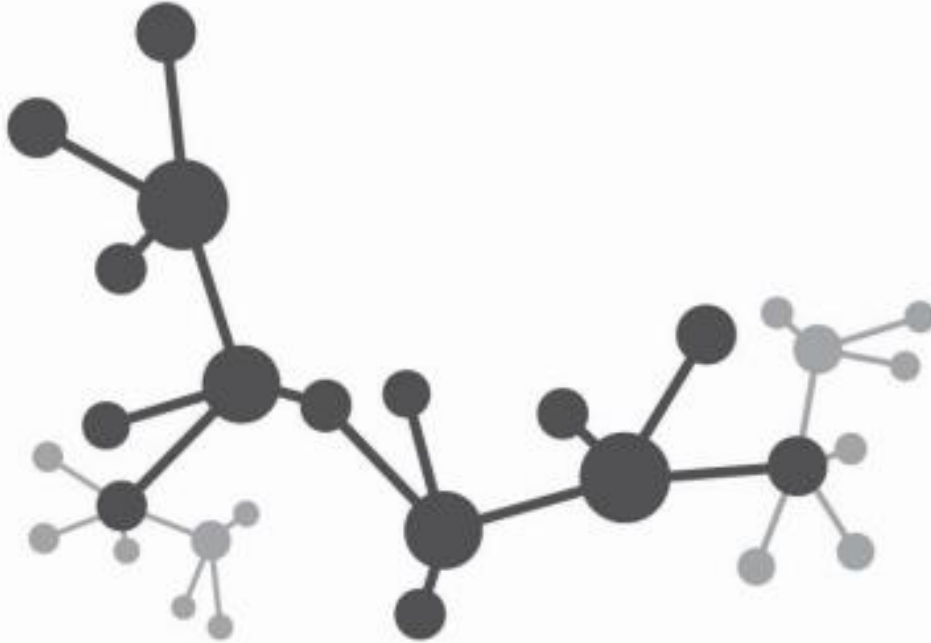




FEN BİLİMLERİ ENSTİTUSU DERGİSİ

Journal of Natural and Applied Sciences

aralık



Cilt: 28 Sayı: 03 Volume:28 Issue: 03 e-ISSN: 1308 6529

2024
ISPARTA



SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Cilt 28, Sayı 3, Yıl 2024

SÜLEYMAN DEMİREL UNIVERSITY
Journal of Natural and Applied Sciences

Volume 28, Issue 3, Year 2024

DERGİ HAKKINDA

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (SDÜ Fen Bil Enst Der), 1995 yılında kurulmuş bir bilimsel araştırma dergisidir. SDÜ Fen Bil Enst Der, 2001 yılından itibaren mühendislik ve mimarlık bilimleri, tarım ve orman bilimleri ve temel bilimler alanlarında düzenli olarak Nisan, Ağustos ve Aralık aylarında yılda üç sayı yayımlanan ulusal ve uluslararası hakemli-indeksli bir dergidir. Yayımlanmak üzere gönderilen bütün makaleler; hakemler ve editörler tarafından değerlendirilir. Makaleleri değerlendiren hakemlerin isimleri yazarlara bildirilmez. Dergide, Türkçe veya İngilizce dillerinde yazılmış orijinal araştırma makaleleri yayımlanmakta olup; teknik not, editöre mektup, tartışma, vaka takdimi ve derleme türünde bilimsel çalışmalar yayımlanmamaktadır. İngilizce dilinde yazılmış orijinal araştırma makaleleri yayımlanma önceliğine sahiptir. Dergiye yayımlanmak için gönderilen makalelerden herhangi bir değerlendirme ve başvuru ücreti alınmamaktadır.

ABOUT THE JOURNAL

Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences (SDU J Nat Appl Sci) is a scientific research journal founded in 1995. SDU J Nat Appl Sci is a national and international indexed journal with referees, which has been published in the areas of engineering and architecture sciences, agriculture and forestry sciences and fundamental sciences three times in a year including in April, August and December, regularly since 2001. Articles submitted to the journal for publication are evaluated by referees, editorial board and editor. Names of referees evaluating the articles aren't informed to the authors (Blind peer review). The full-length original research articles written in Turkish or English language are published, but technical notes, letters to the editors, expositions and surveys are not published in the journal. The full-length original scientific research articles written in English language have the priority of publication. The Journal of Natural and Applied Sciences does not charge any publication or processing fee.

SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

İMTİYAZ SAHİBİ

Mehmet SALTAN, Prof. Dr.
Süleyman Demirel Üniversitesi Adına (Rektör)

BAS EDİTÖR

Mert Şekerci, Doç. Dr.
Süleyman Demirel Üniversitesi

EDİTÖRLER

Mevlüt Ersoy, Doç. Dr.
Süleyman Demirel Üniversitesi

Buket Çapalı, Dr. Öğr. Üyesi
Süleyman Demirel Üniversitesi

ALAN EDİTÖRLERİ

Tahir Tilki, Prof. Dr.
Süleyman Demirel Üniversitesi

Abdullah Kaplan, Prof. Dr.
Süleyman Demirel Üniversitesi

Mehmet Gürdal, Prof. Dr.
Süleyman Demirel Üniversitesi

Ayşin Sev, Prof. Dr.
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

İsmail Serkan Üncü, Prof. Dr.
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

İrfan Kaymaz, Prof. Dr.
Erzurum Teknik Üniversitesi

Kübra Çamur, Prof. Dr.
Gazi Üniversitesi

Özgür Akkoyun, Prof. Dr.
Dicle Üniversitesi

Ramazan Şenol, Prof. Dr.
Isparta Uygulamalı Bilimler
Üniversitesi

Selda Tekin Özcan, Prof. Dr.
Süleyman Demirel Üniversitesi

Tendü Hilal Göktuğ, Prof. Dr.
Aydın Adnan Menderes Üniversitesi

Volkan Emre Uz, Prof. Dr.
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Alev Yüksel Aydar, Doç. Dr.
Manisa Celâl Bayar Üniversitesi

Ali Silahtar, Doç. Dr.
Sakarya Üniversitesi

Ceren Karaman, Doç. Dr.
Akdeniz Üniversitesi

Gizem Karakan Günaydın, Doç. Dr.
Pamukkale Üniversitesi

Gür Emre Güraksın, Doç. Dr.
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Hasan Özdoğan, Doç. Dr.
Antalya Bilim Üniversitesi

Murat Varol, Doç. Dr.
Akdeniz Üniversitesi

Yiğit Ali Üncü, Doç. Dr.
Akdeniz Üniversitesi

Yusuf Yılmaz, Dr. Öğr. Üyesi
Pamukkale Üniversitesi

DANIŞMA KURULU

A. K. M. Rezaur Rahman, Prof. Dr.
University of Chittagong, Bangladeş

Chris McMahon, Prof. Dr.
University of Bristol, Birleşik Krallık

Jameel-Un Nabi, Prof. Dr.
University of Wah, Pakistan

Jorge Manuel Cárdenas Callirgos, Prof. Dr.
Dr. Universidad Ricardo Palma, Peru

Masoumeh Malek, Prof. Dr.
University of Tehran, Iran

Mohammad Mursaleen, Prof. Dr.
Aligarh Muslim University, Hindistan

Panagiotis Kyratsis, Prof. Dr.
University of Western Macedonia,
Yunanistan

S. Abdul Mohiuddine, Prof. Dr.
King Abdulaziz University, Suudi Arabistan

Snežana M. Urošević, Prof. Dr.
University of Belgrade, Sırbistan

Stojan Radenović, Prof. Dr.
University of Belgrade, Sırbistan

Martin Bohner, Prof. Dr.
Missouri University of Science and
Technology, ABD

Vincenzo Salzano, Prof. Dr.
University of Szczecin, Polonya

Mohamed Belgaid, Prof. Dr.
University of Sciences and Technology
Houari Boumediene, Cezayir

Sabina Olaru, Dr.
National R&D Institute for Textiles and
Leather, Romanya

Sadaf Kayani, Doç. Dr.
Mohi-ud-din Islamic University,
Pakistan

Lucia Mele, Dr.
University of Naples Federico II, İtalya

Victor Surugiu, Doç. Dr.
Alexandru Ioan Cuza” University of Iaşi,
Romanya

TEKNİK EDİTÖRLER

Remzi Gürfidan, Dr.
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Hilal Kartal, Arş. Gör.
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Cem Deniz Kumral, Öğr. Gör.
Isparta Uygulamalı Bilimler
Üniversitesi

DİL EDİTÖRÜ

Nihan Erdemir, Doç. Dr.
Süleyman Demirel Üniversitesi

DERGİ SEKRETARYASI

Barış Sezgin, Dr. Arş. Gör.
Süleyman Demirel Üniversitesi

SÜLEYMAN DEMİREL UNIVERSITY JOURNAL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

PRIVILEGE OWNER

Mehmet SALTAN, Prof. Dr.
On Behalf of Süleyman Demirel University (President)

EDITOR IN CHIEF

Mert Şekerci, Assoc. Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

EDITORS

Mevlüt Ersoy, Assoc. Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

Buket Çapalı, Assist. Prof.
Süleyman Demirel University

SECTION EDITORS

Tahir Tilki, Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

Abdullah Kaplan, Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

Mehmet Gürdal, Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

Ayşin Sev, Prof. Dr.
Mimar Sinan Fine Arts University

İsmail Serkan Üncü, Prof. Dr.
Isparta University of Applied Sciences

İrfan Kaymaz, Prof. Dr.
Erzurum Technical University

Kübra Çamur, Prof. Dr.
Gazi University

Özgür Akkoyun, Prof. Dr.
Dicle University

Ramazan Şenol, Prof. Dr.
Isparta University of Applied Sciences

Selda Tekin Özcan, Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

Tendü Hilal Göktuğ, Prof. Dr.
Aydın Adnan Menderes University

Volkan Emre Uz, Prof. Dr.
Izmir Institute of Technology

Alev Yüksel Aydar, Assoc. Prof. Dr.
Manisa Celâl Bayar University

Ali Silahtar, Assoc. Prof. Dr.
Sakarya University

Ceren Karaman, Assoc. Prof. Dr.
Akdeniz University

Gizem Karakan Günaydin, Assoc. Prof. Dr.
Pamukkale University

Gür Emre Güraksın, Assoc. Prof. Dr.
Afyon Kocatepe University

Hasan Özdoğan, Assoc. Prof. Dr.
Antalya Science University

Murat Varol, Assoc. Prof. Dr.
Akdeniz University

Yiğit Ali Üncü, Assoc. Prof. Dr.
Akdeniz University

Yusuf Yılmaz, Dr.
Pamukkale University

ADVISORY BOARD

A. K. M. Rezaur Rahman, Prof. Dr.
University of Chittagong, Banglades

Jameel-Un Nabi, Prof. Dr.
University of Wah, Pakistan

Chris McMahon, Prof. Dr.
University of Bristol, United Kingdom

Jorge Manuel Cárdenas Callirgos, Prof. Dr.
Universidad Ricardo Palma, Peru

Masoumeh Malek, Prof. Dr.
University of Tehran, Iran

Mohammad Mursaleen, Prof. Dr.
Aligarh Muslim University, India

Panagiotis Kyratsis, Prof. Dr.
University of Western Macedonia, Greece

S. Abdul Mohiuddine, Prof. Dr.
King Abdulaziz University, Saudi Arabia

Snežana M. Urošević, Prof. Dr.
University of Belgrade, Serbia

Mohamed Belgaid, Prof. Dr.
University of Sciences and Technology
Houari Boumediene, Algeria

Martin Bohner, Prof. Dr.
Missouri University of Science and
Technology, ABD

Victor Surugiu, Assoc. Prof. Dr.
Alexandru Ioan Cuza” University of
Iaşi, Romania

