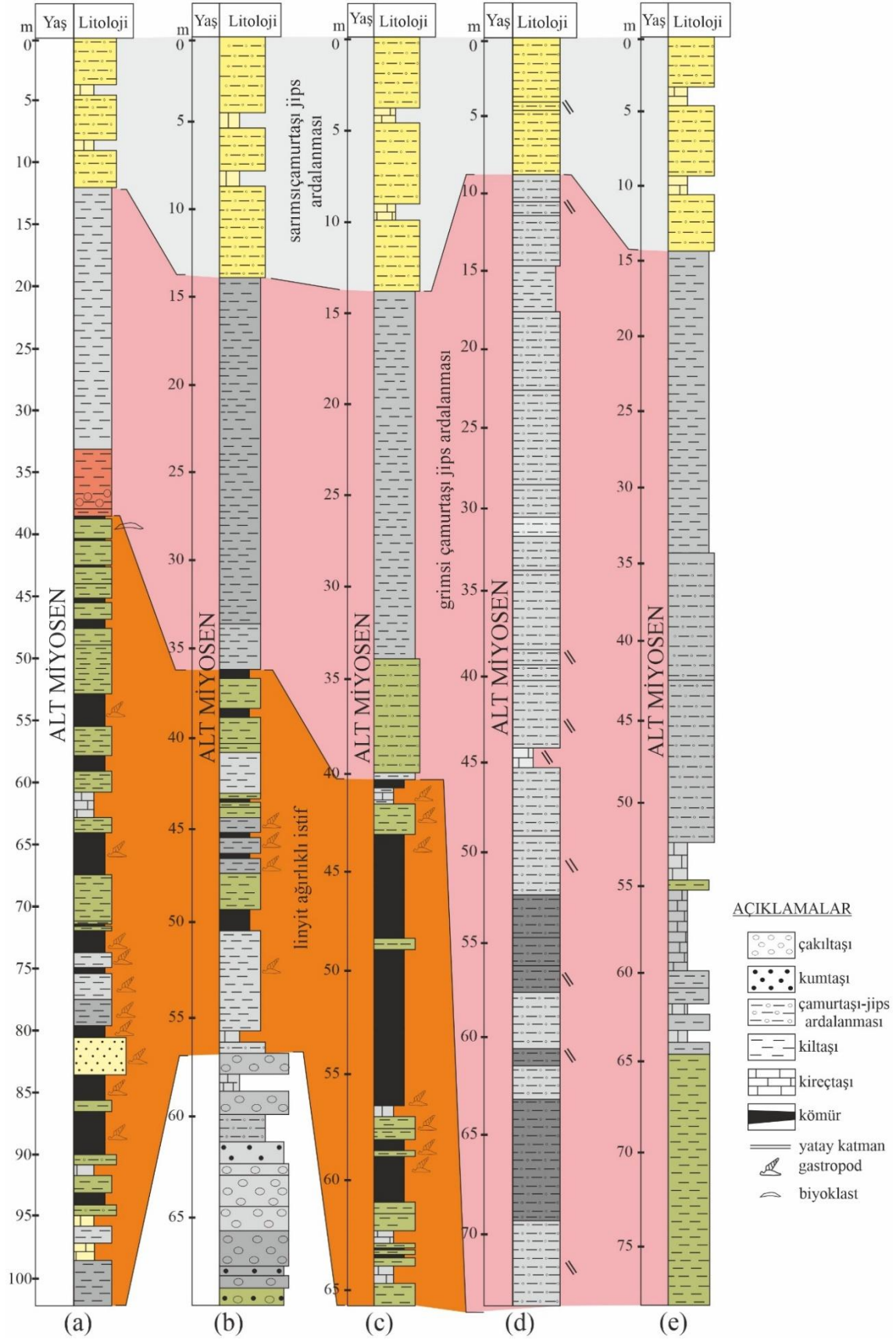
Şekil 7. Ali Sökü Deresi'nin doğusunda yüzlek veren mostradan ölçülen enine kesit (Koordinat: 80520/29153)

2.1.2. Özel madencilik

Kayaönü maden sahasının güneydoğusunda bulunan diğer bir özel firmadır (Şekil 2). Maden sahasında, işletme tarafından toplamda 5 farklı sondaj yapılmış olup, bu sondajlar birbirlerine yakın mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Sondajların üçü linyit damarını kesmiştir. Bu sondajlardan elde edilen karotlar, ölçülü stratigrafik kolon kesitlere dönüştürülmüş olup, aşağıda sondajlara ait ayrıntılar verilmektedir.

2.1.2.1. Özel kesiti I

83250/27450 koordinatlı bu sondaj yaklaşık 100 m kalınlığındadır. Yüzeyden yaklaşık 38 m derinlikte linyit damarını kesmiştir (Şekil 8a). Sondajın alt seviyelerinde değişken kalınlıklarda linyit damarları ince taneli tortullarla ardalanmalıdır. Karotun en derin yerinde istif, tabanda grimsi, yeşilimsi renklerde kıltaşı, sarımsı renklerde kireçtaşları ve gastropod içerikli linyit damarlarıyla ardalanmalı gözlenmektedir. Üzerinde yaklaşık 4 m kalınlığında, yoğun gastropod içerikli ve sarımsı renkte kumtaşları bulunmaktadır. Üzerinde yoğun gastropod fosilli grimsi kıltaşı linyitlerle ardalanmalı olarak yer almaktadır. Gastropod içerikli linyitlerle ardalanmalı olarak gözlenen yeşilimsi kıltaşı üzerinde kireçtaşı seviyesi yer almaktadır. Yaklaşık 22 m boyunca gözlenen linyitli seviyeler yeşilimsi kıltaşı tabakalarıyla ardalanmalıdır. Üzerinde, çakıl içerikli ve kırmızımsı renklerde çamurtaşları bulunmaktadır. Kesit üst seviyelerinde ise kömürleşme son bulmuş ve yaklaşık 20 m kalınlığında jips ve gri renkli kıltaşı ardalanmalı olarak yer almaktadır (Şekil 9). Kesit, sarımsı çamurtaşları beyazımsı kireçtaşları ve jips ardalanmasıyla sonlanmaktadır.



Şekil 8. Özal maden sahasından ölçülen kesitler: **(a)** Özal Kesiti I; **(b)** Özal Kesiti II; **(c)** Özal Kesiti III; **(d)** Özal Kesiti IV; **(e)** Özal Kesiti V

2.1.2.2. Özal kesiti II

83400/27400 koordinatından ölçülen bu istif Özal kesiti II olarak isimlendirilmiştir. Bu karot kalınlığı yaklaşık 70 m olup, yüzeyden yaklaşık 37 metre derinlikte linyit damarını kesmektedir. Ayrıca bu sondaj, kömürleri keserek havzanın tabanını oluşturan çakıltaşlarına kadar ulaşmıştır (Şekil 8b). Taban çakıltaşlarının üzerinde grimsi ve yeşilimsi renklerde kıltaşı tabakaları yer almaktadır. Linyit damarlarının gözlemlendiği yaklaşık 13 m kalınlığındaki seviye kıltaşı tabakalarıyla ardalanmalıdır. Alt seviyelerde gözlenen linyitler ve kıltaşı gastropod fosilleri içermektedir. İstif, Özal kesiti I karotunda olduğu gibi en üst seviyesinde gözlenen jipsler sarımsı çamurtaşları ve sarımsı renkli kireçtaşı ardalanmalıdır (Şekil 9). İstif, sarımsı renklerde gözlenen çamurtaşları ve beyazımsı kireçtaşlarının ardalanmasıyla sonlanmaktadır.



Şekil 9. Özal Madencilikte istifin en üstünde gözlenen jipslerle ardalanmalı sarımsı, grimsi çamurtaşları ve kireçtaşları

2.1.2.3. Özal kesiti III

Toplam derinliği 65 m olan karotta yüzeyden yaklaşık 40 m derinlikten itibaren ve yaklaşık 15 m kalınlığında linyit damarları kesilmiştir (Şekil 8c). 83410/27420 koordinatından ölçülen istif tabanda, yeşilimsi kıltaşı, grimsi renkli kireçtaşları ve değişken kalınlıklardaki linyitli seviyelerle ardalanmalı olarak başlamaktadır. Tabanda gözlenen kömür seviyeleri ve üzerinde yer alan kıltaşı gastropod içermektedir. Bu seviyelerin üzerinde kalınlığı yaklaşık 20 metreye ulaşan, jips ve grimsi renklerde kıltaşı gözlenmektedir. İstif, diğer tüm sondaj karotlarında gözlemlendiği gibi, üstte yaklaşık 15 m kalınlığına ulaşan jips içerikli sarımsı renkli çamurtaşları ve sarımsı renkli kireçtaşı tabakalarının ardalanmasıyla sonlanmaktadır (Şekil 9).