Stojan Radenović, Prof. Dr.
University of Belgrade, Serbia

Sadaf Kayani, Assoc. Prof. Dr.
Mohi-ud-din Islamic University, Pakistan

Sabina Olaru, Dr.
National R&D Institute for Textiles and
Leather, Romania

Vincenzo Salzano, Prof. Dr.
University of Szczecin, Poland

Lucia Mele, Dr.
University of Naples Federico II, Italy

TECHNICAL EDITORS

Remzi Gürfidan, Dr.
Isparta University of Applied Sciences

Hilal Kartal, Res. Assist.
Afyon Kocatepe University

Cem Deniz Kumral, Lecturer
Isparta University Of Applied Sciences

LANGUAGE EDITOR

Nihan Erdemir, Assoc. Prof. Dr.
Süleyman Demirel University

SECRETARIAT

Barış Sezgin, Res. Assist.
Süleyman Demirel University

İÇİNDEKİLER / TABLE OF CONTENTS

Araştırma Makaleleri- Research Articles

Sayfa / Pages

- 1- Ağır Ticari Araç Kardan Mili Kayıcı Takım Uygulamasında Spline Temas Boyunun Optimize Edilmesi ve Doğrulanması 293-299
Optimizing and Verifying Spline Contact Length in Heavy Commercial Vehicle Driveshaft Slip Assembly
Mert Can Kahyalar, Onur Şen, Murat Özbakiş
- 2- Integrated Bioinformatic Approach for Precision Medicine: Prediction of Human GABRG2 Gene Pathogenic Variants, Characterized with Cellular Pathology and Epilepsy Phenotype Severity 300-315
Hassas Tıp için Bütünleşik Biyoinformatik Yaklaşım: İnsan GABRG2 Geninin Hücre Patolojisi ve Epilepsi Fenotip Şiddeti ile Karakterize Patolojik Varyantlarının Tahmini
Nabaa Khudhair Abdullah, Ayla Arslan
- 3- Assessing the Acoustic Comfort Conditions of a Historical Mosque: Pergamon Great Mosque..... 316-324
Tarihi Bir Caminin Akustik Konfor Koşullarının Değerlendirilmesi; Bergama Ulu Cami
Fatma Yelkenci Sert, Özgül Yılmaz Karaman
- 4- Craterellus cornucopioides Biyosorbantı ile Sulu Çözeltilerden Kongo Kırmızısı'nın Biyosorpsiyonu: Kinetik, İzotermal ve Termodinamik Çalışmalar 325-334
Biosorption of Congo Red from Aqueous Solutions by Craterellus cornucopioides Biosorbent: Kinetic, Isothermal and Thermodynamic Studies
Şirin Nuray Çakar, Aslı Göçenoğlu Sarıkaya, Bilgen Osman
- 5- Doğal Çevre Verilerinin Yüksek Yapılar Özelinde İrdelenmesi: Yaşayan Harika Burj Khalifa 335-347
Examination of Natural Environmental Data Specific to High-Rise Buildings: Living Wonder Burj Khalifa
Hatice Bal, Hale Demir Kayan
- 6- When Escitalopram is Surrounded by Ethanol: A DFT and QTAİM Approach to Analyze The Drug and The Alcohol Interactions and It's Possible Outcomes 348-357
Essitalopram Etanol ile Çevrelendiğinde: İlaç ve Alkolün Etkileşimlerini ve Olası Sonuçlarını Analiz Etmek için QTAİM ve DFT Yaklaşımı
Özge Bağlayan, Mustafa Kemal Karaman, Cemal Parlak, Özgür Alver
- 7- Türkiye'nin Üç Pilot İlde Çığ Tehlike ve Risk Analizleri: Bitlis, Van ve Antalya 358-370
Avalanche Hazard and Risk Analysis in Three Pilot Provinces of Türkiye: Case Studies from Bitlis, Van, and Antalya
Engin Yıldız, Zeliha Seleğ
- 8- Yapı Zemin Etkileşiminin Yığma Bir Minarenin Sismik Davranışına Etkisi 371-385
The Effect of Structure Soil Interaction on the Seismic Behavior of a Masonry Minaret
Elifnur Şakalak, Ali Ekber Sever, Pınar Usta Evcil
- 9- Potansiyometrik Tiyoosiyanat Tayini için Hazırlanan Yeni Bir Katı-Temaslı Nanokompozit Elektrot 386-399
A Novel Solid-Contact Nanocomposite Electrode Prepared For Potentiometric Determination Of Thiocyanate
Ummahan Aktas, Ayça Demirel Özel, Sezen İrem Aslaner, Serap Titretir Duran
- 10- Tatlı Su Kaynaklarında Temiz Enerji Üretimi için Eğirdir Gölü Üzerinde Hibrit Yüzer Enerji Santral Tasarımı Örneği ve GZFT Analizi 400-414
Hybrid Floating Power Plant Design Example and SWOT Analysis on Lake Eğirdir for Clean Energy Production in Fresh Water Resources
Büşra Cesur Durmaz, İbrahim Üçgöl
- 11- A Novel Method for Monitoring Notified Bodies Designated under The European Union Medical Device Regulation 415-421
Avrupa Birliği Tıbbi Cihaz Yönetmeliği Kapsamında Yetkilendirilen Onaylanmış Kuruluşların İzlenmesi için Yeni Bir Yöntem
Tuncay Bayrak
- 12- Şıkıştırılmış Kil Zeminlerin Şişme Basıncının Belirlenmesinde Bulanık Mantık Yaklaşımı 422-432
Fuzzy Logic Approach in Determining Swelling Pressure of Compacted Clay Soils
Ömür Çimen, S. Nilay Keskin
- 13- Çok Katmanlı Gömülü Arkeolojik Kalıntıların Araştırılmasında Elektrik Özdirenç Yöntemi: Aydın Küçüktepe Höyük Örneği 433-439
Electrical Resistivity Method in the Investigation of Multi-Layered Buried Archaeological Remains: Aydın Küçüktepe Höyük Example
Hasan Karaaslan
- 14- Karotis Sinüs Baroreseptörlerinin Kronik Uyarılmasının Arter Basıncı Üzerine Etkisinin Matematik Model Kullanılarak Analizi 440-459
Analysis of The Effect of Chronic Stimulation of Carotid Sinus Baroreceptor on Arterial Pressure by Using a Mathematical Model
Sibel Caymaz, Fatih Karaaslan
- 15- Triflorometil içeren Yeni Azo-İmin Bileşikleri: Sentezi, Karakterizasyonu, in silico ve in vitro Yöntemlerle Antioksidan Özelliklerinin Araştırılması 460-471
Novel Trifluoromethyl Containing Azo-Imin compounds: Synthesis, Characterization, and Investigation of Antioxidant Properties Using In Vitro and In Silico methods
Tolga Acar Yeşil
- 16- Schiff Bazlı İndazol Bileşiğinin Yapı Karakterizasyonu ve Kuramsal Hesaplamalarla İncelenmesi 472-482
Structure Characterization of Schiff-Based Indazole Compound and Investigation with Theoretical Calculations
Enis Güzel, Aliye Gediz Ertürk, Metin Yavuz
- 17- Bazı Solanaceae Familyası Üyelerinin Çimlenme ve Bitki Gelişimine Boya Atık Suyunun Etkileri 483-489

Effects of Dye Wastewater on Germination and Plant Development of Some Solanaceae Family Members
Ercan Çatak, Ferhan Korkmaz

- 18- Yaşam Çözümlemesinde ROC Eğrileri ve Bir Uygulama 490-503
ROC Curves in Survival Analysis and an Application
Şeyma Sertkaya, Duru Karasoy
- 19- Farklı Bakteri Yapıştırıcılarının Nohut (*Cicer arietinum* L.) Bitkisinde Nodülasyon ile Verim Performansına Etkileri 504-516
*Effects of Different Bacteria Adhesive Agent on Nodulation and Yield Performance in Chickpea Plant (*Cicer arietinum* L.)*
Muharrem Kaya, Aykut Şener, Cemile Tekeli
- 20- Tasarım Bürolarındaki Güdülenme Düzeylerinin Herzberg'in Çift Etmen Kuramı ile Değerlendirilmesi 517-536
Evaluation of Motivation in Design Offices with Herzberg's Two-Factor Theory
Melisa Özkan, Esin Kasapoğlu
- 21- Delineation of the Subsurface Structures in the Central Sumatra Basin (Indonesia) through Bouguer Gravity Data 537-542
Bouguer Gravite Verileriyle Orta Sumatra Havzasındaki (Endonezya) Yeraltı Yapılarının Belirlenmesi
Ezgi Erbek-Kıran, Fahmi Ainun Nadjib
- 22- Bazı Metal Oksitlerin Gama Absorpsiyon Özelliklerinin GEANT4-GATE Simülasyon ile Teorik İncelenmesi 543-550
Theoretical Investigation of Gamma Attenuation Properties of Some Metal Oxides with GEANT4-GATE Simulation
Arzu Coşkun, Hüseyin Topaklı
- 23- Bazı Bitki Uçucu Yağlarının Elma Yeşil Yaprakbiti *Aphis pomi* De Geer (Hemiptera: Aphididae)'ye Karşı İnsektisidal Etkilerinin Belirlenmesi 551-558
*Determination of the Insecticidal Activities of Some Plant Essential Oils Against Apple Green Aphid, *Aphis pomi* De Geer (Hemiptera: Aphididae)*
Hasan Bilgiç, Ali Kemal Birgücü
- 24- İnsansız Hava Aracı ile Yangın Bölgesinin Tespiti ve Müdahalesinin Yapay Zekâ ile Tahminlenmesi 559-569
Detection of Fire Zone by Unmanned Aerial Vehicle and Prediction of Fire Intervention with Artificial Intelligence
Mehmet Yücel, Bekir Aksoy
- 25- Investigation of Simple Shape Descriptors for NACA 4 Digit Airfoils..... 570-579
NACA 4 Kanat Profillerinin Basit Şekil Temsil Yöntemleriyle İncelenmesi
Haydar Tuna, Özcan Yırtıcı

Ağır Ticari Araç Kardan Mili Kayıcı Takım Uygulamasında Spline Temas Boyunun Optimize Edilmesi ve Doğrulanması

Mert Can KAHYALAR¹, Onur ŞEN², Murat ÖZBAKIŞ³

^{1,2,3}Tirsan Kardan San.ve Tic. A.Ş., Araştırma Geliştirme Merkezi, Manisa, Türkiye

(Alınış / Received: 14.11.2023, Kabul / Accepted: 16.09.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Kardan mili,
Kayıcı takım,
Optimizasyon,
Basınç,
Kesme gerilimi,
Spline,

Öz: Kardan millerinin yol koşullarına bağlı olarak açılmalı ve eksenel olmak üzere iki temel hareketi vardır. Açılmalı hareket üniversal mafsallar tarafından sağlanırken, eksenel hareket kayıcı takım tarafından sağlanır. Temel olarak, bir kayıcı takım, spline formları aracılığıyla birbirini kavrayan çatallı kayıcı mil ve kayıcı kovan olmak üzere iki parçadan oluşur. Motorlu aracın hareketi sırasında, kayıcı takım burulmaya maruz kalır. Burulma sırasında temas eden spline dişleri arasında basınç oluşumu meydana gelmektedir. Bu bağlamda, kayıcı takım tasarım sürecinde basınç ve gerilim dağılımı göz önüne alındığında spline formunun boyutu ve uzunluğu oldukça önemlidir. Çalışmada, kayıcı takımın yalnızca spline temas boyu değişimi sağlanarak dişler arasındaki basıncın analitik olarak hesaplanması sonucunda kayıcı takımın spline temas boyu optimize edilmiştir. Bu kapsamda, daha önce ortaya koyduğumuz bir çalışmada geçen ve sonlu elemanlar analizi (FEA) ile korele edilmiş olan spline dişlerinde kesme geriliminin analitik hesaplanması bu çalışmada da kullanılmıştır. Son olarak, optimize edilen spline boyuna sahip kayıcı takım laboratuvar ortamında statik burulma testine tabi tutulup, olumlu sonuçların alınmasıyla doğrulanmıştır. Kayıcı takım spline temas boyu optimizasyonu neticesinde (kayıcı kovan spline boyu değiştirilmeden) çatallı kayıcı milin spline boyunun azalması ile %6,1 seviyesinde ağırlık tasarrufu sağlanmıştır.

Optimizing and Verifying Spline Contact Length in Heavy Commercial Vehicle Driveshaft Slip Assembly

Keywords

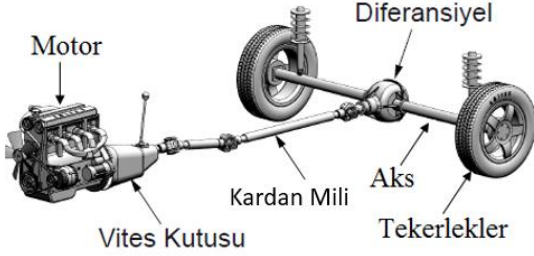
Cardan shaft,
Slip assembly,
Optimization,
Pressure,
Shear stress,
Spline,

Abstract: Driveshafts have two main movements, angular and axial, under road conditions. Angular movement is provided by universal joints while axial movement is provided by the sliding assy. A sliding assy includes a yoke shaft and a tube sleeve, which engage each other through spline forms. During the movement of the motor vehicle, the sliding assy is subjected to torsion. Pressure comes out between the spline teeth. In this context, the size and length of the spline form are important when considering the pressure and stress distribution in the design process of sliding assy. In the study, the spline contact length of the sliding assy was optimized by analytical calculation of the pressure between the teeth, by changing only the spline contact length. In this context, the analytical calculation of the shear stress on spline teeth, which was used in a previous study and correlated with finite element analysis (FEA), was also used here. Finally, the sliding assy with optimized spline length was subjected to static torsion test in the laboratory and confirmed by positive results. As a result of the spline contact length optimization (without changing the tube sleeve's parameter) of the sliding assy, a weight reduction of 6.1% was achieved by reducing the spline length of the yoke shaft.

*İlgili yazar: m.kahyalar@tirsankardan.com.tr

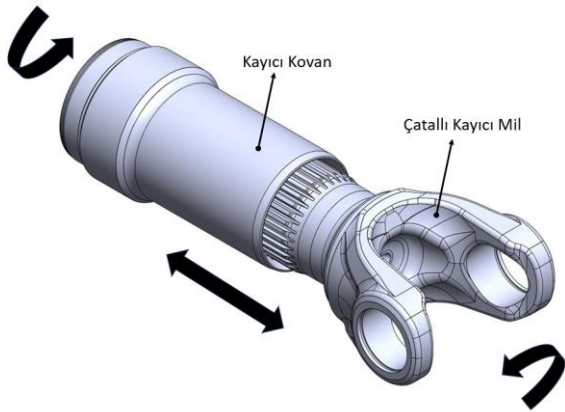
1. Giriş

Motorlu taşıtlarda motordan aldığı gücü tekerleklere ileten kardana mili, aktarma organlarındaki hayati unsurlardan biridir (Şekil 1).



Şekil 1. Kardan mili yerleşimi

Kardan millerinin yol koşullarına bağlı olarak açılabilir ve aksel olmak üzere iki temel hareketi vardır. Açılabilir hareket universal mafsallar tarafından sağlanırken, aksel hareket kayıcı takım tarafından sağlanır. Bu nedenle, kayıcı takım kardan milinin önemli bir parçasıdır. Temel olarak, bir kayıcı takım, spline formları aracılığıyla birbirine bağlanan çatallı kayıcı mil (pozitif spline) ve kayıcı kovan (negatif spline) olmak üzere iki parçadan oluşur (Şekil 2). Parçalar, spline formlarının bağlantı yüzeyleri sayesinde momentleri iletirken aksel olarak ileri-geri hareket edebilir. Bu sayede, yol koşullarına bağlı süspansiyon hareketiyle ortaya çıkan aktarma organlarının birbirine göre konum değişikliği kardan mili tarafından kompanse edilir. Bu kompanse hareketinde elbette kardan milinin açılabilir hareket yeteneği de önemlidir [1],[2].



Şekil 2. Kayıcı takım parçaları ve burulma momenti yönleri

Motorlu aracın hareketi sırasında, kardan mili üzerindeki diğer bileşenler gibi kayıcı takım da burulmaya maruz kalır. Burulma sırasında birbirine temas eden spline dişleri arasında basınç oluşumu meydana gelmektedir. Bu bağlamda, kayıcı takım tasarımı sürecinde spline dişleri üzerindeki basınç ve gerilim dağılımı için spline boyutu ve temas uzunluğu oldukça önemlidir.

Literatür araştırması sonucunda kayıcı takım ile ilgili çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Sınırlı sayıda bu çalışmalar incelendiğinde daha çok spline dişleri boyunca yük dağılımlarına odaklanıldığı görülmüştür. Literatürdeki bu çalışmalardan farklı olarak;

ŞEN ve arkadaşları bir kayıcı takımda spline modülü ve kayma uzunluğunun etkisini analitik ve sayısal yöntemlerle test etmişlerdir. Taksimat dairesi çapını sabit tutmak için modülü artırırken diş sayısını azaltmışlardır ve spline temas uzunluğunu değiştirerek modülün ve spline temas uzunluğunun kayıcı takımdaki dayanıma etkisini araştırmışlardır. Her modelin kesme gerilmesi analitik ve sayısal yöntemlerle hesaplanmıştır. Analitik ve sayısal yöntemlerin %1,53 - %1,60 hata yüzdesi ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle spline tasarımında analitik yöntemlerin sayısal yöntemlere göre daha pratik olduğu aktarılarak analitik yöntem önerilmiştir [3].

Curà ve arkadaşı Mura yapmış olduğu bir çalışmada, kayıcı takımlar için ideal ve yanlış hizalanmış durumlarda diş profilleri üzerine gelen bileşke yükün konumu sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Çıkan sonuçlar aksel basınç dağılımına göre değerlendirilmiştir. Her iki durum içinde farklı yüklem seviyeleri uygulanmıştır. İdeal hizalanmış durumda alınan sonuçlarda yüklem seviyesi arttıkça taksimat dairesi çapı ile bileşke kuvvet çapının arasındaki farkın arttığı ve bu farkın maksimum seviyede %1,6 olduğu ve aynı zamanda 0,08 mm'lik yanlış hizalama durumunda maksimum farkın %2,94 olduğu ortaya konulmuştur. Taksimat dairesine kuvvet uygulandığında ortaya çıkan rijitlik değeri ile gerçek bileşke kuvvetin konumuna kuvvet uygulandığında ortaya çıkan rijitlik değeri arasındaki farkın %15'e kadar çıktığı fark edilmiştir [4].

Hong ve arkadaşları bir çalışmada spline temas yüzeyleri boyunca yüzey basıncının değişimini incelemişlerdir. İnceleme, üç ayrı yüklem koşulu için oluşturulan modeller üzerinde ortaya konulmuştur. Düz ve helisel dişlilerin burulma momenti yüklemesi altında yük dağılımları karakterize edilmiştir. Burulma momenti yüklemesi ile aynı yönde helisel diş seçiminin, yük konsantrasyonunu azaltabildiği ve yük dağılımını iyileştirebildiği ortaya konulmuştur. Buna ilave olarak spline dişlerindeki indeksleme hatalarının etkileri, spline dişlerinde önemli derecede eşit olmayan yük paylaşımına neden olduğu ortaya konulmuştur [5].

Barrot ve arkadaşları tarafından ortaya konulmuş bir çalışmada ise, aksel moment transferinin spline üzerindeki etkisi analitik olarak gerçekleştirilmiştir. Kayıcı takımın spline diş dibinde maksimum kesme kuvveti dağılımı araştırılmış, maksimum sürtünme hasarının ve kontak yüzey basıncının dişli ekseninin

sonunda olduğu sonlu elemanlar ile kontrol edilmiştir. Kayıcı takımda spline formulu yuva üzerine uygun bir konumda eklenen yukarı ve aşağı yönlü kademelerin maksimum temas basıncını azalttığı ve sürtünme hasarının önemli ölçüde önüne geçilebileceğini sonlu elemanlar analizi ve analitik metotlar kullanılarak gösterilmiştir. Geliştirilen analitik metot sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırarak doğrulama yapılmıştır [6].

Tjernberg'e ait olan bir çalışmada, kayıcı takımın sonlu eleman analizi yapılmıştır. Gerilme faktörü hesaplanarak analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kayıcı takım üretiminde diş açma ve indüksiyon ile sertleştirme işlemleri sırasında dişler arasında meydana gelen düzensiz boşlukların dişlerin ömürlerini 1/3 - 1/2 oranında kısalttığı görülmüştür. Her bir diş üzerindeki yaklaşık yükü ve bağlı ömrü hesaplamak için basitleştirilmiş bir model oluşturulmuştur. Diş dibindeki maksimum kesme geriliminin ideal kesme gerilimine göre yaklaşık %26-%36 kadar fazla olduğu ve bu oranın etkiyen momente, diş boşluk hatalarına göre daha da artabileceği vurgulanmıştır. Aynı zamanda, hareketli frezeleme ile üretilen dişlinin, profil frezeleme ile üretilen dişliden %50 daha uzun ömürlü olduğunu da aktarılmıştır [7].

Chase ve arkadaşları yapmış olduğu bir çalışmada, üretimden kaynaklanan birbiri üzerinde çalışan diş çiftleri arasındaki farklı boşluk miktarlarının dişler üzerinde oluşturduğu farklı gerilim değerlerinin istatistiksel modelini ortaya koymuştur. Bu model yardımı ile belirli bir yük için devreye girecek ortalama diş sayısını tahmin edilmiştir. Ayrıca istatistiksel modeli yük uygulandığında dişlerin yük paylaşımını ve stres dayanımını tahmin edebilecek şekilde geliştirmişlerdir. Oluşturulan model geleneksel gerilim analizi ve sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanmıştır [8].

Daha önce gerçekleştirdiğimiz spline boyu ve modülünü konu alan çalışmada modül ve spline boyu kombinasyonuna bağlı olarak analitik ve sonlu elemanlar yöntemleri ile kayma gerilmeleri incelenmiş, en iyi kombinasyon tespit edilmiştir [9].

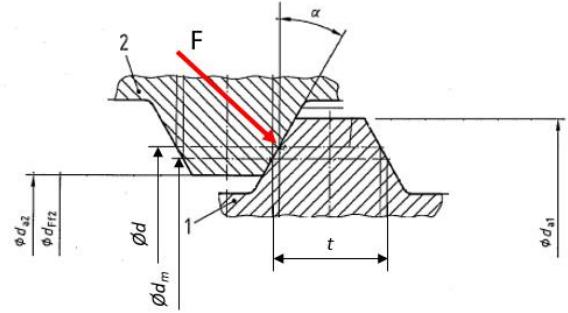
Literatürde yer alan yukarıdaki çalışmaların ötesinde bu çalışma ile, kayıcı takımın evolvent spline profiline ait modül, diş kalınlığı ve diş üstü çapı gibi temel parametreler değiştirilmeksizin sadece eş çalışan spline dişleri arasındaki temas boyu değişimi sağlanarak, dişler arasındaki temas ile oluşan basıncın analitik olarak hesaplanması sonucunda kayıcı takımın spline temas boyu optimize edilmiştir. Bununla birlikte kayma gerilmesi analitik ve sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek boy optimizasyonu doğrulanmıştır. Son olarak optimize edilmiş spline boyuna sahip kayıcı takım, laboratuvar koşullarında özel test cihazında statik burulma testine

tabi tutulmuş ve elde edilen olumlu sonuçlar neticesinde doğrulanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada kardan mili kayıcı takımında spline temas boyu değişiminin, spline dişleri üzerine gelen basınç değeri ile birlikte dayanıma olan etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, spline dişleri üzerine gelen yük ile kesme dayanımı da incelenmiştir.

Kardan mili kayıcı takımı şanzımandan aldığı devir ve gücü diferansiyele iletirken, birbiri ile kavrama halinde olan negatif ve pozitif formulu spline formlarının temas arayüzlerinde basınç meydana gelmektedir. Oluşan bu basıncın büyüklüğü spline boyutlarına bağlı olmakla birlikte aynı zamanda negatif ve pozitif formulu splinelerin temas etme mesafelerine -uzunluklarına- bağlıdır. Spline üzerinde oluşan basınç aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır. Şekil 3'te negatif ve pozitif formulu spline için birbirlerini kavradıkları pozisyon altında temel özellikleri gösterilmektedir.



Şekil 3. Kavrama halinde bulunan negatif ve pozitif formulu spline için temel özelliklerin gösterimleri (1 no'lu eleman pozitif dişli çatalı kayıcı mil, 2 no'lu eleman negatif dişli kayıcı)

$$P = \frac{F}{d_m \times A} \quad (1)$$

$$d_m = m \times z \times \cos(\alpha) \quad (2)$$

$$d = m \times z \quad (3)$$

$$A = L_e \times \frac{(da_1 - da_2 - 2 \times r)}{2} \times \frac{1}{\cos(\alpha)} \times z \quad (4)$$

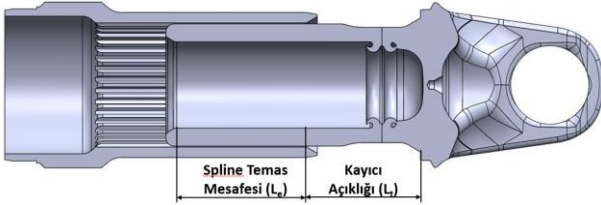
Temel mukavemet formüllerinden yararlanılarak elde edilen denklemde kuvvet F, temel dairesi çapı d_m ve alan A kullanılmıştır. Buradan açılım yapıldığında alt formül elde edilmiştir. d_m ve d formülleri DIN 5480'de yer alan formüllerdir [10].

$$P = \frac{2 \times M \times 1000}{d \times L_e \times \frac{da_1 - da_2 - 2 \times r}{2} \times z} \quad (5)$$

$$P_{em} \geq P \quad (6)$$

$$s = \frac{P_{em}}{P} \quad (7)$$

Yüzey basıncını veren yukarıdaki formülde çatalı kayıcı mil spline diş üstü çapı da1, negatif formlu spline için diş üstü çapı da2, Naylon 11 (Pa 11) kaplama kalınlığı r, diş sayısı z, bölüm dairesi çapı d, moment M ve spline temas mesafesinin Le yer almaktadır. Şekil 4 de spline temas mesafesi gösterilmiştir. Spline boyutları DIN 5480 standardından belirlenmiş olup [9], kayıcı kovan spline bölgesine korozyon direncinin artırılması ve sürtünme katsayısının azaltılması amacıyla toz halde bulunan Naylon 11 (Pa 11) kaplanmıştır. Bu nedenle dişlere gelecek basınç değerinin Naylon 11 (Pa 11) yüzey kaplamasına zarar verip vermediği kontrol edilmelidir. Bu amaçla emniyetli basınç değeri Pem olarak 90 MPa göz önüne alınmıştır. Spline boyu optimizasyonu kapsamında, spline özellikleri aynı tutularak spline temas mesafesi kısaltılmış ve bu durumda oluşan yüzey basınç değerleri Naylon 11 (Pa 11) kaplama malzemesinin emniyeti basınç değeri ile kıyaslanmıştır.



Şekil 4. Spline temas mesafesi (Le) ve kayıcı açıklığı (Lt)

Optimizasyon çalışmasında, yüzey basıncının yanısıra spline kesme dayanımı da aşağıdaki eşitlik kullanılarak incelenmiştir.

$$S_s = \frac{4 \times M \times K_a \times K_m}{d \times z \times L_e \times t \times K_f} \quad (8)$$

Eşitliğe göre, spine kesme dayanımı, uygulanan moment değeri M, diş birleşimlerinin maksimum moment kapasitesini belirlemek için kullanılan uygulama faktörü Ka, dişler üzerine etkiyen yüklerin dağılımlarını belirlemek için kullanılan yük dağılım faktörü Km, bölüm dairesi çapı d, diş sayısı z, temas mesafesi Le, diş kalınlığı t ve dişler için yorulma ömrünü içeren yorulma ömür faktörü Kf değerleri girilerek hesaplanmıştır [11]. Hesaplanan değerler pozitif formülü spline için malzeme kesme mukavemet τ değeri ile kıyaslanmıştır. Ka, Km ve Kf faktörleri Dudley faktörleri olarak bilinmektedir [12]. Ka faktörü diş birleşimlerinin maksimum moment kapasitesini belirlemek için kullanılan boyutsuz bir faktördür.

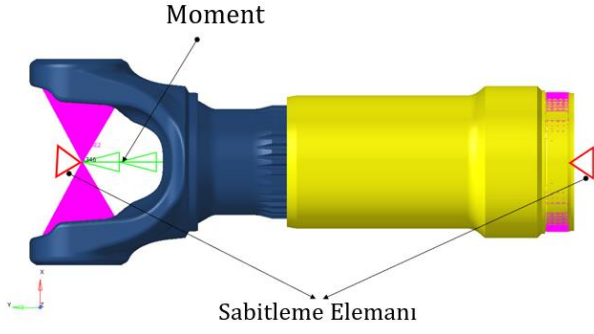
Yükleme türünün darbe miktarına ve güç kaynağının darbe miktarına göre değişiklik gösterir. Km faktörü dişler üzerine etkiyen yüklerin dağılımlarını belirlemek için kullanılan bir parametredir. Dişler arasındaki yük paylaşımını hesaplamak için kullanılır. Km yük dağıtım faktörü değerleri, yanlış hizalama miktarına bağlıdır. Kf faktörü ise dişler için yorulma ömrünü içeren boyutsuz bir katsayıdır. Kf değerini belirlemede kullanılan moment çevrimi, devir sayısından değil bir başlatma ve bir durdurmadan oluşmaktadır. Km, Kf ve Ka faktörleri Şen ve Kahyaların çalışmalarında sanal analizler ve fiziki testler ile doğrulanmış katsayılar seçilmiştir [3].

Pozitif formülü spline içeren çatalı kayıcı mil isimli parçanın mazlemesi DIN 42CrMoS4 olarak seçilmiştir. Malzemeye ait mekanik özellikler de Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Çatalı kayıcı mile ait mekanik dayanımlar

Parametre	Değer	Birim
Re	750	N/mm ² (min)
Rm	1000 1200	N/mm ²
A	11	min.%

Analitik hesaplamalar sonrasında kayıcı takım parçaları sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Solidworks 2021 tasarım programında tasarlanmış, araç altındaki çalışma açıklığına getirilen kayıcı takım modeli Hyperworks 2021 sonlu elemanlar analizi programına aktarılmıştır. Aktarılan model üzerine Kahyalar ve Şen tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada fiziki numuneler ile doğrulanmış olan 1 mm büyüklüğünde R trias 3D mesh uygulanmıştır [13]. Akabinde sınır şartları tanımlanmış ve kayıcı kovan kaynak bölgesi bir boyutlu rijit elemanlar ile bağlanmıştır. Sınır şartlarında kayıcı kovanın kaynak bölgesindeki rijit elemanların orta noktasına dönme ve öteleme izin verilmeyecek şekilde sabitleme elemanı tanımlanırken, çatalı kayıcı mil kulak arasında bulunan rijit elemanların orta noktasına parça eksenine göre dönmeye ve öteleme izin verecek şekilde, ancak diğer eksenlerde izin vermeyecek şekilde sabitleme elemanı tanımlanmıştır. Yine 25.000 Nm olarak uygulanacak moment çatalı kayıcı mil kulakları arasındaki rijit elemanların ortasına verilmiştir. Kayıcı kovan ve çatalı kayıcı mil splinelarının arasına slide kontakt tanımlaması yapılmıştır. Malzeme tanımlaması yapılarak Optistruct çözücüsünde çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurulan analitik model Şekil 5'te gösterilmiştir. Çözüm sonrası değerler shear stress olarak okunmuştur. Çıkan sonuçlar hesaplanan değerler ile kıyaslanmıştır.



Şekil 5. Sonlu elemanlar analizi yönteminde model kurulumu

Optimum tasarım için öncelikli olarak spline temasına bağlı basınç hesaplaması gerçekleştirilmiş, akabinde kesme dayanımı ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak optimum yapı elde edilmiştir.