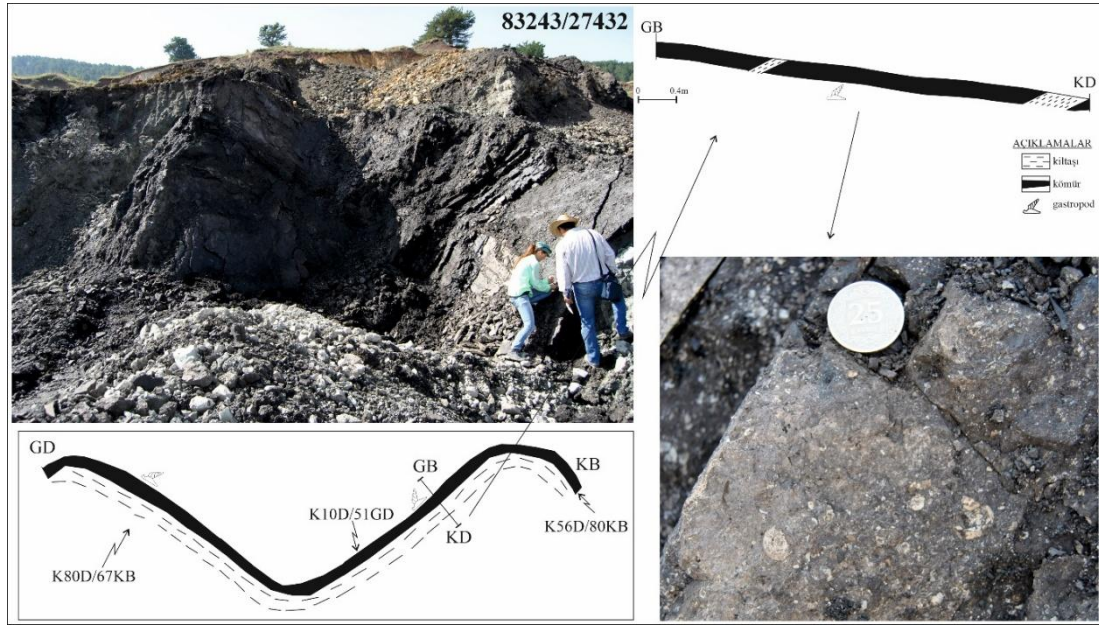
2.1.2.4. Özal kesiti IV

Yaklaşık 75 m kalınlığına sahip olan 83440/27485 koordinatlı bu karot, herhangi bir kömür damarını kesmemiştir. Bu kesitte yoğun olarak jipsli seviyelerle birlikte grimsi ve beyazımsı renkli çamurtaşları gözlenmektedir (Şekil 8d). Ayrıca, ince bir seviyede kireçtaşı bulunmaktadır. İstifin en üst seviyeleri ise sarımsı renkli çamurtaşları ile sonlanmaktadır (Şekil 9).

2.1.2.5. Özal kesiti V

Bu karot, yaklaşık 80 m kalınlığındadır (Koordinat: 83380/27460). Bu kesitte de kömür damarı gözlenmemiştir. İstifin en alt seviyesinde kalınlığı 15 metreye ulaşan yeşilimsi renklerde kilitaşı yer almaktadır. Bunların üzerinde kilitaşı ve grimsi renkli kireçtaşı ardalanmalı olarak gözlenmektedir. Kilitaşı ve kireçtaşı ardalanması üzerinde grimsi renklerde çamurtaşı ve grimsi renklerde kilitaşı tabakaları yer almaktadır (Şekil 8e). Diğer tüm karotlarda olduğu gibi, istifin en üst kısmı jips, sarımsı kireçtaşı ve sarımsı çamurtaşı ardalanmasıyla tamamlanmaktadır (Şekil 9).

Ayrıca, saha çalışmaları sırasında işletme alanı içerisinde yüzlek veren yerlerden de kesitler ölçülmüştür. Bu mostralarda yer alan linyit damarları, kıvrımlar, devrik tabakalanmalar ve faylanmalar içermektedir. Kıvrım eksen yönlemleri genellikle kuzeydoğu-güneybatı yönlüdür. Açık mostralarda gözlenen linyitli seviyelerde biçimi korunamamış biyoklastlar da bulunmaktadır (Şekil 10).



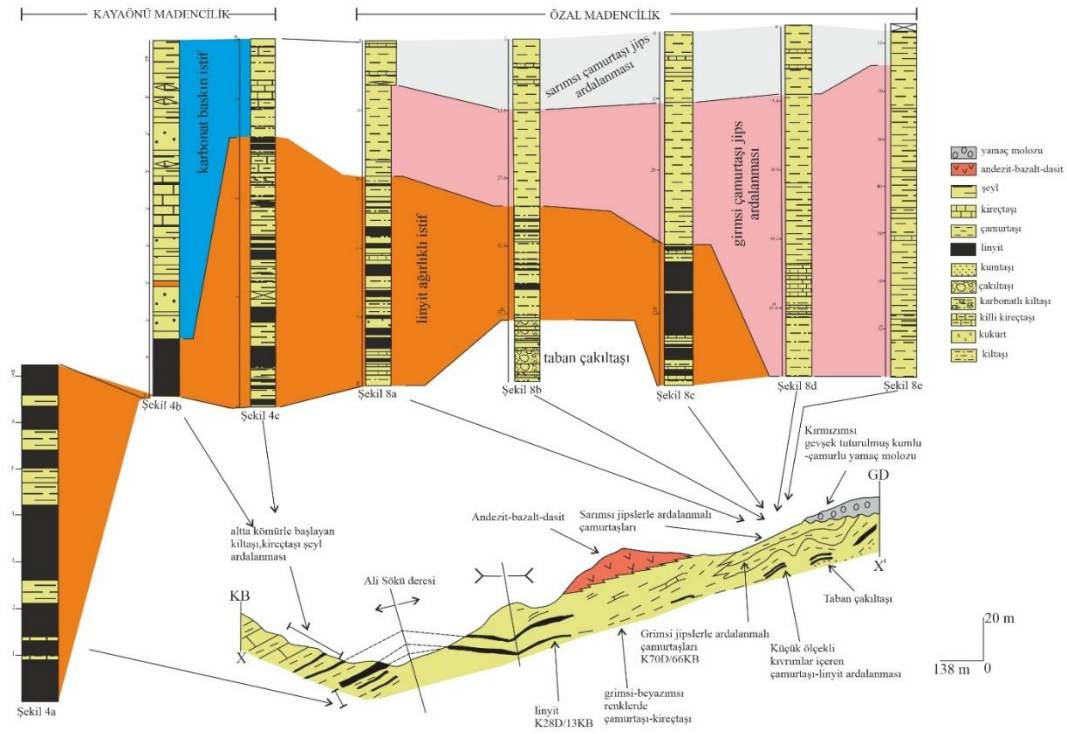
Şekil 10. Özal Madencilik'teki kömürlü düzeylerdeki deformasyonlar ve biyoklastlı kömürler

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

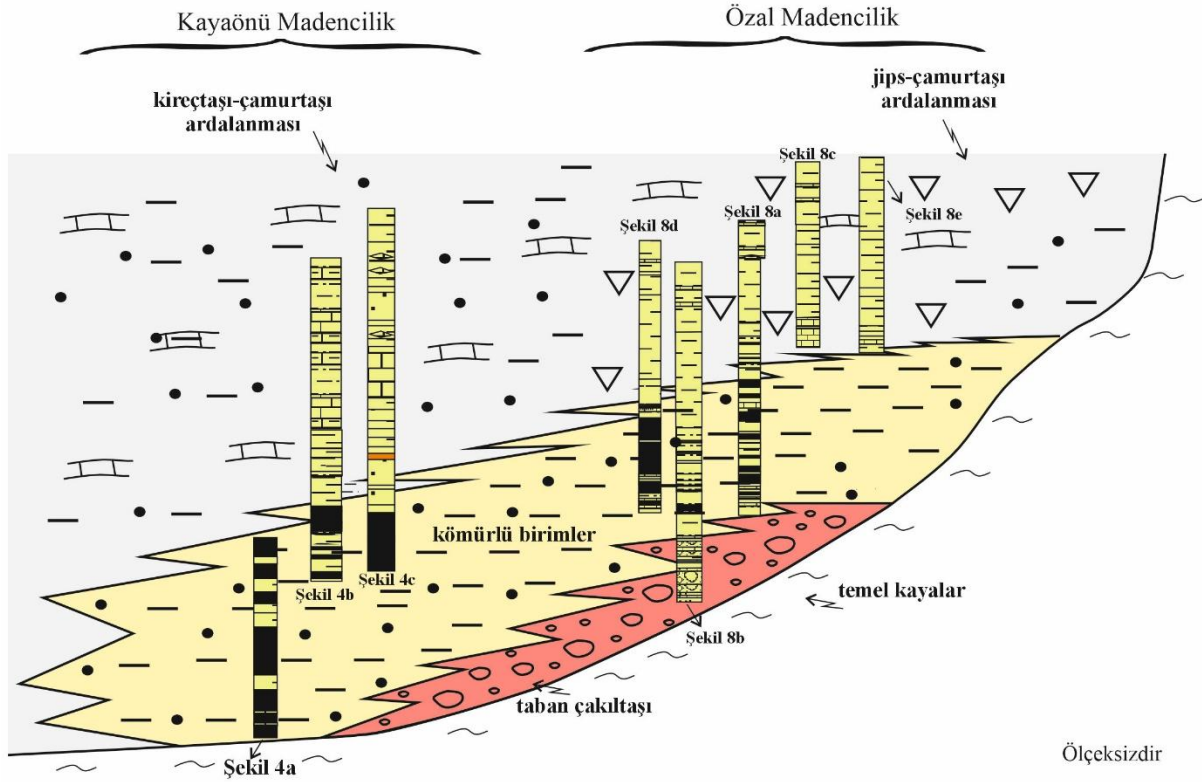
Havzanın güneydoğusunda yer alan işletmenin (Özal maden sahası) gerçekleştirdiği bu sondajların birbirine oldukça yakın mesafelerde bulunmasına rağmen tüm sondajların linyit damarını kesmemesi dikkat çekicidir ve bu durumun tektonik hareketlerle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Çünkü katman doğrultu ve eğimleri kısa mesafelerde, sıkça değişim göstermektedir (Şekil 10, 11).