3. Bulgular

Yapılan basınç hesaplarında kullanılan değerler Tablo 2'de, kayıcı açıklığına bağlı temas mesafeleri ise Tablo 3'te belirtilmiştir. Belirtilen değerlerle yapılan hesaplamalar sonucunda emniyet katsayısı, kayıcı takımın araç altında çalışma pozisyonunda (55 mm kayıcı açıklığı) mevcut tasarım için 1,3, optimize edilmiş tasarım için ise 1,1 olarak hesaplanmıştır. Kayıcının pozisyonuna bağlı olarak basınç dağılımları Tablo 4'te, emniyet katsayıları Şekil 6'da gösterilmektedir. Spline temas boyunun artması sonucunda emniyet katsayısında artış gözlemlenmiştir.

Tablo 2. Spline temasına bağlı basınç hesaplama parametreleri

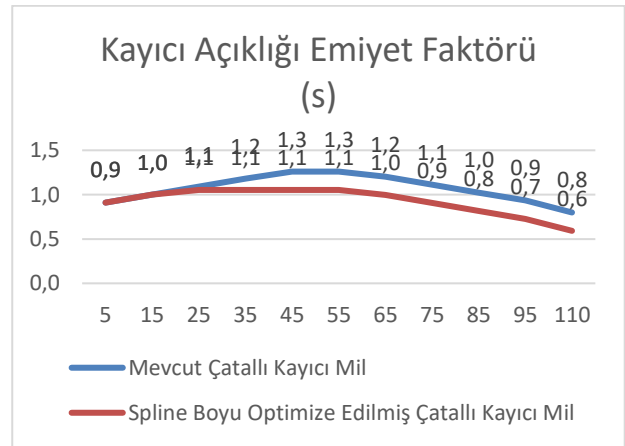
Parametre	Büyükük	Birim
P_{em}	90	[MPa]
M	25.000	[Nm]
da_1	89,28	[mm]
da_2	85,22	[mm]
m	2,5	-
r	0,3	[mm]
d	85	[mm]
a	30	[°]
z	34	-

Tablo 3. Basınç hesaplamaları için spline temas boyları (Le)

Kayıcı Açıklığı [mm]	Mevcut Tasarım	Spline Boyu Optimize Edilmiş Tasarım
5	101	101
15	111	111
25	121	117
35	131	117
45	140	117
55	140	117
65	134	111
75	124	101
85	114	91
95	104	81
110	89	66

Tablo 4. Spline temasına bağlı yüzey basınçları (P) [MPa]

Kayıcı Açıklığı (Lt) [mm]	Mevcut Tasarım	Spline Boyu Optimize Edilmiş Tasarım
5	99	99
15	90	90
25	82	85
35	76	85
45	71	85
55	71	85
65	75	90
75	81	99
85	88	110
95	96	124



Şekil 6. Kayıcı açıklığına bağlı basınç emniyet faktörleri

Kayıcı kovan boyu değiştirilmeden çatallı kayıcı mil spline boyu 24 mm kısaltılarak emniyet katsayısının 1,1 olması durumunda çatallı kayıcı milde %6,1 hafifleme sağlanmıştır.

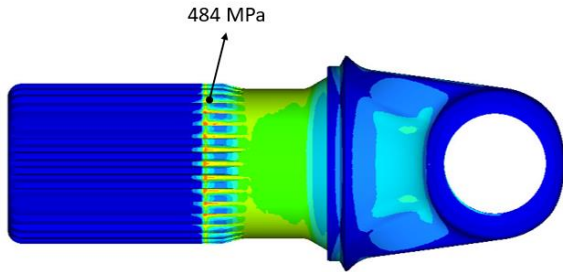
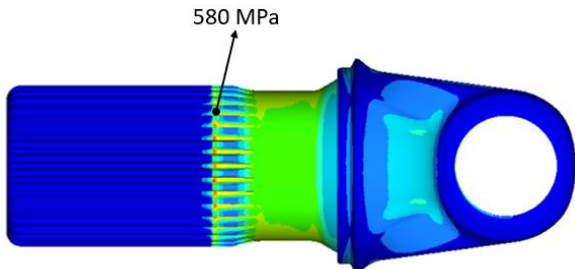
Yapılan kesme dayanım hesabında kullanılan değerler Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Spline kesme dayanımı hesabı parametreleri

Parametreler	Mevcut Çatallı Kayıcı Mil	Spline Boyu Optimize Edilmiş Çatallı Kayıcı Mil	Birim
m	2,5	2,5	-
z	34	34	-
t	2,61	2,61	[mm]
Le	139	115	[mm]
M	25.000	25.000	[Nm]
Ka	2	2	-
Km	1	1	-
Kf	0,4	0,4	-

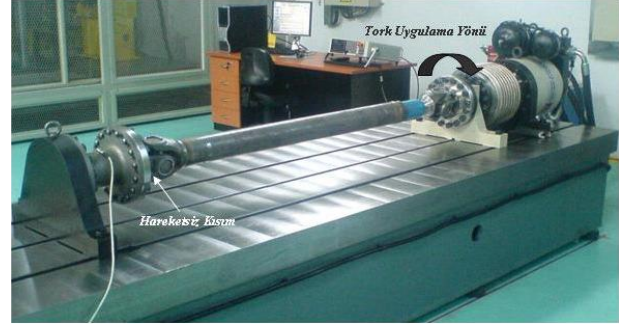
Belirtilen değerler ile yapılan hesaplamalar sonucunda kayıcı takımın araç altında çalışma pozisyonunda (55 mm kayıcı açıklığı) mevcut durumdaki çatallı kayıcı mil üzerine gelen kesme gerilmesi 476 MPa olarak bulunmuştur. Optimize edilmiş kayıcı takım için ise çatallı kayıcı mil üzerindeki kesme gerilmesi 575 MPa olarak elde edilmiştir.

Kesme gerilmesi sonlu elemanlar analizinde ise, mevcut tasarım için Şekil 7'de gösterildiği gibi 484 MPa, optimize edilmiş kayıcı takım için Şekil 8'de gösterildiği gibi 580 MPa olarak bulunmuştur.

**Şekil 7.** Mevcut tasarımda kayıcı takımın araç altında çalışma pozisyonu için çatallı kayıcı milde FEA kesme gerilmesi**Şekil 8.** Optimize tasarımda kayıcı takımın araç altında çalışma pozisyonu için, çatallı kayıcı milde FEA kesme gerilmesi

Şekil 9 da gösterilen Statik burulma test düzeneğinde, 25.000 Nm JAEL (Johnson apparent elastic limit) değerinden büyük sonuç verme koşulu altında

gerçekleştirilen statik burulma testleri sonucunda herhangi bir çatallı kayıcı mil kırılması gerçekleşmemiştir. JAEL ile ifadesi "Johnson apparent elastic limit" olup, akma dayanımının bir ifadesidir.

**Şekil 9.** Statik burulma test düzeneği

4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan çalışma sonucunda;

- Kayıcı takımın spline temas mesafesine bağlı basınç hesaplamaları sonucunda emniyet katsayısında değer düşüşü, bununla birlikte sonlu elemanlar analizi ve kesme dayanımı değerlerinde düşüş olsa da test sonuçlarına bakıldığında kırılma gözlemlenmemiştir. Bu durum nümerik ve analitik yöntemlerin, fiziksel laboratuvar testlerine -statik burulma- göre tasarımı daha emniyetli tarafta tutacak şekilde sonuçlar verdiğini göstermektedir.

- Spline temas mesafesinin optimizasyonunda, laboratuvar testleri yerine nümerik ve analitik yöntemlerin yeterli olduğu görülmüş olup, zaman ve test maliyetleri göz önüne alındığında kullanımları tavsiye edilmektedir.

- Kayıcı takımın spline özellikleri ve kayıcı kovan spline uzunluğu değiştirilmeden kayıcı takım spline temas boyunun optimize edilmesi sonucunda çatallı kayıcı milde %6,1 ağırlık avantajı sağlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma için Tirsan Kardan A.Ş. Ar-Ge Merkezi'nin verdiği desteklerden dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Amold, O.B., Platek, V. 1991. Universal Joints and Driveshafts Design Manual. 2nd, The society of Automotive Engineers, ABD.

- [2] Seherr-Thoss, H.C., Schmelz, F., Aucktor, E. Universal Joints and Driveshafts. Analysis, Design, Applications. İkinci baskı. London,England.
- [3] Sen, O., Kahyalar, M.C., Özgürler, H. 2022. Investigation of The Effect of Design Variables on Slip Assembly: Spline Module and Slip Length. Sakarya University Journal of Science, 26(3), 459-465.
- [4] CURÀ, F., MURA, A. 2014. Analysis of a Load Application Point in Spline Coupling Teeth. Journal of Zhejiang University-Science, 15(4), 302-308.
- [5] Hong, J., Talbot, D., Kahraman, A. 2014. Load Distribution Analysis Of Clearance-Fit Spline Joints Using Finite Elements. Mechanism and Machine Theory, 74, 42-57.
- [6] Barrot, A., Paredes, M., Sartor, M. 2009. Extended equations of load distribution in the axial direction in a spline coupling. Engineering Failure Analysis, 16, 200–211.
- [7] Tjernberg, U.A. 2001. Load distribution and pitch errors in a spline coupling. Materials and Design, 22, 259-266.
- [8] Chase, K.W., Sorensen, C.D., DeCaires, B. Variation 2010. Analysis of Tooth Engagement and Load Sharing in Involute Splines. American Gear Manufactures Association, Alexandria, ABD, Haziran.
- [9] Şen, O., Kahyalar, M. C., Özgürler, H. 2022. Investigation of the effect of design variables on slip assembly: Spline module and slip length. Sakarya University Journal of Science, 26(3), 459-465.
- [10] Involute splines based on reference diameters – Part 2: Nominal and inspection dimensions. DIN 5480 -2.
- [11] Oberg, E., Jones, F.D., Horton, H.L., Ryffel, H. The Machinery's Handbook. 2012. 29th Ed. INDUSTRIAL PRESS Inc, New York, ABD.
- [12] Dudley D.W. When Spline Need Stress Control. General Electric Co, Lynn, Mass.
- [13] Kahyalar, M.C., Sen O, Nayir T. 2021. Determination and comparison of the strength of the universal joint on driveshaft for various torque values, by finite element analysis and analytical method. International Journal of Technological Sciences, 13(2), 57-61.

Integrated Bioinformatic Approach for Precision Medicine: Prediction of Human GABRG2 Gene Pathogenic Variants, Characterized with Cellular Pathology and Epilepsy Phenotype Severity

Nabaa Khudhair ABDULLAH¹, Ayla ARSLAN^{2*}

¹ Üsküdar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 34662, İstanbul, Türkiye

² Üsküdar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, 34662 İstanbul, Türkiye

(Alınış / Received: 22.11.2023, Kabul / Accepted: 30.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Keywords

GABA (A) receptor
Gamma-2 subunit
Epilepsy
Precision medicine
Pathogenic variant
In silico

Abstract: Encoding for the $\gamma 2$ subunit of inhibitory GABA (A) receptors, GABRG2 gene expression is widespread in the brain including cortex, hippocampus, cerebellum and nuclei of brainstem. Pathogenic variants of GABRG2 have been associated with epilepsy syndromes however, the difficulty in interpreting GABRG2 variants of unknown significance hinders the advancement of epilepsy precision medicine. Using computer algorithms, our study focused on 156 GABRG2 variants of unknown significance from ClinVar database, predicting 10 highly pathogenic variants within the $\gamma 2$ ($\gamma 2S$ isoform) subunit. Integration with patient mutations and mutagenesis studies locates these variants within 'epileptogenic structural cassettes' of the $\gamma 2$ subunit, aiding characterization of phenotype severity and cellular pathology. Our results predict milder phenotypes for N-terminus extracellular domain variants (S155F, C190F, M199T) and more severe phenotypes for transmembrane domain variants (Y280D, G308D, T310I, T314K, T317S, C342Y, Y460C), linked to cellular pathology with reduced cell surface expression and reduced cell current. Notably, 4 transmembrane domain variants (G308D, T310I, T314K, T317S in the receptor's pore-lining M2 region) may distort channel conductance. Our research aligns with ACMG/AMP criteria PP3.

Hassas Tıp için Bütünleşik Biyoinformatik Yaklaşım: İnsan GABRG2 Geninin Hücre Patolojisi ve Epilepsi Fenotip Şiddeti ile Karakterize Patojenik Varyantlarının Tahmini

Anahtar Kelimeler

GABA (A) reseptörü,
Gama-2 alt birimi,
Epilepsi
Hassas Tıp,
Patojenik varyant,
In silico

Öz: GABA(A) reseptörlerinin $\gamma 2$ alt birimini kodlayan GABRG2 geninin ifadesi, korteks, hipokampus, serebellum ve beyin sapı çekirdekleri dahil olmak üzere beyinde geniş bir alana yayılmıştır. GABRG2 geninin patojenik varyantları epilepsi sendromları ile ilişkilendirilmiştir, ancak bilinmeyen öneme sahip GABRG2 varyantlarını yorumlamanın zorluğu, epilepsiye yönelik hassas tıbbın ilerlemesini engel teşkil etmektedir. Bilgisayar algoritmaları kullanılarak yapılan çalışmamızda, ClinVar veritabanındaki klinik önemi bilinmeyen 156 GABRG2 geni varyantına odaklanıldı ve $\gamma 2$ ($\gamma 2S$ izoformu) alt biriminde bulunan 10 varyant patojenik olarak tahmin edildi. Hasta mutasyonları ve mutagenез çalışmalarıyla entegrasyon sonucunda varyantların $\gamma 2$ alt biriminde 'epileptojenik yapısal kasetler' içinde konumlandırılmasıyla, fenotip şiddeti ve hücresel patoloji karakterize edildi. 3 tane N-terminus ekstrasellüler bölge varyantı (S155F, C190F, M199T), az şiddetli ve 7 tane transmembran bölge varyantı (Y280D, G308D, T310I, T314K, T317S, C342Y, Y460C) daha şiddetli epilepsi fenotipleri ile beraber azalmış hücre yüzeyi ifadesi ve azalmış hücresel akımla bağlantılı olarak öngörüldü. Özellikle, 4 transmembran bölge varyantının (Reseptörün kanal poruna katkıda bulunan M2 bölgesindeki G308D, T310I, T314K, T317S) kanal iletkenliğini bozabileceği belirlendi. Araştırmamız, ACMG/AMP kriterlerinden PP3 ile uyumludur.

* Corresponding author: ayla.arslan@uskudar.edu.tr

1. Introduction

Critical for the regulation of spike timing and modulation of neuronal rhythms, GABAergic interneurons appear to have an important role in brain information processing [1–4]. This depends on the precise matching of input signals from the diverse repertoire of GABAergic interneurons, with their molecular counterparts, the Gamma-Aminobutyric acid type A receptors (GABA_ARs)[5–9], located in distinct zones of the postsynaptic and extrasynaptic membrane [10–14]. This differential localization, along with other diverse features of receptor subtypes have specific physiological functions important during health and disease [15–20]. Thus, any alteration in the assembly, trafficking and cell surface expression of GABA_ARs may cause the deterioration of the GABAergic process, posing a risk for a wide variety of psychiatric and neurological disorders [13,21–26], including epilepsy[27], a complex neurological condition characterized by recurrent unprovoked seizures [28].

Assembled from a large subunit pool (α 1-6, β 1-3, γ 1-3, δ , ϵ , θ , π , ρ 1-3), GABA_ARs are GABA gated heteropentameric chloride channels and primary sites for brain inhibition[21]. They are composed of five subunits, with the prevalent subtypes typically consisting of two α subunits, two β subunits, and one γ 2 subunit [21]. In recent years, advancements in cryo-electron microscopy (cryo-EM) have driven a series of breakthroughs in the structural biology of GABA_ARs [16,29–35]. The receptor has a cylindrical shape, formed by the spatial arrangement of subunits such as β - α - β - α - γ in the counter-clockwise direction when observed from the extracellular space [22]. Of particular significance is the human γ 2 subunit [37–39], which is encoded by the GABRG2 gene located on chromosome 5q34 [21]. The γ 2 subunit containing receptors mediate fast phasic inhibition [15]. This subunit exhibits significant expression in both developing and mature brain and about 60% of all GABA_ARs coassembly constitutes the γ 2 subunit [40]. Studies of heterozygous γ 2 knockout mice have shown a 25% reduction in γ 2 subunits in the cerebral cortex, hippocampus, and thalamus, accompanied by decreased clustering of GABA_ARs and increased anxiety [41]. In addition, these mice display absence-like spike-wave discharges, mild epilepsy, and altered biogenesis of the remaining wild-type γ 2 subunits [42–44]. The γ 2 subunit plays vital roles in various aspects of GABA_AR function, such as clustering, synaptic maintenance, and current kinetics [37–39,45,46]. Indeed, via specific subunits GABA_ARs have specific assembly rules, membrane localization, receptor clustering, pharmacology and plasticity [47–52,37,38,53–55,36,56]. These properties may be altered by numerous inherited or de novo mutations, which have been discovered in genes encoding the GABA_AR subunits, including the GABRG2 gene, associated with a wide range of epilepsy conditions

manifesting mild to severe phenotypic features [57–62,26,63]. By binding at the specific sites located in the GABA_ARs subunit domains or subunit interfaces, many clinical central nervous system (CNS) drugs function by enhancing GABA_AR mediated inhibition[56]. For instance, Phenobarbital has been used to treat epilepsy for more than 100 years[64,65]. Phenobarbital binds to the γ - β interface and α - β interface[66].

Genetic testing is an integral component of epilepsy diagnosis [67,68]. However, in recent years, the genetic testing performed by next generation sequencing has led to the accumulation of variants of unknown significance (VUS), necessitating their interpretation [69]. Consequently, American College of Medical Genetics and Genomics (ACMG) and Association for Molecular Pathology (AMP) have established a framework for interpreting the clinical significance of genetic variants [70]. This framework categorizes the variants as “Pathogenic”, “Likely pathogenic”, “Uncertain significance” “Benign”, or “Likely benign” [70]. According to this framework, in silico methods, which use computational predictions to assess variant effects, are considered as supporting evidence for pathogenicity, corresponding to criterion PP3 [70]. Accumulating literature show successful integration of VUS, interpreted as damaging or deleterious by in silico methods [71,72], into the system of epilepsy diagnosis and management [68,72–74]. Given the importance of the GABRG2 gene variants described so far, this study specifically focuses on the comprehensive in silico analysis of the VUS detected in the coding region of the γ 2 subunit. Through this analysis, the potential impact of these VUS on protein structure and function is assessed and elaborated through the integration with the data from the epilepsy patient mutations.

2. Material and Method

Methods are given in the **Appendix A**.

3. Results

3.1. Workflow

The structured analysis comprises several steps as detailed in **Figure 1**. Initially, GABRG2 variants were accessed from NCBI ClinVar database [75]. These variants underwent comprehensive assessment using a set of algorithms, namely SIFT[76], PANTHER [77], Polyphen-2 [78], PhD-SNP [79], and SNPs&GO [80]. These algorithms utilized a homology based analysis (expect for the PolyPhen2, which is based on both sequence and structural parameters)[71]. Following this, functional and stability analysis was performed with the help of MutPred2 [81] and I-Mutant 2.0 [82]. Evolutionary conservation scores were obtained via ConSurf algorithm [83–85] to gauge residue importance leading to the selection of 20 VUS, which

were then subjected to three-dimensional (3D) structural modeling for validation. The results (10 variants) were integrated with structural, functional data, in addition to epilepsy patient data from the literature.

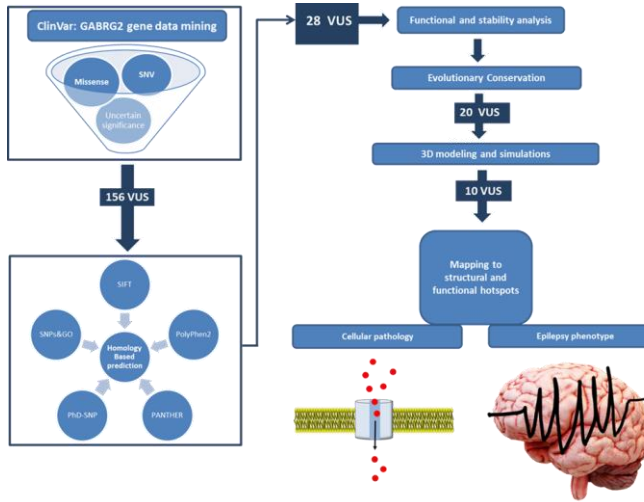


Figure 1. The general overview of the study.

3.2. Data mining

The variant data of GABRG2 transcript variant 2, encoding for the shorter isoform of the $\gamma 2S$ were classified according to classification criteria of ClinVar database [75]. This classification is based on the ACMG/AMP variant classification system [70] and other standards (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/clinvar/docs/clinsig/#standard> accessed 10.07.2024). As seen in the Figure 2.A, a total of 588 GABRG2 variants are classified according to “Clinical significance”, “Molecular consequence”, and “Variation type”. Among them, 494 are “Single Nucleotide Variants”, and the rest include “Deletions” (64), “Duplications” (28), and “Insertions” (14). In terms of “Molecular consequence”, there are 207 variants in untranslated regions or “UTRs”, 24 are “Nonsense” variants, 18 are “Splice site” and 16 are “Frameshift”. Almost half of the variants are missense (494) among the all variants (45 %, Figure 2.B). In the category of “Clinical significance”, there are 156 “Missense” variants with “Uncertain significance” (VUS), as well as 14 variants, categorized as “Likely benign”, 5 “Benign” variants, 12 “Pathogenic” variants, 16 “Likely pathogenic” variants, and 15 variants with “Conflicting interpretations” as shown in Figure 2.B.

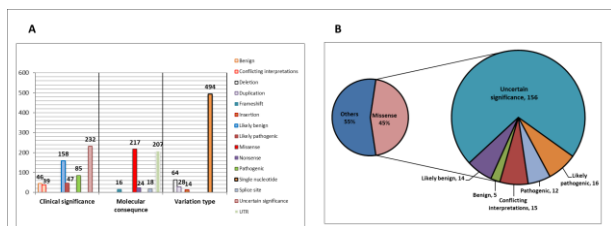


Figure 2. Profile of GABRG2 gene variants (A) Classification of GABRG2 variants according to three

categories: “Clinical significance”, “Molecular consequence” and “Variation type”. (B) The categorization of missense variants, which constitute 45% of all GABRG2 variants, is based on their “Clinical significance”, namely “Uncertain significance”, “Likely benign”, “Benign”, “Likely pathogenic”, “Pathogenic”, and ‘Conflicting interpretation’.

3.3. Homology-based prediction of pathogenicity for GABRG2 variants

The 156 GABRG2 VUS (Appendix B, ClinVar) were evaluated using SIFT [76], PolyPhen-2 [86], PANTHER [77], PhD-SNP [79], and SNPs&GO [80]. (SIFT found 80 deleterious variants with a score ≤ 0.05 , while PolyPhen-2 marked 66 as probably damaging (scores close to 1). PANTHER [77] identified 126 as Likely damaging based on evolutionary conservation. PhD-SNPs [79] predicted 84 as Disease, and SNPs&GO labeled 57 as Disease. SNPs&GO had the highest number of Benign predictions (98), followed by SIFT (76), PhD-SNP (72), and PolyPhen2 (60). Additionally, PANTHER [77] and PolyPhen2 [86] identified 30 and 29 Likely pathogenic variants, respectively. It is important to note that the variant classification terms used in the prediction tools are dissimilar and do not correspond to the terms of 5-tier ACMG system [70]. For instance “Pathogenic” which is the classification category in ClinVar

(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/clinvar/docs/clinsig/#standard> accessed 12.07.2024) is based on ACMG system [70]. It represents clinically validated category with comprehensive evidence and may be used for direct medical decision-making. For clarity, this and other ClinVar variant classification categories are shown with double quotation marks (“...”) in the entire manuscript. However when a prediction tool classifies a variant as ‘Pathogenic’, ‘Disease’, ‘Damaging’, or ‘Deleterious’, it is an algorithm-based prediction suggesting potential harm, requires further validation by additional evidence and clinical correlation to be used in decision-making. Therefore, in this manuscript, only ClinVar categories were written with double quotation (“...”) marks. In contrast, other terms, specifically in silico prediction terms, were capitalized as proper nouns or, if they were not terms but adjectives, they were written in lowercase, such as the adjective ‘pathogenic’. The algorithmic prediction results presented in the Figure 3 summarizes the classification under three categories: Deleterious, Possibly damaging, and Neutral, which represent classifications of in silico assessments (SIFT [76], PolyPhen-2 [86], PANTHER [77], PhD-SNP [79], and SNPs&GO [80]). To identify the most pathogenic variants, a filter was applied: variants had to meet specific criteria, including being predicted as damaging or intolerant by at least four tools, with a SIFT score of 0 and a PolyPhen2 score of 1. This filter identified 28 pathogenic variants (L81F, P83T, R125H, D149H, F152S, S155F, M199T, C190F,

E217G, Y220C, Y280D, V292G, G308D, I309T, I309M, T310I, I313M, T314K, T317S, V329F, Y331N, D336G, C342Y, R446C, F453L, N457Y, Y460C, and W461R). These variants are given in the **Appendix C Table 1**, together with ClinVar accession and version numbers. These variants scored 0 in SIFT, 1 in PolyPhen2, and were predicted as Probably damaging and Disease by PANTHER [77]. PhD-SNP [79] also categorized them as Disease while SNPs&GO [80] classified all as Disease, except for L81F, I309T, I309M, and L313M, which were considered Neutral.

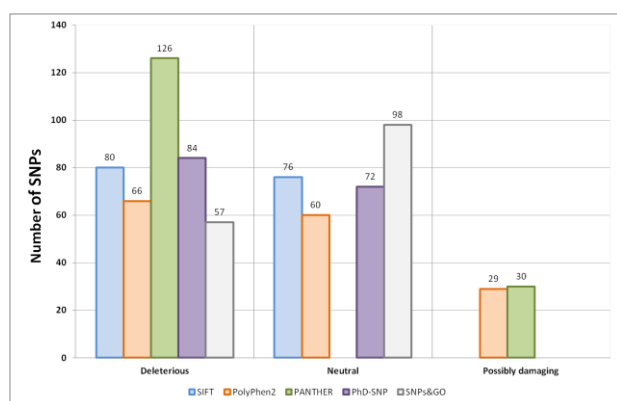


Figure 3. Deleterious, Neutral and Possibly damaging variants of GABRG2 predicted by five in silico tools (SIFT [76], PolyPhen2, PANTHER [77], PhD-SNP and SNPs&GO [80]).

The identified 28 deleterious or pathogenic GABRG2 gene variants are mapped to the corresponding protein domains [87] of the $\gamma 2$ subunit. In the NCBI database (RefSeq: NP_000807.2), this 467 amino acid long subunit is characterized with a signal peptide between the residues 1-39, N terminus extracellular domain (ECD) between the residues 90 and 271, first transmembrane domain (M1) between the amino acids 274-296, second transmembrane domain (M2) between the residues 300-322, third transmembrane domain (M3) between the residues 334 and 356, fourth transmembrane domain (M4) spanning from the amino acid residue from 444 until the 466. In addition, it has an intracellular domain (ICD) in between the residues 357-443, where it interacts with GABA(A)-receptor-associated protein (GABARAP) [88] in the region between the residues 425 and 442. The 10 of the variants, predicted as pathogenic, are located within the ECD (L81F, P83T, R125H, D149H, F152S, S155F, M199T, C190F, E217G and Y220C), two in the M1 (Y280D & V292G), 7 in the M2 (G308D, I309T, I309M, T310I, I313M, T314K, T317S), 2 variants in the linker between the M2-M3 (V329F & Y331N), 2 in the M3 (D336G & C342Y), and 5 in the M4 region (R446C, F453L, N457Y, Y460C, W461R). Specificities of these variants are summarized in **Appendix C Table 2**.

3.4. Functional and stability analysis

3.4.1. Analysis of variant effects: Molecular mechanisms

The MutPred2 [81] server is used to investigate variant impact on molecular mechanisms of $\gamma 2$ subunit. To predict the relevant molecular mechanisms, the identified 28 variants were studied by submitting the amino acid sequence of GABRG2 Isoform 2 (RefSeq NM_000816.3 and NP_000807.2, NCBI database [89]) to Mutpred2 server [81]. MutPred2 is based on the machine learning approach that combines genetic and molecular data to assess the likelihood of amino acid substitutions being pathogenic. It works by offering two key features: a general prediction of pathogenicity and a ranked list of specific molecular changes that could potentially impact the phenotype. The method is trained on a dataset comprising 53,180 pathogenic variants and 206,946 unlabeled variants (assumed to be neutral) sourced from the Human Gene Mutation Database (HGMD) [90], SwissVar [91], dbSNP [89], and inter-species pairwise alignment. MutPred2 follows a series of steps to assess the impact of a substitution on protein structure and function. Mutpred2 data sets were developed for the training of various property predictors that rely on public data with different dates. For instance, protein-protein interaction datasets date back to 2012 [81]. On the other hand, the GABA_AR structural data, which also present the subunit interaction interfaces for instance, have been published only recently [30,32]. Thus, for supporting evidence, the Mutpred2 results were integrated with the recent evidence from the literature (NCBI [89] and PDB [92,93]) and described in the Supplementary File for MutPred Analysis (**Appendix B, MutPred**) that involves the recent structural data of GABA_AR subunits [30]. This approach does not only allow a comprehensive analysis but also an opportunity to test the accuracy of the MutPred2 results.