Aspiras Havzası'ndan ölçülen tüm kesitlerin (Kayaönü ve Özal maden sahasları) korelasyonu yapıldığında, havzanın güneydoğusunda bulunan Özal maden sahasında gözlenen jips seviyelerinin, havzanın kuzeybatısına (Kayaönü maden sahasına) doğru gidildikçe gözlenmediği ve karbonatlı tortullara geçiş yaptığı dikkat çekmiştir (Şekil 11).

Ayrıca havzadan ölçülen tüm kesitler bir birikim alanı modeline aktarılmış ve üst seviyelerde bulunan jipsli seviyelerin sadece Özal maden sahasındaki istiflerde gözlemlendiği belirlenmiştir (Şekil 11, 12). Jipslerin bulunuşu, çökelim süreci boyunca bu bölgede kıyıya yakın ortam koşullarının varlığını göstermektedir. Jipsli seviyelerin birikimi sırasında buharlaşmanın yoğun olması, alanda sıcak iklim koşullarının etkili olduğunu düşündürmektedir. [19], çalışmasında bitki topluluklarına göre, sıcak iklim koşullarını belirten formların bol oluşu ve elde ettiği sayısal iklim değerlerine göre Aspiras Havzası tortullarının çökeliminin sıcak koşullar altında olduğunu belirtmiştir. Havzanın daha derin kesimlerinin, kuzeybatıda bulunan Kayaönü maden sahasına doğru uzandığı düşünülmektedir. Özal maden sahasında kıyasal koşullarda bulunan jipsler, havzanın daha da derinleştiği kuzeybatıya (Kayaönü maden sahasına) doğru kireçtaşı-marn ardalanmasına geçmektedir (Şekil 11, 12). İstifin en üstünde gözlenen karbonatlı ve jipsli seviyeler havzanın kapanma evresini belirtmektedir (Şekil 12).



Şekil 11. Aspiras Havzası'ndan ölçülen tüm kesitlerin korelasyonu (Şekil 2'de kesit hattı belirtilmiştir)



Şekil 12. Aspiras Havzası linyit içerikli sedimanların birikim alanı modeli

TEŞEKKÜRLER

Aspiras Havzası'na ait yapılan çalışmalar 3001 kodlu ve 115Y409 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir.

REFERANSLAR

- [1] N. Görür, M. Sakinç, A. Barka, R. Akkök ve Ş. Ersoy, Miocene to Pliocene palaeogeographic evolution of Turkey and its surroundings. *Journal of Human Evolution*. 4(1), 309-324. 1995.
- [2] A. M. C. Şengör, N. Görür ve F. Şaroğlu, Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In K. T. Biddle & N. Christie-Blick (Eds.), *Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation* (Vol. 37, pp. 227-264). Oklahoma: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication. 1985.
- [3] A. I. Okay ve O. Tüysüz, Tethyan sutures of northern Turkey. In B. Durand, L. Jolivet, F. Horváth, & M. Séranne (Eds.), *The Mediterranean basins: Tertiary extension within the Alpine Orogen* Geological Society, London, Special Publications (Vol. 156, pp. 475-515). Istanbul-Turkey: Eurasian Institute of Earth Sciences and Mining Faculty. 1999.
- [4] M. Sevin ve M.F. Uğuz, 1/100.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları Çankırı-G31 paftası, Maden Tetkik ve Arama Müdürlüğü yayını. 2011.
- [5] V. S. Ediger, Paleopalynology of coal bearing Miocene sedimentary rocks associate with volcanis of the Biga Peninsula (NW Turkey) and the effect of volcanism on vegetation. *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaontologie, Abhand*, 180. 259-277. 1990.
- [6] M. Şener, Neojen yaşlı Himmetoğlu (Göynük - Bolu) bitümlü şeyl sahasının litostratigrafik ve tektonik özellikleri, *Türkiye Jeoloji Bülteni*. 36(2). 45-56. 1993.
- [7] E. Ünay ve F. Gökteş, Kınık (Göğdes) Çevresindeki Erken Miyosen Yaşlı Linyitli Çökellerin Küçük Memeli Biyokronolojisi: Ön Sonuçlar, *Türkiye Jeoloji Bülteni*. 43(1). 1-5. 2000.
- [8] F. Akgün ve H. Sözbilir, A palynostratigraphic approach to the SW Anatolian molasse basin: Kale-Tavas molasse and Denizli molasse, *Geodynamica Acta*. 14. 71-93. 2001.
- [9] F. Akgün, M. S. Kayseri ve M. S. Akkiraz, Palaeoclimatic evolution and vegetational changes during the Late Oligocene Miocene period in Western and Central Anatolia Turkey. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 253. 56-90. 2007.
- [10] M. S. Akkiraz, F. Akgün ve S. Örcen, Burdur alanında yüzlek veren Alt Miyosen (Akitaniyen) Kavak Formasyonu'nun Palinomorf ve Foraminifer içerikleri. *Türkiye Petrol Jeologları Dergisi*, 21(2). 31-53. 2009.
- [11] M. S. Akkiraz, Vegetation and climate in the Miocene deposits of southern side of the Büyük Menderes Graben Şahinalı 2 core SW Turkey. *Bulletin of Geosciences*, 86(4). 859-878. 2011.
- [12] B. Gürler, Miyosen yaşlı kömür içerikli Himmetoğlu Havzası'nın (Göynük-Bolu) palinolojisi ve paleoekolojisi, YLS Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, 2015.
- [13] M. Bozcu, F. Akgün, G. Gürdal, A. Bozcu, S. Kapan, Ö. Karaca ve M.S. Akkiraz, Evolution of Çan Etili Çanakkale NW Turkey Lignite Basin Sedimentology Petrology Palynology and Lignite Characterization. *International Journal of Sediment Research*, 30(3),190-207. 2015.
- [14] M. S. Akkiraz, F. Akgün, U. Torsten, W. Volker, B. Angela, M. Volker ve S. D. Durak, Erken Orta Miyosen yaşlı kömürlü tortulların paleoekolojisi Uşak Güre ve Soma Havzalarından Örnekler. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 58(3),39-59. 2015.
- [15] S. D. Durak ve M. S. Akkiraz, Late Oligocene Early Miocene Palaeoecology based on pollen data from the Kalkım Gönen Basin Northwest Turkey. *Geodinamica Acta*, 28(4),295-310. 2016.