The general score of MutPred2 [81] prediction for the 28 variants of the $\gamma 2$ subunit is presented in the **Table 3**, which shows that all the 28 variants (L81F, P83T, R125H, D149H, F152S, S155F, C190F, M199T, E217G, Y220C, Y280D, V292G, G308D, I309T, I309M, T310I, L313M, T314K, T317S, V329F, Y331N, D336G, C342Y, R446Q, F453L, N457Y, Y460C, W461R) have a high probability of pathogenicity with a score higher than 0.75. Additional scores including Property score (Probability) and P value as well as the mechanisms for the pathogenicity can be found in **Appendix B, MutPred**. The property score, which ranges from 0 to 1, represents the probability of loss or gain of the specific property due to the substitution. A higher property score suggests that the alteration of that property is more likely to be involved in the molecular mechanism of the associated disease. Reflecting on these, the variant L81F has a MutPred2 [81] score 0.818. Among the candidate molecular mechanisms with a p value < 0.05, 'Altered ordered

interface' has the highest probability (0.31) (P value = 0.01). Additionally, mechanism of 'Altered transmembrane protein' (Probability score is 0.27, P value is 0.00082) was predicted. This is well reflected by structural studies: when we identified variants predicted to be pathogenic, we primarily observed that they corresponded to critical amino acid positions, and predominantly involved interface interactions. **Appendix C, Table 4** lists these residues found in the receptor subunit interaction interfaces. Interestingly, L81 is in the ECD interface of the $\gamma 2$ subunit interacting with $\beta 2$ or $\beta 3$ subunits as described in Cryogenic electron microscopy (cryoEM) structures of human GABA_AR [30,32](**Appendix C, Table 4**). Thus, the impact of L81F will likely be the distortion of interaction of the $\gamma 2$ subunit with β subunits leading to the alteration of receptor oligomerization. The significance of ECD was demonstrated by a point mutation (R43Q) found in the $\gamma 2$ subunit, which is linked to childhood absence epilepsy and febrile seizure[94]. The ECD consists of an N-terminal α -helix followed by a core β sandwich composed of 10 β strands, with the GABA-binding site located near the middle of the ECD. Studies show that receptor assembly process, which starts in the endoplasmic reticulum (ER), is primarily regulated by the N-terminal ECD of the subunits[95]. N-terminal deletions in the $\gamma 2$ subunit impaired its incorporation into receptors [96]. Consequently, when interpreting the MutPred2 prediction, we will examine the ECD variants from this perspective. In addition to L81F, there are 9 more variants in the ECD: P83T, R125H, D149H, F152S, S155F, C190F, M199T, E217G, Y220C. Among these P83T, which has MutPred2 score of 0.895 was predicted as 'Altered ordered interface' (probability score 0.29, p value 0.03) and 'Altered transmembrane protein' (probability score 0.28, p value 0.00067) (**Appendix B, MutPred**).

Like L81, the P83 is in the ECD interface of the $\gamma 2$ subunit interacting with $\beta 2$ or $\beta 3$ subunits as shown in cryoEM structures of human GABA_ARs [30,32] (**Appendix C, Table 4**). Thus, the variant P83T, which is located in the α - $\beta 1$ loop of the $\gamma 2$ subunit at $\gamma 2$ / $\beta 2$ - subunit interface, will pose the risk of altered interaction of the $\gamma 2$ subunit with β subunits leading to the alteration of receptor oligomerization. Indeed, another variant in the same position (GABRG2, P83S variant) was previously reported in a family with idiopathic generalized epilepsy, where it was observed to be associated with the seizure phenotype [97]. The mutant receptors with this variant had reduced cell surface expression owing to the altered receptor assembly and ER retention, decreased whole-cell current amplitudes and increased sensitivity to Zinc ions (Zn^{2+}), despite some inconsistent findings in the literature [62]. These likely confirm that the P83T identified in this study, may cause pathogenic effect. Similarly, the rest of the variants (R125H, D149H, F152S, S155F, E217G) and

their localization in the molecular interaction interfaces verify the prediction of 'Altered ordered interface' and 'Altered transmembrane protein' although these mechanisms are not necessarily have the highest MuPred2 [81] prediction probability (**Appendix B, MutPred**). For instance, D149H is described as 'Altered metal binding' (Probability score: 0.42) according to MupPred2 candidate mechanism for pathogenicity (MutPred2 score: 0.942, **Appendix B**). Zn^{2+} , the divalent metal cation, acts as non-competitive inhibitor of both $\alpha\beta$ and $\alpha\beta\gamma$ GABA_ARs [98,99] but the Zn^{2+} binding site is primarily found in the β subunit. According to structural analysis at 3.0 Å resolution, this site is formed by a group of three histidine residues positioned at amino acid position 267 within the pore lining M2 helices of $\beta 3$ subunits [100]. So 'Altered metal binding' effect of D149H in the $\gamma 2$ subunit is an unlikely mechanism although it has highest probability score among the candidate mechanisms (**Appendix B, MutPred**). Indeed, the distortion of the Zn^{2+} binding site, would not be expected as a mechanism relevant to epilepsy, since Zn^{2+} is an inhibitor of GABA_ARs[3].

On the other hand, 'Altered ordered interface' and 'Altered transmembrane protein' appears to be the possible mechanisms for pathogenic effect since D149 is a residue at the interaction interface with $\beta 2$ & $\beta 3$ subunits (**Appendix C, Table 4**). Same conclusions can be made for the other variants (C190F, M199T, E217G) in the ECD that "altered ordered interface" and 'Altered transmembrane protein' appears to be the possible MutPred2 predicted mechanisms (**Appendix B**) instead of 'Altered metal binding' since these ECD variants correspond to residues at the subunit interfaces (**Appendix C, Table 4**).

Taken together the mechanism of pathogenic effect of the seven ECD variants (L81F, P83T, R125H, D149H, F152S, S155F, E217G) is predicted as 'Altered ordered interface' and 'Altered transmembrane protein'. The remaining ECD variants, C190F, M199T and Y220C, will be examined separately since they do not correspond to subunit interface sites. The variant C190F is predicted as 'Altered metal binding site' (MutPred2 probability=0.6, **Appendix B, MutPred**). Similarly, M199T and Y220C are predicted as 'Altered metal binding sites' (MutPred2 probability scores are 0.29 and 0.57 respectively (**Appendix B, MutPred**). The mechanism of pathogenicity for these variants are unclear since there is not a significant metal (such as Zn^{2+}) binding site in the $\gamma 2$ subunit and supporting data are required for the proposition of molecular mechanism of pathogenicity in later sections of this study (protein modeling).

The other variants analyzed by MutPred2 are located in M1 domain (V292G) in addition to those in the M2

domain (I309T & I309M, T310I, L313M, T314K, T317S), D336G and C342Y in the M3, R446Q in M4 as well as the variants in the M2-M3 linker (V329F, Y331N). The Mutpred2 score of M1 variant V292G is 0.82. Among the candidate mechanisms for pathogenic effects of the G variant in the position of 292, are “Altered transmembrane protein”, “Altered ordered interface” and “Altered stability” (**Appendix B, MutPred**). Since these mechanisms are complementary each other and the variant V292G is located at the interaction interface with $\alpha 1$ & $\beta 3$ subunit (**Appendix C Table 4**), we conclude that pathogenic effect of this variant is predicted as ‘Altered ordered interface’ and ‘Altered transmembrane protein’. The M2 domain is the region for the pore lining of the receptor channel for chloride ion to pass through [21]. The M2 region plays a role in forming the ion channel pore of the receptor, allowing the passage of ions. On the other hand, the intracellular domain (ICD) located between M3 and M4 domains, contains sites where phosphorylation occurs and interacts with other proteins, thereby influencing the function and trafficking of the channel [3, 60, 61]. For the variants predicted as pathogenic in this region, ‘Altered stability’ or ‘Altered transmembrane protein’ has the highest probability for the mechanism of pathogenicity according to Mupred2 [81] (**Appendix B, MutPred**). In the M2 domain, the variants I309T and I309M are found in the subunit interaction interface between the $\gamma 2$ subunit and $\beta 2$ or $\beta 3$ subunits. The variant T314K is located at the subunit interaction interface of $\gamma 2$ subunit with $\alpha 1$ or $\beta 3$ subunits (**Appendix C, Table 4**). These residues do not correspond to any variants in the M2 region identified in this study. CryoEM studies determined structural coordinates of GABA_ARs that the chloride ion interacts with the residues V104, L237, Y238, Q239, F240 [34].

Interestingly, D336G in the M3 is predicted as loss of helix (P value ≤ 0.05) according to MutPred2 [81] analysis. This effect will likely cause an effect in the receptor integrity since it is located in the interaction interface with $\beta 2$ & $\beta 3$ subunits (**Appendix C, Table 4**). Also, the variants in the M2-M3 linker (V329F, Y331N) have the following properties: Val329 is located at the interaction interface with $\beta 2$ & $\beta 3$ subunits and Tyr331 is located at the interaction interface with $\beta 2$ subunits (**Appendix C, Table 4**). These results are well correlated with the Mutpred2 analysis that represents “Altered ordered interface” (P value ≤ 0.05) (**Appendix B, MutPred**). Thus, these residues will likely cause a molecular mechanism that will presumably impact on receptor assembly.

M4 of the $\gamma 2$ subunit is known to be critical for the postsynaptic targeting of the $\gamma 2$ subunit containing GABA_ARs. Initially, it was believed that the ICD of the $\gamma 2$ subunit played a crucial role in postsynaptic targeting[53]. However, research has revealed that

the localization $\gamma 2$ subunit containing GABA_ARs to postsynaptic sites primarily occurs through a mechanism that is mostly unrelated to the ICD of the $\gamma 2$ subunit [14,51,53]. Instead, it relies on the presence of the $\gamma 2$ subunit's C-terminal sequence, which includes the M4 [51]. Thus, the transmembrane domain (M4) —not the ICD as previously thought[14]—of the $\gamma 2$ subunit appears to be important for the membrane targeting of receptor subtypes[14,51]. We have identified R446Q, F453L, N457Y, Y460C, W461R as pathogenic in the this domain. According to MutPred2 [81] results, R446Q variant causes “altered ordered interface” (P value < 0.05). Indeed, structural data show that among the variants identified in this domain only R446Q is located at the subunit interaction interface of the receptor (**Appendix C, Table 4**). Thus, this molecular mechanism of this variant effect predicted by MutPred2 seems to be reasonable. For the remaining variants, Mutpred2 results suggest ‘Altered ordered interface’ and ‘Altered transmembrane protein’ as most probable mechanisms for the variants N457Y (MutPred2 score: 0.909, P value < 0.05), Y460C (MutPred2 score: 0.942, P value < 0.05) and W461R (MutPred2 score: 0.946, P value < 0.05) and the “altered transmembrane protein” for the F453L (MutPred2 score: 0.911, P value < 0.05) (**Appendix B and Appendix C Table 3**).

3.4.2. Stability prediction

The impact of the 28 variants on GABRG2 protein stability was predicted by I-Mutant2.0[82] web server. According to I-Mutant2.0, the 28 variants considered to decrease the stability of $\gamma 2$ subunit (except the S155F which predicted to increase the stability). The prediction conditions were 25 °C and PH=7, and the resulted DDG, which stands for the change in Gibbs free energy ($\Delta\Delta G$) due to the variant. This, and the reliability index (RI), a score that indicates the confidence level of the predicted DDG value, are presented in the **Figure 4**. DDG > 0 is associated with stabilizing effect while DDG < 0 is associated with the destabilizing mutation. The variants V929G (RI= 9, DDG= -3.98), V329F (RI=9, DDG= -3.59), D336G (RI=7, DDG= -2.16), F152S (RI= 9, DDG= -2.05) and E217G (RI=7, DDG= -2.04) show the highest destabilizing effect. Furthermore, the variants R125H (RI= 9, DDG= -1.71), F453L (RI= 8, DDG= -1.56), Y331N (RI= 4, DDG= -1.51), W461R (RI= 8, DDG= -1.48), M199T (RI= 7, DDG= -1.42), P83T (RI= 8, DDG= -1.33), D149H (RI= 7, DDG= -1.13), R446Q (RI= 8, DDG= -1.08), G308D (RI= 3, DDG= -0.87), L81F (RI= 7, DDG= -0.76), C342Y (RI= 4, DDG= -0.75), Y460C (RI= 6, DDG= -0.71), L313M (RI= 5, DDG= -0.66), I309T (RI= 2, DDG= -0.66), I309M (RI= 5, DDG= -0.64), Y280D (RI= 2, DDG= -0.24), N457Y (RI= 1, DDG= -0.01) are also predicted to decrease the stability. S155F and T314K were predicted to decrease the stability with values of RI=3, DDG=-0.63 and RI=0, DDG=-0.56, respectively. On the other

hand, the variants C190F (RI= 3, DDG= 0.11), Y220C (RI= 2, DDG= 0.57), T310I (RI= 0, DDG= 0.37), T317S (RI= 2, DDG= 0.12) are predicted to increase the protein stability. However, their DDG values are near to zero and RI values are relatively low suggesting that these variants may not lead to the predicted effects. Thus, in the following steps we will include these variants in addition to other destabilizing variants.

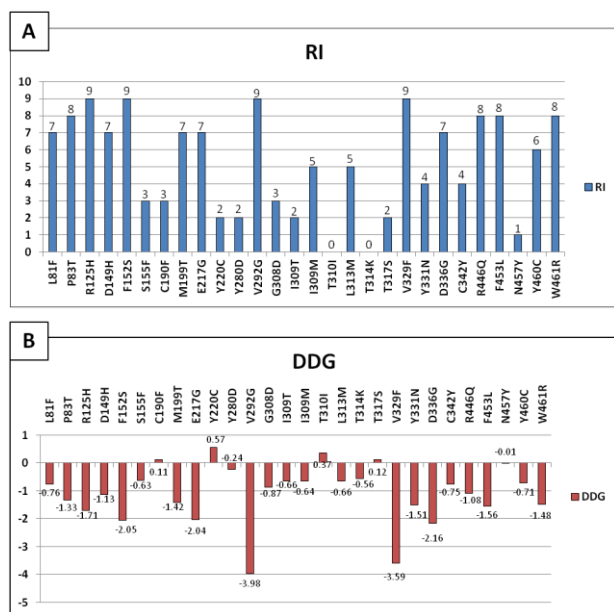


Figure 4. Stability prediction by I-Mutant server[82]. Bar charts showing the RI (A) and DDG values (B) of the 28 nsSNPs. All predicted to decrease stability except one of them (S155F). (RI= reliability index, DDG= Free energy change value, DDG>0 increase in stability, DDG<0 decrease in stability)

3.5. Evolutionary conservation profile of GABRG2 gene variants

Comparing amino acid sequences of homologous proteins can reveal crucial residues, that have likely undergone purifying natural selection, indicating their functional importance and conservation. ConSurf server, which performs a search for closely related homologous sequences [101], was used to identify the highly conserved residues. As presented in the **Figure 5** (and **Appendix C Table 5**), the variants P83T, R125H, D149H, C190F, Y280D, G308D, T310I, L313M, T314K, T317S, Y331N, D336G, C342Y, R446Q, N457Y, Y460C and W461R all share the ConSurf [101] score of 9, that considered to be the most conserved. Furthermore, it was also identified if the residue is a structural or functional residue (**Appendix C Table 5**).