-
- [16] M. S. Akkiraz, T. Utescher, A. A. Bruch, V. Wilde, S. D. Durak ve V. Mosbrugger, Early Miocene palaeoflora and palaeoecology of the Soma Basin, Western Turkey. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 100(4), 921-938. 2020. Doi.10.1007/s12549-020-00434-3.
- [17] Y. Çelik, A.İ. Karayığit, R. G. Oskay, M. S. Kayseri-Özer, K. Christanis, J. C. Hower ve X. Querol, A multidisciplinary study and palaeoenvironmental interpretation of middle Miocene Keles lignite (Harmancık Basin, NW Turkey), with emphasis on syngenetic zeolite formation. *International Journal of Coal Geology*, 237. 2-33. 2021.
- [18] T. Denk, H. T. Güner ve J. M. Bouchal, Catalogue of revised and new plant macrofossils from the Aquitanian-Burdigalian of Soma (W Turkey)-Biogeographic and palaeoclimatic implications. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 296. 1-42. 2022.
- [19] S. D. Durak, M. S. Akkiraz ve A. Nazik, Early Miocene micropalaeontological record of the Aspiras Basin (Kastamonu), north-west Anatolia, Turkey. *Geological Journal*, 56(2). 704-728. 2021.
- [20] N. Özen, Kastamonu İli, Tosya İlçesi Aspiras-Karhın-Sekiler Köyleri Civarında Yapılan Kömür Sondajlarına Göre Hazırlanan Nihai Rapor, Maden Tetkik ve Arama Müdürlüğü yayını. 6155, 1975.
- [21] F. Hoş-Çebi, Kuzey Anadolu'daki Eosen Yaşlı Kömürlerin Organik Jeokimyasal Özellikleri ve Çökelme Ortamları, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [22] A. M. C. Şengör ve Y. Yılmaz, Tethyan Evolution of Turkey: A Plate Tectonic Approach. *Tectonophysics*, 75. 181-241. 1981.
- [23] M. Şengün, H. Keskin, F. Akçören, İ. Altun, M. Sevin, U. Akat, F. Armağan ve Ş. Acar, Kastamonu yöresinin jeolojisi ve Paleotetis'in evrimine ilişkin jeolojik sınırlamalar. *Türkiye Jeoloji Bülteni*. 33. 1-16. 1990.



SIFIR ENERJİ KONSEPTLİ BİNALARDA ENERJİ OPTİMİZASYON

ENERGY OPTIMIZATION FOR NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS (NZEB) CONCEPT

Hacer GEDİZ TAŞKIN^{*1} Hamza Feza CARLAK²

¹ ALPHA HVAC INDUSTRIES DOO, Montenegro.

² Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye.

ABSTRACT

Airports have a critical importance in the international air transportation system, as they provide the connection of the region to other points and most importantly, because of the contribution they make to the development of the region in which they are located. Airports no longer consist solely of aviation-related functions (e.g. passenger, cargo and aircraft handling facilities); It has developed to include shopping and hotel complexes, conference facilities, industrial zones, logistics centres and public transportation centres. With this complex and mega structure, studies on reducing harmful emissions, clean and green energy concepts, reducing carbon footprint, meeting the requirements of green building certifications such as NZEB, LEED, BREEAM have become critical. In addition to these concepts, the Airport Carbon Accreditation (ACA) program, specific only to airport structures, can also be preferred for airports.

All these concepts and areas of influence aim to make a positive contribution to global climate change. The aim of this thesis is to reduce the current carbon footprint by turning to cleaner and greener energy in an airport operation with a significant volume of real-time energy consumption and production, and to obtain LEED and BREEAM certification, and NZEB architecture so that the consumed energy can be met from clean energy sources produced or planned to be produced within the scope of the project. It aims to carry out an optimization study based on the requirements. Consumption analyses, architectural structure, window and glass areas, energy use and CO₂ amount, heating, cooling, domestic water installation, air conditioning and ventilation and wastewater treatment systems, domestic water systems, electricity and energy centre systems will be examined, and designs will be made after the current situation analysis, and suggestions will be presented. A hybrid machine learning model predicting future energy consumption has been developed, and impact analyses of the proposed recommendations have been carried out.

Keywords: BREEAM, Energy Optimization, LEED, NZEB, Machine Learning.

ÖZET

Havalimanları, uluslararası hava taşımacılığı sisteminde, bulunduğu bölgenin başka noktalara bağlantısını sağlamak için ve en önemlisi bulunduğu bölgenin gelişimine sağladığı katkı sebebi ile kritik bir öneme sahiptir. Havalimanları artık sadece havacılıkla ilgili işlevlerden (örneğin yolcu, kargo ve uçak taşıma tesisleri) oluşmuyor; alışveriş ve otel komplekslerini, konferans tesislerini, sanayi bölgelerini, lojistik merkezlerini ve toplu taşıma merkezlerini de içerecek şekilde gelişmiştir. Bu kompleks ve mega yapısıyla zararlı emisyonların azaltılmasına yönelik çalışmalar, temiz ve yeşil enerji kavramları, karbon ayak izinin azaltılması, NZEB, LEED, BREEAM gibi yeşil bina sertifikasyonlarının gerekliliklerin sağlanması kritik öneme sahip hale gelmiştir. Bu kavramların yanı sıra sadece havalimanı yapılarına özel Havalimanı Karbon Akreditasyon (ACA) programı da havalimanları için tercih edilebilir.

Tüm bu kavramlar ve etki alanları küresel iklim değişikliğine olumlu katkı sağlamayı hedeflemektedir. Bu çalışmanın amacı, gerçek zamanlı enerji tüketimi ve üretimi olarak önemli bir hacme sahip bir havalimanı işletmesinde, daha temiz ve yeşil enerjiye yönelerek, mevcut karbon ayak izini azaltmak ve tüketilen enerjinin üretilen ya da proje kapsamında üretilmesi planlanan temiz enerji kaynaklarından karşılanabilmesi için LEED ve BREEAM sertifikasyon gereklilikleri ve NZEB mimarisi baz alınarak bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmesi hedeflemektedir. Tüketim analizleri, mimari yapı, pencere ve cam alanları, enerji kullanımı ve CO₂ miktarı, ısıtma ve soğutma, kullanma suyu tesisatı, iklimlendirme ve havalandırma ve atık su arıtma sistemleri, kullanma suyu sistemleri, elektrik ve enerji merkezi sistemleri incelenerek, mevcut durum analizleri sonrası tasarımlar yapılmış ve öneriler sunulmuştur. Geleceğe yönelik enerji tüketimi tahmini yapan hibrit makine öğrenimi modeli oluşturularak, sunulan önerilerin etki analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: BREEAM, Enerji Optimizasyonu, LEED, NZEB, Makine Öğrenimi.

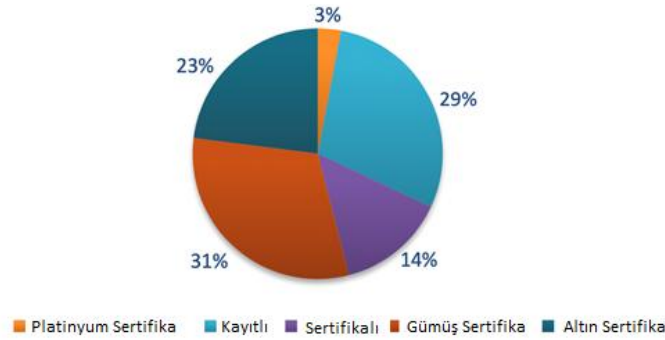
*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: hacergediz@gmail.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
09.01.20254	19.01.2025	28.01.2025	01.06.2025

1. GİRİŞ

Havalimanları, günümüzde büyük karbon ayak izi oluşturan tesisler arasında önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle, havalimanlarının çevresel etkilerini azaltmak ve sürdürülebilir bir yapıya dönüştürmek, modern dünyanın önceliklerinden biridir. Bu amaçla, havalimanları LEED, BREEAM, ACA gibi çeşitli sürdürülebilirlik sertifikasyonlarına yönelmektedir.

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), çevre dostu binaların tasarımı, inşası ve işletilmesi için uluslararası bir sertifikasyon sistemi olarak öne çıkar. Havalimanları da LEED sertifikasını elde ederek enerji verimliliği, su tasarrufu, atık yönetimi gibi alanlarda belirli standartları karşılamakta ve çevresel etkilerini azaltmaktadır (Şekil 1) [1].



Şekil 1. LEED Sertifikasına Sahip Dünyanın Havalimanı Komplekslerinin Şeması [1]

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) ise İngiltere merkezli bir sürdürülebilirlik derecelendirme sistemi olup bina çevresindeki olumlu etkileri değerlendirir. Havalimanları, BREEAM sertifikasyonunu elde ederek yeşil alanların korunması, çevre dostu ulaşım alternatiflerinin teşvik edilmesi gibi unsurlara odaklanarak çevresel performanslarını artırabilir [2].

NZEB gerekliliği, AB ülkelerinde 1 Ocak 2030'dan itibaren tüm yeni binalara, 1 Ocak 2027'den itibaren ise kamu yetkilileri tarafından kullanılan veya sahip olunan tüm yeni binalara uygulanacaktır. Teklifin odak noktası operasyonel sera gazı emisyonlarının azaltılması olsa da ZEB tanımı ayrıca yaşam döngüsü Küresel Isınma Potansiyelinin (GWP) hesaplanmasını ve bunun binanın enerji performans sertifikası aracılığıyla açıklanmasını içermektedir. Bu gereklilik, AB ülkelerinde 1 Ocak 2027 tarihinden itibaren kullanılabilir taban alanı 2000 metrekareden büyük olan tüm yeni binalar için ve 1 Ocak 2030 tarihinden itibaren tüm yeni binalar için geçerli olacaktır [3].