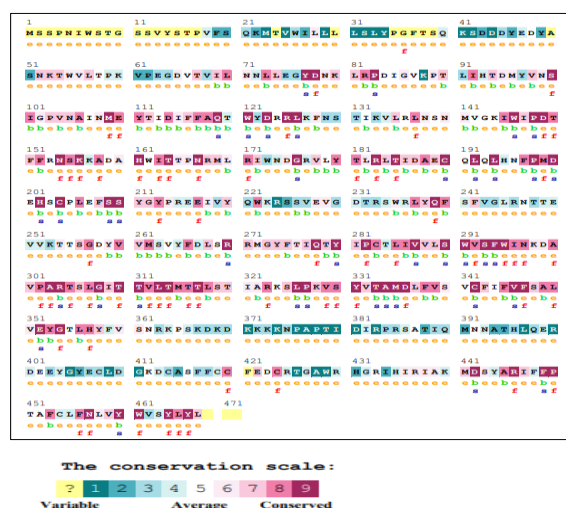


Figure 5. Conservation profile of GABRG2 residues.

Among the most deleterious 28 variants, 20 of them (P83T, R125H, D149H, S155F, C190F, M199T, E217G, Y280D, G308D, T310I, L313M, T314K, T317S, Y331N, D336G, C342Y, R446Q, N457Y, Y460C and W461R) were predicted as highly conserved structural/functional residues (**Appendix C, Table 5**). Among these 20 variants, 3 variants (S155F, M199T and E217G) scored 8 by ConSurf [101] which also indicated them as highly conserved residues. These 20 variants were chosen for further investigation in this study.

3.6. Three-dimensional modeling

The utilization of 3D structural analysis of proteins has important clinical implications [72]. In our research, we identified a notable number of missense variants that were predicted to completely impair protein function. To visualize the effect of these 20 variants on GABRG2 protein structure, the wild-type GABRG2 and its mutant 3D structures were generated using Phyre2 web server [102]. The wild-type sequence and each mutation were run separately to the server. The generated structures were then submitted to the TM-align server [103] to calculate the TM-scores (template modeling scores) and RMSD (root-mean-square deviation) values for each mutant structure in alignment with the wild-type structure (**Appendix C Table 6**). TM-score [104] evaluates topological similarity between wild-type and mutant structures, while RMSD value measure the root-mean-square distance between corresponding atom pairs of the two protein models, to assess the degree of similarity of two protein 3D structures [105]. A higher RMSD value suggests a greater structural difference between the wild-type and mutant forms[105]. TM-score assigns a numeric value ranging from 0 to 1, with 1 signifying an exact match between the two structures. Only structures with highest RMSD (cut off > 3.0) among the lowest TM-scores (cut off < 0.7) were chosen leading to the identification of 10 variants (S155F, C190F, M199T, Y280D, G308D, T310I, T314K, T317S, C342Y, Y460C)

selected to be the most deleterious. The summary of the results identified so far are shown in the **Figure 6**, where 10 the most deleterious variants are highlighted with yellow box.

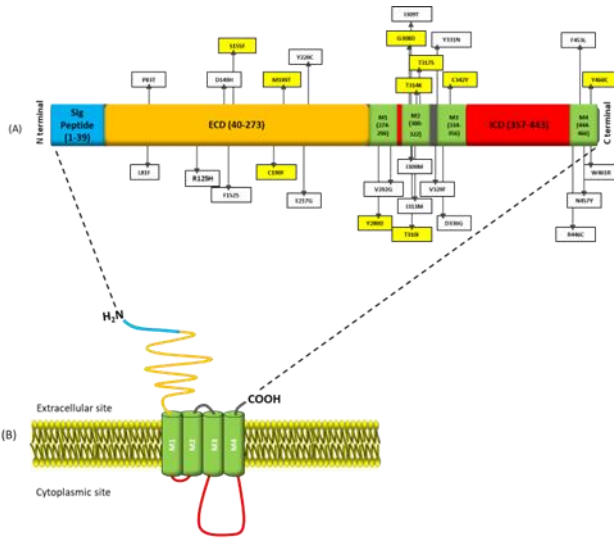


Figure 6. Graphical representation of the pathogenic variants located in the $\gamma 2$. The diagram (A) showing the distribution and peptide sequence position of the initially identified 28 variants along the $\gamma 2$ subunit in the cell membrane in diagram (B). The variants written in the yellow box in the diagram (A) highlights 10 variants (S155F, C190F, M199T, Y280D, G308D, T310I, T314K, T317S, C342Y, Y460C) representing the most pathogenic. (ECD: N-terminus extracellular domain, M1: First transmembrane domain, M2: Second transmembrane domain, M3: Third transmembrane domain, M4: Fourth transmembrane domain. ICD: Intracellular domain between the third and fourth transmembrane domains, Sig peptide: Signal peptide)

The 3D structures for these 10 variants were regenerated using the I-TASSER [106,107] server, which provides 5 different structures for each entry, with a C-score that ranged from -5 to 2, where a C-score of higher value signifies a model with a high confidence. Then these structures were validated by calculating their overall quality factors using ERRAT server [108] (**Appendix C Table 7**). The structures with highest C-score and highest quality factors variants (>70%, **Appendix C Table 7**) were chosen and visualized by UCSF Chimera 1.17 [109] The structure of these variants (S155F, C190F, M199T, Y280D, G308D, T310I, T314K, T317S, C342Y, Y460C) were superimposed over the wild-type structure to assess the similarity between the two models. The superimposed models are shown in the **Figure 7**. The superimposition of structures indicates whether these models share the same structure and the extent of the differences between them. As shown in **Figure 7**, the wild-type GABRG2 protein structure (represented by the yellow structure) was superimposed with the mutated GABRG2 structures for each mutation separately (shown as colored

structures) and all of them resulted in RMSD values (**Figure 7**), greater than 0.5, indicating significant variations from the wild-type structure. The superimpositions, along with the RMSD values demonstrate that these mutations might significantly affect the structure of the $\gamma 2$ subunit.

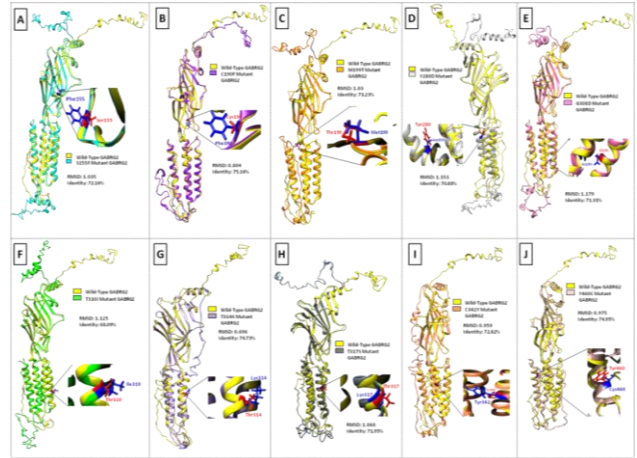


Figure 7. $\gamma 2$ subunit three dimensional structures generated by I-TASSER[106,107] and visualized by Chimera [109]. The structures A-J) present the variant amino acid superimposed over the wild-type amino acid (yellow).

3.7. Mapping the variants on to the structural/functional hotspots

As epilepsy research is continuously evolving, new findings shed light on the specific structural and functional alterations in the $\gamma 2$ subunit that is associated with the specific cellular pathology and other characteristics of epilepsy syndromes [27,59,110–115]. Thus we also studied our results from this emerging perspective.

3.7.1. Cellular pathology

Frequent presence of mutants in key structural domains of GABA_AR subunits with shared functional characteristics indicates a link between structure and function[115]. Thus, there exist “epileptogenic structural cassettes” within the GABA_AR subunits [115]. GABA_AR mutations contribute to epilepsy through affecting receptor assembly, trafficking, GABA binding, chloride channel function, and receptor kinetics [116]. These alterations are linked to the mutations in the specific structural domains causing the cellular pathology[115]. For instance, epilepsy mutations in the ECD of the $\gamma 2$ subunit affect receptor assembly, leading to ER retention and decreased surface expression[27]. As a result, the trafficking of $\gamma 2$ -GABA_ARs has emerged as critical in epilepsy, primarily due to frequent alterations in this process, such as inadequate subunit incorporation during assembly in the ER, which poses a limitation to forward trafficking [27,95]. Thus, we predict that pathogenic variants like S155F, C190F, M199T in the ECD will alter receptor assembly, increase ER

retention, and reduce trafficking, surface expression, and GABAergic current. Especially, the variant S155F, being at the interaction interface of $\gamma 2$ subunit with $\beta 2$ & $\beta 3$ subunit (**Appendix C, Table 4**), has the highest possibility for this incidence. Nevertheless, for the $\gamma 2$ subunit, this mechanism appears as a general pathological mechanism for many of the GABRG2 subunit mutations in different domains [27]. As a result, the proposed pathology of all variants i.e., variants in the ECD (S155F, C190F, M199T), variant (Y280D) in the M1, variants (G308D, T310I, T314K, T317S) in the M2, variant (C342Y) in the M3 and the variant Y460C in the M4 would be reduced cell surface expression mostly via the reduced trafficking, increased ER retention, leading to the reduced cell current. Notably, our previous results (**Supplementary File 3, Table 3**) support the findings for the variants T310I, T310I, T314K, T317S in the M2 since these variants are located at the subunit interaction interfaces (**Appendix C, Table 4**). Thus, for the variants (G308D, T310I, T314K, T317S) in the M2, forming the ion channel pore of the receptor [21], alteration in trafficking is expected, in addition to disturbance in the ion channel conductance. These altogether will likely manifest a higher degree of alteration.

3.7.2. Epilepsy phenotype

Studies indicate that the relationship between genotype and epilepsy phenotype, especially in relation to genes that encode ion channels and receptors, is complex [74]. Despite this,

These mutations may be linked to the severity of epilepsy phenotypes [111]. Mutations in the N-terminus extracellular domain (ECD) of the receptor subunits are thought to be linked with milder phenotypes (generalized epilepsy associated with mild to moderate intellectual disability) while mutations in the transmembrane regions (M1-M4) are considered for a more severe early-onset epilepsy, with severe intellectual disability [111]. For instance, patient mutations in the pore-lining M2 region exhibited notably severe phenotypes [91]. Thus, we anticipate that among the predicted pathogenic variants, those in the ECD will manifest milder epilepsy, and transmembrane variants will result in more severe phenotypes. Specifically, we propose that based on the patient mutations described in the literature [115], the variants in the ECD (S155F, C190F, M199T, **Figure 6A**) are predicted to be associated with milder epilepsy phenotypes. The variants in the transmembrane domains (variants in the M2: Y280D, variants in the M2: G308D, T310I, T314K, T317S, variant in the M3: C342Y and variant in the M4: Y460C, **Figure 6A**) are expected to manifest severe epilepsy phenotypes. In our previous paper [117] we described the utility of HPO (The Human Phenotype Ontology) [118] for a discussion of epilepsy phenotype and genetic

variation. This perspective can be used for an extended evaluation of phenotypic severity in relation to variants predicted as pathogenic.

4. Discussion and Conclusion

Our study focused on the prediction of variant impact for a set of non-synonymous single-nucleotide polymorphisms (nsSNPs) with unknown molecular consequence within the coding region of the $\gamma 2$ subunit of GABA_AR. These variants or VUS were subjected to predictive algorithms and the variants identified with highest probability of pathogenicity were validated by protein modeling. We have predicted 10 variants as the most pathogenic. These variants are S155F, C190F, M199T, Y280D, G308D, T310I, T314K, T317S, C342Y, Y460C. These resultant variants were integrated with the data of epilepsy patient mutations mapping the predicted variants on the 'epileptogenic structural cassettes' [115]. Thus, these ten variants are anticipated to contribute to cellular pathology characterized by reduced trafficking, increased endoplasmic reticulum retention and reduced cell current. Further integration of epilepsy patient mutations [111] have led to the presumed phenotype severity as a consequence of variant effect. Among these, the variants in the ECD (S155F, C190F, M199T) are predicted to be associated with milder epilepsy phenotypes. The variants in the transmembrane domains (variants in the M1: Y280D, variants in the M2: G308D, T310I, T314K, T317S, variant in the M3: C342Y and variant in the M4: Y460C) are expected to manifest severe epilepsy phenotypes. Consequently, our integrative approach implies that the specific position of GABRG2 variants might potentially forecast the intensity of clinical features, as also discussed in our previous papers [117].

Our results suggest the powerful utilization of accumulating data to support our comprehensive analysis which has the potential to guide wet lab experimentation and help decision making for differential diagnosis. Differential diagnosis may benefit from neuropathological examination, but neuropathological examination for late onset epilepsy, for instance, does not have definitive guidelines [119]. Genetic testing is another way which might support differential diagnosis but prevalence of VUS is a major challenge. As utilization of genetic testing represents a shift towards a more tailored and individualized approach in managing epilepsy [68], determining whether the VUS are benign or disease-causing requires a thorough assessment of their effects. As a result, the use of computer-based tools to predict the consequences of these variants, known as *in silico* tools, has become indispensable. The ACMG/AMP provide guidelines for variant interpretation, categorizing variants as "Pathogenic", "Likely pathogenic", "Benign", or "Likely benign". *In silico* methods, such as predictive algorithms, are

considered as supporting evidence for pathogenicity, as outlined in criterion PP3 [70]. Thus, our results corresponding to PP3, have implications for the clinical management of epilepsy since it aligns with this framework for the categorization the pathogenic variants. Regarding this, accumulating examples from literature provide evidence for successful integration of the PP3 criterion into the clinical decision making [68] suggesting that our in silico results presenting the presumed pathogenic GABRG2 variants have potential for aiding epilepsy diagnosis and management, especially with the available examples for integrating in silico variant prediction into the diagnostic pathway [120].