Türkiye'de NZEB kavramı çok yaygın olmamakla birlikte, direktifler ile zorunlu hale getirilmemiştir. Ancak, sürdürülebilirlik hedefleri olan havalimanı gibi büyük ticari işletmelerde gerekliliklerin sağlanması büyük önem arz etmektedir.

Havaalanı Karbon Akreditasyonu (ACA), havalimanları için kurumsal olarak onaylanmış tek küresel karbon yönetimi sertifikasyon programıdır. Havalimanlarının karbon emisyonlarını yönetme ve azaltma çabalarını 7 sertifika seviyesi aracılığıyla bağımsız olarak değerlendirir ve tanıır: 'Seviye 1- Haritalama', 'Seviye 2- Azaltma', 'Seviye 3- Optimizasyon', 'Seviye 3+- Nötrlük', 'Seviye 4- Dönüşüm', 'Seviye 4+- Geçiş' ve 'Seviye 5' [4].

NZEB, LEED, BREEAM kavramlarına ek olarak havalimanlarının karbon ayak izi azaltılmasına yönelik tek küresel sertifikasyon programı olan, havalimanı karbon akreditasyonu (ACA) programının gereklilikleri, seviyeleri ve ana kriterlerini incelenmesi sonrası, dört farklı kavramın karşılaştırılması yapılacaktır. Karbon akreditasyonu, havalimanlarının çevresel performanslarını ölçmek ve iyileştirmek için bir fırsat sunmaktadır. Havalimanlarındaki LEED ve BREEAM sertifikasyonları ile karbon azaltma stratejilerinin etkinliği incelenebilir ve sürdürülebilirlik alanında yeni fırsatlar keşfedilebilir.

Literatür taraması aşamasında, havalimanlarında karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik yapılan çalışmaların genellikle havalimanına bağlı bulunan ek binalarda ya da küçük yapılarda yoğunlaştığı görülmüştür. Havalimanının birden fazla terminalinin iç yapısında yapılacak enerji verimliliği ve karbon ayak izi azaltma çalışmaları tek tek incelenerek elde edilecek enerji verimliliği faydası ve karbon ayak izi azaltma miktarı hesaplanmıştır [1, 5-19].

Geleceğe yönelik gerçekleştirilecek enerji tüketimleri, elde edilecek enerji verimliliğinin belirlenmesinde, sertifikasyon kriterlerinde ve önerilecek verimlilik projelerinin sürdürülebilirliği için önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle NZEB mimarisinde tüketilecek enerjinin temiz enerji kaynaklarının üretiminden karşılanabiliyor olması esastır. Bu sebeple, geleceğe yönelik enerji tüketimi tahmini yapan başarılı bir hibrit makine öğrenimi modeli geliştirilmiştir. Bu modelde her bir terminal için 12 ayrı model geliştirilip, 12 ayrı modelin birleşimi ile hibrit bir makine öğrenimi modeli oluşturulmuştur.

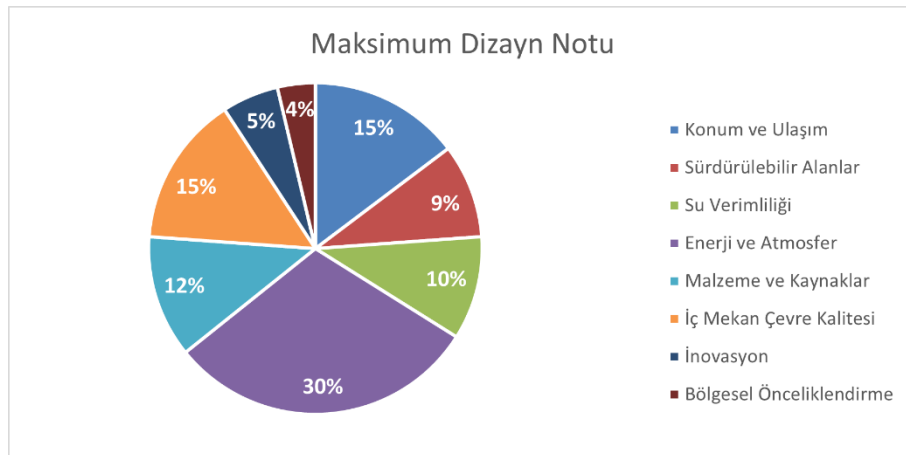
2. MATERYAL VE METOT

LEED, BREEAM, ACA ve NZEB kavramları, kredi başlıkları ve içerikleri, puanlamaları, havalimanlarında örnek yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmaların sürdürülebilirlik ve karbon ayak izinin azaltılması hedeflerine katkıları değerlendirilmiştir. Havalimanı kompleksinde NZEB, LEED ve ACA için yapılan inovasyon çalışmaları detaylandırılacak, enerji verimliliğine, sürdürülebilirliğe, karbon ayak izine katkıları hesaplanmıştır.

Çalışma sırasında, mevcut durum analizleri için çeşitli cihazlar kullanılmıştır. Bu cihazlar arasında enerji analizörü, termal kamera (FLIR T400, USA), lüksmetre (LUTRON LX-1108, USA), dijital fark basınç transmitteri, sıcaklık ölçer (TESTO, Almanya), baca gazı analizörü (ECOM, Almanya), ultrasonik debimetre (GE, USA), stroboskop (LUTRON, Taiwan), iletkenlik ölçer (LUTRON, Taiwan) bulunmaktadır. Bu cihazlar, verimlilik hesaplamaları için ölçümler yapmada kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında havalimanının mimari yapısı, bina durumu, yapı bileşenleri ve malzemeleri, konstrüksiyon detayları, pencere ve cam alanlar, enerji kullanımı ve CO2 miktarı, ısıtma, iklimlendirme, havalandırma ve soğutma sistemleri, tesisatlar, aydınlatma sistemleri, transformatörler, elektrik motorları, elektrikli cihazlar ve ofis ekipmanları, bina otomasyon sistemleri, fan sistemleri, pompa sistemleri, yalıtım sistemleri, bina enerji performansı mevcut durumları incelenerek, verimlilik artırıcı çözümler belirlenmiştir. Belirlenen projeler ile ACA, LEED sertifikasyon puanlamalarına katkıları ve NZEB mimarisine katkıları hesaplanmıştır.

Mevcut durum analizleri öncesinde istatistiksel olarak hangi kredi puanının katkısının daha çok olacağı incelenmiş ve toplam puan içerisindeki yoğunluk yüzdeleri Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kredi Maddesi Yoğunluk Oranları

LEED ve BREEAM kapsamında belirtilen her bir puanlama kriteri ayrı uzmanlık alanı gerektirmektedir. Enerji ve atmosfer puanlama kriterinin katsayı olarak en büyük katsayıya sahip olması ve NZEB mimarisinde enerjinin en önemli ana konulardan biri olması sebebi ile bu çalışma içerisinde enerji optimizasyonu konusuna odaklanılmıştır. Enerji optimizasyonu için, tüketimi azaltan, verimliliği

arttıran ve çevresel etkiyi azaltan yöntemler kullanılmıştır. Enerji optimizasyonunun önemli bir parçası olan, enerji tüketim tahmini için makine öğrenimi modeli kullanılmıştır. Makine öğrenimi modeli olarak veri setine en uygun olduğu düşünülen doğrusal regresyon modeline dayalı ridge regresyon ve karar ağacı temelli random forest makine öğrenimi modelleri kullanılmıştır. Verilerimizin doğrusal olduğundan emin olunmaması sebebi ile modelin genelleme yeteneği yüksek olan doğrusal olmayan ilişkileri yakalayabilen random forest modelinin de kullanılmasına karar verilmiştir.

Daha az enerjiyle daha fazla iş yapılmasını sağlayan enerji verimliliği teknolojileri ve stratejileri belirlenmiştir. Bu kapsamda fayda maliyet analizleri ve yatırım geri dönüş süreleri hesaplanmış olup, enerji optimizasyonu için öncelikli yatırımlar belirlenmiştir. Fayda maliyet analizleri kapsamında, doğrudan maliyetler ve dolaylı maliyetler belirlenmiştir. Faydaların finansal değeri (1) bağlantısı ile hesaplanmıştır.

$$NPV = \sum \frac{Faydalar_t}{(1+r)^t} - \sum \frac{Maliyetler_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Bu denklemde NPV, İndirgenmiş değer (Net Present Value), Faydalar_t, t yılındaki faydalar, Maliyetler_t, t yılındaki maliyetler, r iskonto oranı, t yıl sayısı'nı ifade eder.

NPV'nin pozitif olması halinde, önerilen verimlilik projesinin toplam faydası maliyetinden daha fazla olup, ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Yatırım geri dönüş süresi hesaplaması için, her bir proje önerisinin yatırım maliyetleri ve yatırımın her yıl sağladığı nakit akışı (2) bağlantısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{Yatırım Maliyeti}}{\text{Yıllık Nakit Akışı}} \quad (2)$$

Enerji optimizasyonu kapsamında, termal konfor ve karbon ayakizi azaltımı ölçümleri de yapılmıştır. Karbon ayak izi hesaplaması, enerji tüketimine bağlı olmak üzere (3) bağlantısı baz alınarak hesaplanmıştır.

$$CO_2 \text{ Emisyonu} = \text{Enerji Tüketimi} \times \text{Emisyon Faktörü} \quad (3)$$

Burada, enerji tüketimi TEP (Ton Eşdeğer Petrol) cinsinden enerji tüketimi miktarını, emisyon faktörü birim enerji tüketimi başına salınan CO₂ miktarını ifade eder. Bu faktör, kullanılan enerji türüne bağlı olarak değişmektedir. Kullanılan emisyon faktörleri Çizelge 1'deki gibidir.

Çizelge 1. Emisyon Faktörü Tablosu

Yakıt Tipi	Emisyon Faktörü (CO ₂) (kg/GJ)
Petrol	72,6
Benzin	68,6
Fuel Oil	76,6
Dizel	69
Diğer Petrol Ürünler	72,6
Antrasit	96,3
Kok Kömürü	92,7
Taşkömürü	92,7
Linyit	99,2
Kok Gazı	106
Doğal Gaz	55,8
Elektrik	153,6
1 TEP = 41,868 GJ	

Mevcut durum analizleri sonrası, geleceğe yönelik gerçekleşecek enerji tüketimleri tahmini yapan makine öğrenimi modeli geliştirilmiştir. Enerji tüketim verisinin, elde edilecek enerji verimliliğinin belirlenmesinde, sertifikasyon kriterlerinde ve önerilecek verimlilik projelerinin sürdürülebilirliği için önemli bir rol oynaması sebebi ile enerji tüketim tahmini yapan hibrit makine öğrenimi modeli oluşturulmuştur.

Bu tekniğin genel metodolojisi şu şekildedir: Temel modelin tahminleri, yeni bir özellik olarak meta-model girdi verisi olarak eklenmektedir. Bu durumda, modelin tahminleri, bir sonraki modelin tahminini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır.

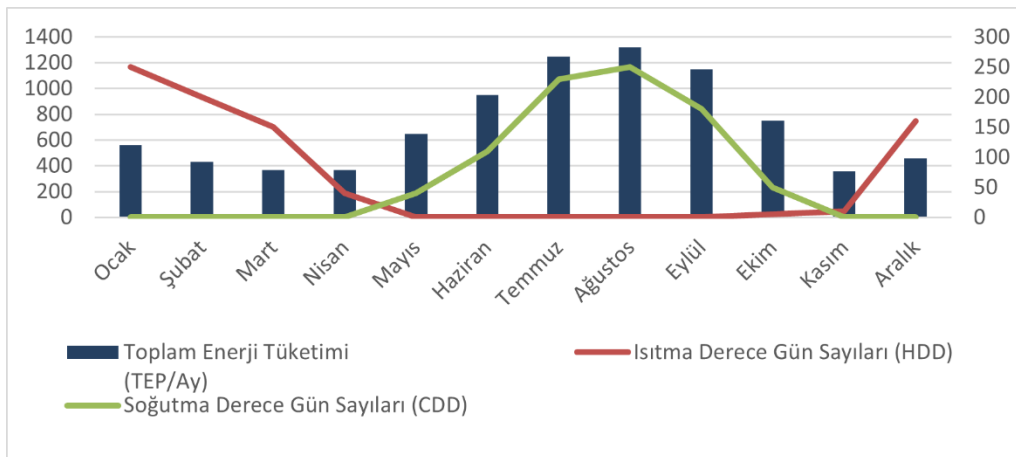
İlk olarak, temel model seçilmektedir ve bu model eğitilmektedir. Bu modelin tahminleri daha sonra, modelin girdi özelliklerinden biri olarak kullanılmaktadır. Son adımda, meta-modelin yaptığı tahminler veya düzeltmeler ile temel modelin tahminleri birleştirilmektedir. Böyle bir hibrit model kullanılmasının sebebi, genellikle daha doğru ve sağlam tahminler sağlamasıdır.

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

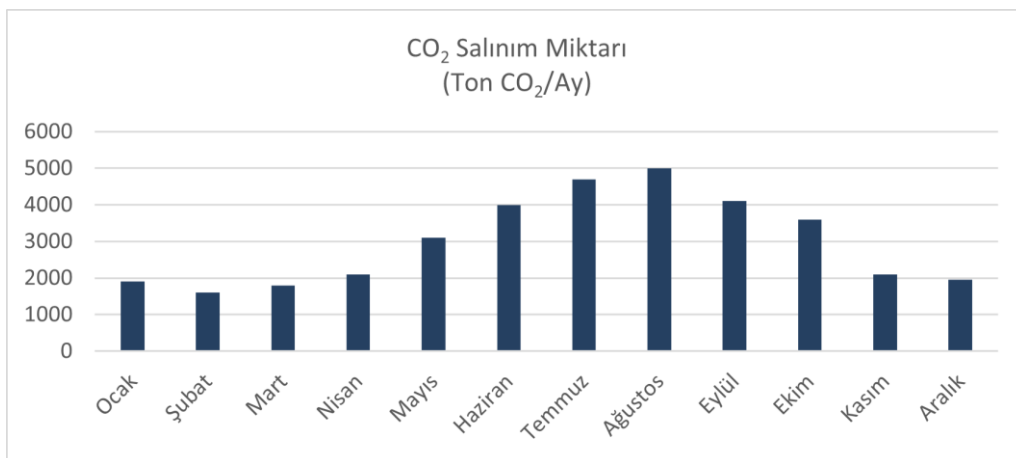
3.1. Mevcut Durum Analizleri

Tüketilen enerjinin havalimanı bölümlerine kırılımları incelenmiş olup, %18 Terminal 1, %21 Terminal 2, %14 Terminal 3 ve %47 diğer bölümler olduğu tespit edilmiştir.

Aylara sarıh toplam enerji tüketimi, ısıtma ve soğutma sistemlerinin etkileri incelenmiş olup kıyaslama grafiği Şekil 3'te ve karbondioksit salınım miktarı Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Isıtma-Soğutma-Tüketim Karşılaştırması



Şekil 4. Karbondioksit Salınım Miktarı

Mevcut durum analizlerinde verimlilik projelerinin belirlenebilmesi amacıyla, ısıtma ve soğutma sistemlerindeki ısı pompalarının verimliliklerine, tesisat elemanlarındaki izolasyon eksikliklerine, kazanların baca gazı analizlerindeki O₂ miktarına ve baca gazı sıcaklıklarına ölçümlenmiştir. İstenen verimlilikte çalışmayan tesisat elemanları tespit edilip iyileştirme projeleri oluşturulmuştur. Belirlenen iyileştirme projeleri ile toplam 35 TEP/Yıl tasarruf sağlanacağı hesaplanmıştır. 129,7 ton/yıl karbondioksit azalma miktarı hesaplanmıştır.

Bazı noktalarda floresan ve metal hali de aydınlatmalarının lux değerinde değişiklik olmadan LED lambalar ile değiştirilmesi iyileştirme projeleri içerisine dahil edilmiştir. Proje, yaklaşık 4100 armatür değişimini kapsamaktadır.

Havalimanı ve ek tesislerde elektriksel gücün mekanik güce çevrilmesi amacıyla kullanılan tüm AC pompa, fan ve kompresör motorlarının verimlilikleri incelenmiş olup, düşük verimliliğe sahip motorların değiştirilmesi iyileştirme projeleri içerisine dahil edilmiştir.

Havalimanında kullanılan tüm trafoların etiket değerlerine bakılmış, tüm yükleri incelenmiş olup, yüklenme oranlarının %14-42 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Trafolardaki kayıplar boşta kayıplar (demir kayıpları) ve yükte kayıplar (bakır kayıpları) olmak üzere analiz edilmiştir. Trafoların verimliliğin yüksek olması ve yüklenme oranlarının az olması sebebi ile iyileştirme projesine dahil edilmemiştir.

Ölçüm sonuçlarında, hatlarda gerilim dengesizliği ile ilgili bir problem olmadığı görülmüştür. Gerilim dengesizliği sınır değer olan %1'in çok altındadır. Herhangi bir verimsizliğe neden olacak seviyede değildir.

Yapıda kullanılan AC motorların bazıları, sürücüler ile çalıştırılmaktadır. AC sistemlerin hız kontrolü sayesinde hem enerji tasarrufu sağlanmakta hem de verimlilik artırılmaktadır. AC motorlarda en büyük tasarruflar sistem kontrollerinde gereksiz çalışma durumlarında kapatılması veya hızlarının düşürülmesi şeklinde olabilir.

Binaların kullanım suyu ihtiyacını karşılamak amacı ile pompa sistemleri kullanılır. Yapılan mevcut durum analizlerinde, ölçümlerde hidrofor pompalarının verimliliklerinin düşük olduğu (ortalama %36) tespit edilmiş olup, iyileştirme projeleri içerisine dahil edilmiştir.

Mevcut durum analizleri sonrası, geleceğe yönelik gerçekleşecek enerji tüketimleri tahmini yapan makine öğrenimi modeli geliştirilmiştir. Enerji tüketim verisinin, elde edilecek enerji verimliliğinin belirlenmesinde, sertifikasyon kriterlerinde ve önerilecek verimlilik projelerinin sürdürülebilirliği için önemli bir rol oynaması sebebi ile enerji tüketim tahmini yapan hibrit makine öğrenimi modeli oluşturulmuştur.

Modelde toplam 37 aylık veri bulunmaktadır. 12 ay veri eğitim için, diğer 12 aylık veri validasyon için ve son 12 aylık veri ise test için kullanılmıştır. Geriye kalan 1 aylık veri ise tahminler ile gerçekleşen verilerin kontrolü için kullanılmıştır. Özellik mühendisliği (feature engineering) yapılmıştır. Bir tarih verisinin elimizde olması sebebi ile, ham verimizden saat, gün ve ay gibi özellikler kod ile çıkarılmıştır. One hot encoding ile trend eklenmiştir. Mevsimsel olarak modelin trendi algılamasını sağlanmıştır. Bu sayede, saat, gün ve ay özelliklerine mevsim özelliği de eklenmiştir. Zamanla artan tüketim durumu söz konusu olması halinde bu durumu trend (eğilim) ile yakalayabilmek için eklenmiştir. Zaman serisi verileri üzerinde yapılan analizlerde, geçmiş veriler önemli bir etkiye sahiptir. Geçmiş verilerin gelecekteki tahminlere nasıl etki ettiğini modellemek için çok önemli bir tekniktir. "Get lag" yöntemiyle geçmiş zaman dilimlerinden elde edilen verileri, modelin daha iyi öğrenmesini sağlamak için özellikler (features) olarak kullanılmıştır. Bu sayede 1 saat öncesinden başlayarak geçmiş tüm veriler "n" saat önceye kadar kullanılmıştır. Bu yeni özellikleri, makine öğrenimi modelinin zaman serisi verilerini daha iyi anlamasına yardımcı olması için kullanılmıştır.

Makine öğreniminin üçüncü aşaması olan model seçimi ve eğitim aşamasında, geleceğe yönelik saatlik bazda enerji tüketim tahmini için, random forest ve ridge regresyon makine öğrenimi modelleri seçilmiştir. Lineer regresyon yerine ridge seçilmesinin sebebi, aşırı uyumu (overfitting) engelleyen L2 normu eklemesi ve çoklu doğrusal bağlantılarda kullanılmaya daha uygun olmasıdır. Random forest modelinin zaman serisi verimizde kullanabilmek adına, verimiz özellik mühendisliği aşamasında

kullanıma hazır hale getirilmiştir. Zaman serisi modeller sıralı ve bağımlı verilerdir fakat random forest sırasız verilere dayalı bir algoritmadır. Zaman serisi modellerinde zaman bağımlılığının dikkate alınması gerektiğinden, random forest makine öğrenimi modeline uygun hale getirebilmek için lag features, gün, hafta, ay, yıl gibi zaman serimize etki eden mevsimsel ve doğasal özellikler sebebi ile özellik çıkarma işlemleri uygulanmıştır. Ek olarak, zaman serisinin genel trendi veya mevsimsel döngüleri de özellikle hava durumu gibi alanlarda önemli olması sebebi ile trend ve mevsimsel özellik çıkarma işlemi de kodumuzda yapılmıştır. Bu işlemler ile, sırasız verilere dayalı Random Forest algoritmasının kullanabilmesi için, zaman serisi sırasız bir formata dönüştürülmüştür.

Bu çalışmalar ışığında, model değerlendirme aşamasında her iki model için sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Validation T1 (TEP) Scaled - Ridge: MSE=-0.01285

Validation T1 (TEP) Scaled - RF: MSE=-0.01232

Validation T2 (TEP) Scaled - Ridge: MSE=-0.01392

Validation T2 (TEP) Scaled - RF: MSE=-0.0138

Validation T3 (TEP) Scaled - Ridge: MSE=-0.01251

Validation T3 (TEP) Scaled - RF: MSE=-0.01183

Validation Other (TEP) Scaled - Ridge: MSE=-0.01346

Validation Other (TEP) Scaled - RF: MSE=-0.01273

Test T1 (TEP) Scaled - Ridge: MAE=5.62575

Test T1 (TEP) Scaled - RF: MAE=6.61223

Test T2 (TEP) Scaled - Ridge: MAE=6.73309

Test T2 (TEP) Scaled - RF: MAE=8.01429

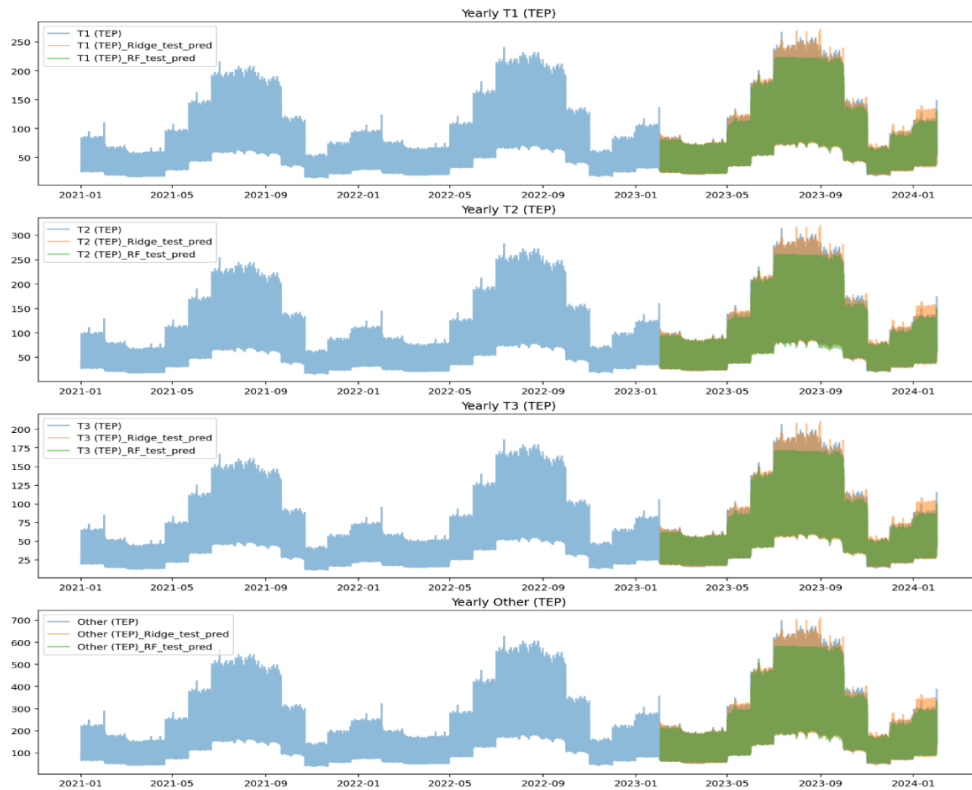
Test T3 (TEP) Scaled - Ridge: MAE=4.32273

Test T3 (TEP) Scaled - RF: MAE=5.24974

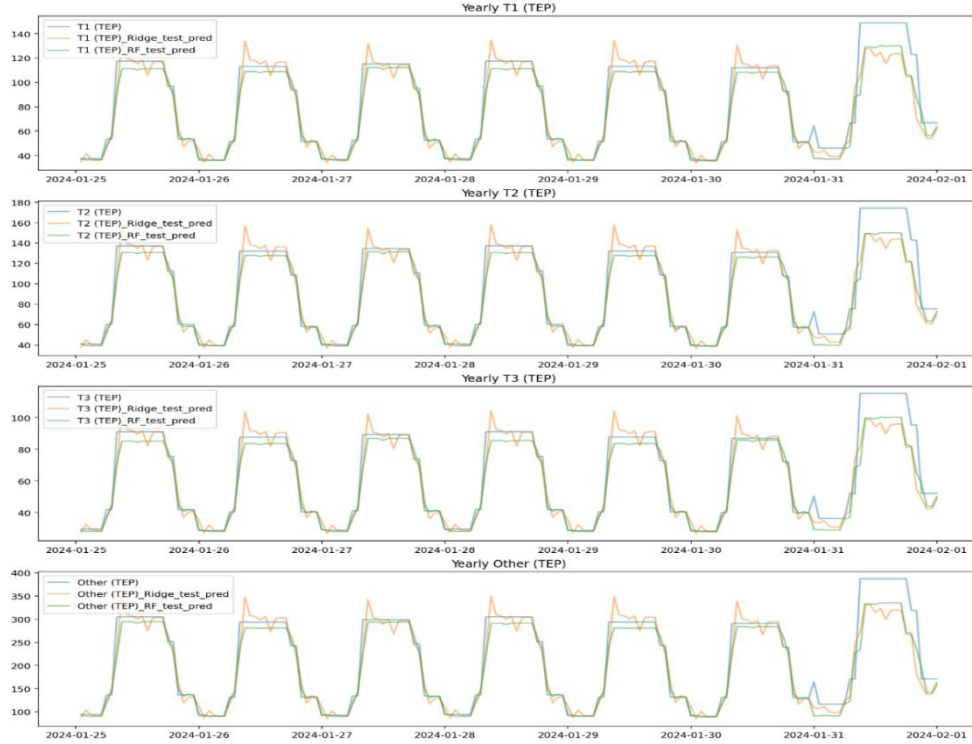
Test Other (TEP) Scaled - Ridge: MAE=14.84201

Test Other (TEP) Scaled - RF: MAE=17.35436

Ridge ve RF model test çıktıları Şekil 5'te 1 aylık tahminler ve gerçek ölçüm sonuçları karşılaştırması Şekil 6'daki gibidir.



Şekil 5. Ridge ve RF Model Test Çıktıları



Şekil 6. 2024 Yılı Gerçek Verileri ve Model Tahminleri Sapma Miktarları

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

LEED puanlama kriteri içerisinde en yüksek ağırlığa sahip olan enerji üzerinde çalışılmış olup, enerji optimizasyonu ile NZEB mimarisinde önemli gelişme kaydedileceği düşünülmüştür. Bu sebeple tüketimi azaltmayı hedefleyen tüm iyileştirme projeleri çıkarılmıştır. Aynı zamanda bu çalışma kapsamında, havalimanındaki tüm terminallerin, ek binaların ve yapıların NZEB kapsamında değerlendirilebileceği düşünülmüştür. Ancak, önerilen tüm iyileştirme projeleri uygulansa bile yüksek tüketimi nedeniyle NZEB mimarisinin tüm havalimanı için sağlanamayacağı kanıtlanmıştır. Fakat havalimanı içerisinde bulunan bağımsız bölümler için uygulanabilme ihtimali yüksektir. Literatür taraması aşamasında karşılaşılan örnek projelerde de bu çalışmalar incelenmiştir.

Ayrıca, enerji optimizasyonunun NZEB mimarisini sağlamada etkisinin yüksek olacağı düşünülmüştür. Ancak, tüm optimizasyon projeleri gerçekleştirilse bile iyileştirme etkisinin yalnızca 178 TEP/yıl olduğu görülmüştür. TEP iyileştirme etkisi beklenildiği kadar çok olmasa da karbon emisyonu azalma miktarı (1.045 ton CO₂/yıl) ve çevresel etki (3.135 ağaç eşdeğeri) iyileştirmeleri de göz önüne alındığında, projelerin hayata geçirilmesi gerekliliği önem arz etmektedir. Fakat enerji alanında yapılacak bu iyileştirmelerin, havalimanı içerisinde yapılan tüm yapılar için tek başına yeterli olmadığı da tespit edilmiştir. Bu sebeple, NZEB mimarisinin uygulanabilmesi için pilot yapılar/terminal binaları seçilip, aşamalı geliştirme projeleri yapılmalıdır. Bina kabuk detayı, mimari yapısı, enerji yönetim sistemi gibi tüm faktörler birbirini tamamlayan veri girdileri olması sebebi ile bir bütün olarak incelenmelidir. Puanlama kriterlerinin ayrı düşünülmesi, etki yoğunluk katsayıları ya da ilişkilerini belirten korelasyon katsayıları yüksek olsa da bir bütün halinde ele alınmadığı sürece katkısı beklenildiği gibi olmayacaktır.

Pilot yapıların seçilmesi ile her bir bağımsız bölümde enerji optimizasyonu çalışmalarına ek olarak yapılacak iyileştirmelerin (bina kabuk detayı, mimari yapı vb.), tüketim üzerindeki etkisi çalışma kapsamında oluşturulan hibrit makine öğrenimi modelinde simüle edilecektir.

ACA sertifikasyonu için bu çalışma kapsamında belirtilen iyileştirmelere ek olarak, özellikle ulaşım ve taşımacılık alanında ek projeler planlanmaktadır. Taşımacılıkta elektrikli araçların kullanılması, hybrid çalışma sistemine geçilerek su, enerji tüketiminin azaltılması, ulaşım araçlarının sayılarının azaltılması, atık yönetimi gibi birçok proje üzerinde çalışılmaktadır. Karbon ayak izi azaltımı ve sürdürülebilirliği

katkının artırılması için, özel projelerin üretildiği komite kurulması da ACA sertifikasyonu için önemli teşvik projelerinden biridir.

Hayata geçirilen tüketim tahmin modeli, aylık tüketim tahminleri yapmaktadır. Tüketim tahmini modeli, hibrit olması sebebi ile ilgili terminalde yapılacak olan enerji verimliliği iyileştirme projelerini de tüketim modelinde göz önüne alıyor olacaktır. Bu sebeple yapılan iyileştirmeler gelecek tahminlerine direk etkiliyor olup, bu etki göz önüne alınarak iyileştirme projelerinin önceliklendirilmesi için de birbirini besleyen devamlı bir döngü sağlanmış olacaktır.

5. REFERANSLAR

- [1] <https://www.usgbc.org/leed>, [Son Erişim Tarihi: 22.04.2024]
- [2] <https://breeam.com/>, [Son Erişim Tarihi: 01.03.2024]
- [3] <https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings>, [Son Erişim Tarihi: 15.05.2024]
- [4] <https://www.airportcarbonaccreditation.org/>, [Son Erişim Tarihi: 01.05.2024]
- [5] Natalia Shushunova, Liubov Lisienkova, Irina Mitrofanov, Rimma Karimova. Application of LEED Green Rating Systems in In-frastructure of Airport Complexes. 2023 February E3S Web of Conferences 371. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337106002>
- [6] Fesanghary, M.; Asadi, S.; Geem, Z.W. Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm. *Build. Environ.* 2012, 49, 245–250
- [7] Harish VSKV, Kumar A. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;56:1272–92. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>.
- [8] Kneifel J. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. *Energy Build* 2010;42:333–40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.011>.
- [9] Konis, K.; Gamas, A.; Kensek, K. Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. *Sol. Energy* 2016, 125, 161–179.
- [10] Lartigue, B.; Lasternas, B.; Loftness, V. Multi-objective optimization of building envelope for energy consumption and daylight. *Indoor Built Environ.* 2014, 23, 70–80.
- [11] Lin H-W, Hong T. On variations of space-heating energy use in office buildings. *Appl Energy* 2013;111:515–28. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.040>.
- [12] Méndez Echenagucia, T.; Capozzoli, A.; Cascone, Y.; Sassone, M. The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. *Appl. Energy* 2015, 154, 577–591.
- [13] Rahmani Asl, M.; Zarrinmehr, S.; Bergin, M.; Yan, W. BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization. *Energy Build.* 2015, 108, 401–412.
- [14] Ruparathna R, Hewage K, Sadiq R. Improving the energy efficiency of the existing building stock: a critical review of commercial and institutional buildings. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;53:1032–45. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.084>.
- [15] Santos-Herrero JM, Lopez-Guede JM, Flores I, Sala JM. An ongoing review on building energy efficiency improvement systems. Istanbul: IV European Conference on Renewable Energy Systems; 2016.
- [16] Susorova I, Tabibzadeh M, Rahman A, Clack HL, Elnimeiri M. The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings. *Energy Build* 2013;57:6–13. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.035>.
- [17] Toutou, A.; Fikry, M.; Mohamed, W. The parametric based optimization framework daylighting and energy performance in residential buildings in hot arid zone. *Alex. Eng. J.* 2018, 57, 3595–3608.

- [18] Tuhus-Dubrow, D.; Krarti, M. Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Build. Environ.* 2010, 45, 1574–1581.
- [19] Zhang, A.; Bokel, R.; van den Dobbelsteen, A.; Sun, Y.; Huang, Q.; Zhang, Q. Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China. *Energy Build.* 2017, 139, 371–384.



Akdeniz Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Akdeniz Mühendislik Dergisi

Akdeniz Journal of Engineering

CORRESPONDENCE ADDRESS | YAZIŞMA ADRESİ

*Akdeniz University – Faculty of Engineering
Dumlupınar Boulevard, Akdeniz University Campus
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE*

*Akdeniz Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi
Dumlupınar Bulvarı, Akdeniz Üniversitesi Yerleşkesi
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE*

E-MAIL | E-POSTA

journalofeng@akdeniz.edu.tr

WEB PAGE | WEB SAYFASI

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