There are some limitations of this study. The use of in silico tools and reference sequences may affect prediction accuracy, warranting cautious interpretation. Generalizing from single studies should be avoided. The focus here was on nonsynonymous point mutations in the $\gamma 2$ subunit coding region. However, other variants, like those in splice sites or untranslated regions (UTRs), may play vital roles in epilepsy syndromes or GABA_AR-related channelopathies. Computational findings indicate transcription factor recognition sites in the 5' UTR of GABA_AR subunit genes, suggesting potential impact on subunit expression. Further research should explore rare noncoding region variants in the GABRG2 gene using novel tools and frameworks. Utilizing functional annotation databases and machine learning for transcriptomic profiling can enhance precision medicine. Additionally, in the present study we specifically focused on the identification of pathogenic variants however, variants that might impact the on the ligand binding sites may have consequences for drug response. For instance, there are variants such as Phe343Leu (ClinVar Accession and version number: VCV000205551.2) identified in our study (Appendix B), located at the binding site (PDB 6X3W) of the Phenobarbital[66], an antiseizure medication[64]. Also, this variant overlaps with Diazepam binding site (PDB 6X3X)[34]. Although Phe343Leu was not predicted as pathogenic in our study, it may impact on the Phenobarbital and Diazepam response of the epileptic patients. Similarly, variant Asp336Gly (ClinVar Accession number: VCV000408214.7) overlaps with Diazepam binding site[34]. Although Asp336Gly was not predicted as pathogenic in our study, it may impact on the Diazepam response of the patients medicated by this drug. Thus, conducting docking simulations to study the impact of these variants on ligand binding (e.g., Phenobarbital, Diazepam) is crucial for future research.

Appendices

Appendix A. Material and Method

Appendix B. The summary of ClinVar data for GABRG2, The MutPred2 Analysis Results

Appendix C. Table 1-7 summarizing the results in the relevant sections in the main text.

Acknowledgment

Not applicable

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

Ethical approval

Not applicable

References

- [1] Paulsen O, Moser EI 1998 A model of hippocampal memory encoding and retrieval: GABAergic control of synaptic plasticity. *Trends Neurosci* 21:273-278
- [2] Klausberger T, Magill PJ, Marton LF, Roberts JDB, Cobden PM, Buzsaki G, Somogyi P 2003 Brain state- and cell type-specific firing of hippocampal interneurons in vivo. *Nature* 421 844–8
- [3] Freund T. F. 2003 Interneuron Diversity series: Rhythm and mood in perisomatic inhibition. *Trends Neurosci.* 26(9) 489–95
- [4] Paille, V., Fino, E., Du, K., Morera-Herreras, T., Perez, S., Kotaleski, J. H., & Venance, L. 2013 GABAergic circuits control spike-timing-dependent plasticity. *J. Neurosci. Off. J. Soc. Neurosci.* 33(22), 9353–9363.
- [5] Klausberger T. 2009 GABAergic interneurons targeting dendrites of pyramidal cells in the CA1 area of the hippocampus. *Eur. J. Neurosci.* 30(6) 947–57
- [6] Nyíri, G., Freund, T. F., & Somogyi, P. 2001 Input-dependent synaptic targeting of alpha(2)-subunit-containing GABA(A) receptors in synapses of hippocampal pyramidal cells of the rat. *Eur. J. Neurosci.* 13(3), 428–442.
- [7] Klausberger T, Roberts JD, Somogyi P 2002 Cell type- and input-specific differences in the number and subtypes of synaptic GABA receptors in the hippocampus. *J Neurosci* 22:2513–2521
- [8] Pawelzik H, Hughes DI, Thomson AM (2002) 2002 Physiological and morphological diversity of immunocytochemically defined parvalbumin- and cholecystokinin-positive

- interneurons in CA1 of the adult rat hippocampus. *J Comp Neurol* **443**:346–367
- [9] Freund, T. F., & Buzsáki, G. 1996 Interneurons of the hippocampus. *Hippocampus* **6** 347–470
- [10] Nusser, Z., Sieghart, W., & Somogyi, P. 1998 Segregation of different GABAA receptors to synaptic and extrasynaptic membranes of cerebellar granule cells. *J. Neurosci. Off. J. Soc. Neurosci.* **18**(5), 1693–1703.
- [11] Wei, W., Zhang, N., Peng, Z., Houser, C. R., & Mody, I. (2003). Perisynaptic localization of delta subunit-containing GABA(A) receptors and their activation by GABA spillover in the mouse dentate gyrus. *J. Neurosci. Off. J. Soc. Neurosci.* **23**(33), 10650–10661.
- [12] Arslan, A. Clustering of gamma-aminobutyric acid type A receptors *Period. Eng. Nat. Sci.* **3**(1).
- [13] Arslan A 2021 Extrasynaptic δ -subunit containing GABAA receptors *J. Integr. Neurosci.* **20** 173–84
- [14] Arslan A, Engelhardt J and Wisden W 2014 Cytoplasmic domain of δ subunit is important for the extra-synaptic targeting of GABAA receptor subtypes *J. Integr. Neurosci.* **13** 617–31
- [15] Farrant, M., & Nusser, Z. 2005 Variations on an inhibitory theme: phasic and tonic activation of GABA(A) receptors. *6*(3), 215–229. *Nat. Rev. Neurosci.*
- [16] Sente A, Desai R, Naydenova K, Malinauskas T, Jounaidi Y, Miehlung J, Zhou X, Masiulis S, Hardwick S W, Chirgadze D Y, Miller K W and Aricescu A R 2022 Differential assembly diversifies GABAA receptor structures and signalling *Nature* **604** 190–4
- [17] Whiting, P. J., Bonnert, T. P., McKernan, R. M., Farrar, S., Le Bourdellès, B., Heavens, R. P., Smith, D. W., Hewson, L., Rigby, M. R., Sirinathsinghji, D. J., Thompson, S. A., & Wafford, K. A. 1999 Molecular and functional diversity of the expanding GABA-A receptor gene family. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **868** 645–653.
- [18] Arslan, A. 2015 Distinct roles of gamma-aminobutyric acid type A receptor subtypes: A focus on phasic and tonic inhibition. *J. Neurobehav. Sci.* **2** 72–6
- [19] Möhler H. (2006). GABA(A) receptor diversity and pharmacology. *Cell Tissue Res.* **326**(2), 505–516.
- [20] Huang, T. H., Lin, Y. S., Hsiao, C. W., Wang, L. Y., Ajibola, M. I., Abdulmajeed, W. I., Lin, Y. L., Li, Y. J., Chen, C. Y., Lien, C. C., Chiu, C. D., & Cheng, I. H. . 2023 Differential expression of GABAA receptor subunits δ and $\alpha 6$ mediates tonic inhibition in parvalbumin and somatostatin interneurons in the mouse hippocampus. *Front. Cell. Neurosci.* **17**, 1146278.
- [21] Goetz T, Arslan A, Wisden W and Wulff P 2007 GABA(A) receptors: structure and function in the basal ganglia *Prog. Brain Res.* **160** 21–41
- [22] Kim Y S and Yoon B E 2017 Altered GABAergic Signaling in Brain Disease at Various Stages of Life *Exp. Neurobiol.* **26** 122–31
- [23] Als, T. D., Kurki, M. I., Grove, J., Voloudakis, G., Therrien, K., Tasanko, E., Nielsen, T. T., Naamanka, J., Veerapen, K., Levey, D. F., Bendl, J., Bybjerg-Grauholm, J., Zeng, B., Demontis, D., Rosengren, A., Athanasiadis, G., Bækved-Hansen, M., Qvist, P., Bragi Walters, G., Thorgeirsson, T., ... Børnglum, A. D. 2023 Depression pathophysiology, risk prediction of recurrence and comorbid psychiatric disorders using genome-wide analyses. *Nat. Med.* **29**(7) 1832–44
- [24] Mody I 2019 GABAAR Modulator for Postpartum Depression *Cell* **176** 1
- [25] Feng, Y. F., Zhou, Y. Y., & Duan, K. M. 2023 The Role of Extrasynaptic GABA Receptors in Postpartum Depression. *Mol. Neurobiol.*
- [26] Fu X, Wang Y J, Kang J Q and Mu T W 2022 GABAA Receptor Variants in Epilepsy *Epilepsy ed S J Czuczwar* (Exon Publications)
- [27] Lorenz-Guertin J M, Bambino M J and Jacob T C 2018 $\gamma 2$ GABAAR Trafficking and the Consequences of Human Genetic Variation *Front. Cell. Neurosci.* **12** 265
- [28] Stafstrom, C. E., & Carmant, L. 2015 Seizures and epilepsy: an overview for neuroscientists. *Cold Spring Harb. Perspect. Med.* a022426.
- [29] Phulera S, Zhu H, Yu J, Claxton DP, Yoder N, Yoshioka C, Gouaux E. 2018 Cryo-EM structure of the benzodiazepine-sensitive $\alpha 1\beta 1\gamma 2\delta$ trimeric GABAA receptor in complex with GABA. *Elife.* **Jul 25**;7:e39383.
- [30] Zhu S, Noviello C M, Teng J, Walsh R M Jr, Kim J J and Hibbs R E 2018 Structure of a human synaptic GABAA receptor *Nature* **559** 67–72
- [31] Miller PSM,S; Malinauskas T; Kotecha A; Rao S; Chavali S; Colibus LD; Pardon E; Hannan S; Scott S; Sun Z; Frenz B; Klesse G; Li S; Diprose JM; Siebert CA; Esnouf RM; DiMaio F; Tucker SJ; Smart TG; Steyaert J; Badu MM; Sansom MSP; Huiskonen JT; Aricescu AR, Heteromeric GABAA receptor structures in positively-modulated active states. *BioRxiv* 2018
- [32] Masiulis S, Desai R, Uchański T, Serna Martin I, Lavery D, Karia D, Malinauskas T, Zivanov J, Pardon E, Kotecha A, Steyaert J, Miller K W and Aricescu A R 2019 GABAA receptor signalling

- mechanisms revealed by structural pharmacology *Nature* **565** 454–9
- [33] Sun, C., Zhu, H., Clark, S., & Gouaux, E. 2023 Cryo-EM structures reveal native GABAA receptor assemblies and pharmacology. *Nature*, 622(7981), 195–201.
- [34] Kim J J, Gharpure A, Teng J, Zhuang Y, Howard R J, Zhu S, Noviello C M, Walsh R M Jr, Lindahl E and Hibbs R E 2020 Shared structural mechanisms of general anaesthetics and benzodiazepines *Nature* **585** 303–8
- [35] Laverty, D., Desai, R., Uchański, T., Masiulis, S., Stec, W. J., Malinauskas, T., Zivanov, J., Pardon, E., Steyaert, J., Miller, K. W., & Aricescu, A. R. 2019 Cryo-EM structure of the human $\alpha 1\beta 3\gamma 2$ GABAA receptor in a lipid bilayer. *Nature*, **565**(7740), 516–520.
- [36] Kim, J. J., & Hibbs, R. E. 2021 Direct Structural Insights into GABAA Receptor Pharmacology. *Trends Biochem. Sci.* **46**(6), 502–517.
- [37] Essrich C, Lorez M, Benson J A, Fritschy J M and Lüscher B 1998 Postsynaptic clustering of major GABAA receptor subtypes requires the gamma 2 subunit and gephyrin *Nat. Neurosci.* **1** 563–71
- [38] Schweizer C, Balsiger S, Bluethmann H, Mansuy I M, Fritschy J M, Mohler H and Lüscher B 2003 The gamma 2 subunit of GABA(A) receptors is required for maintenance of receptors at mature synapses *Mol. Cell. Neurosci.* **24** 442–50
- [39] Boileau, A. J., Pearce, R. A., & Czajkowski, C. (2010). 2010 The short splice variant of the gamma 2 subunit acts as an external modulator of GABA(A) receptor function. *J. Neurosci. Off. J. Soc. Neurosci.*
- [40] De Blas A. L. (1996). Brain GABAA receptors studied with subunit-specific antibodies. *Molecular neurobiology*, 12(1), 55–71. 1996 Brain GABAA receptors studied with subunit-specific antibodies. *Blas L* **12** 55–71
- [41] Chandra D, Korpi E R, Miralles C P, Blas A L and Homanics G E 2005 GABAA receptor gamma 2 subunit knockdown mice have enhanced anxiety-like behavior but unaltered hypnotic response to benzodiazepines *BMC Neurosci.* **6** 30
- [42] Ren Z, Sahir N, Murakami S, Luellen B A, Earnheart J C, Lal R, Kim J Y, Song H and Luscher B 2015 Defects in dendrite and spine maturation and synaptogenesis associated with an anxious-depressive-like phenotype of GABAA receptor-deficient mice *Neuropharmacology* **88** 171–9
- [43] Reid C A, Kim T, Phillips A M, Low J, Berkovic S F, Luscher B and Petrou S 2013 Multiple molecular mechanisms for a single GABAA mutation in epilepsy *Neurology* **80** 1003–8
- [44] Warner T A, Shen W, Huang X, Liu Z, Macdonald R L and Kang J Q 2016 Differential molecular and behavioural alterations in mouse models of GABRG2 haploinsufficiency versus dominant negative mutations associated with human epilepsy *Hum Mol Genet* **25** 3192–207
- [45] McDonald B J and Moss S J 1994 Differential phosphorylation of intracellular domains of gamma-aminobutyric acid type A receptor subunits by calcium/calmodulin type 2-dependent protein kinase and cGMP-dependent protein kinase *J. Biol. Chem.* **269** 18111–7
- [46] Nani F, Bright D P, Revilla-Sanchez R, Tretter V, Moss S J and Smart T G 2013 Tyrosine phosphorylation of GABAA receptor $\gamma 2$ -subunit regulates tonic and phasic inhibition in the thalamus *J. Neurosci. Off. J. Soc. Neurosci.* **33** 12718–27
- [47] Martenson J S, Yamasaki T, Chaudhury N H, Albrecht D and Tomita S 2017 Assembly rules for GABAA receptor complexes in the brain *eLife* **6** 27443
- [48] Oflaz F E, Son Ç D and Arslan A 2019 Oligomerization and cell surface expression of recombinant GABAA receptors tagged in the δ subunit *J. Integr. Neurosci.* **18** 341–50
- [49] Christie S B, Li R W, Miralles C P, Yang B- and Blas A L 2006 Clustered and non-clustered GABAA receptors in cultured hippocampal neurons *Mol. Cell. Neurosci.* **31** 1–14
- [50] Arslan A, Engelhardt J and Wisden W 2014 Cytoplasmic domain of δ subunit is important for the extra-synaptic targeting of GABAA receptor subtypes *J. Integr. Neurosci.* **13** 617–31
- [51] Alldred M J, Mulder-Rosi J, Lingenfelter S E, Chen G and Lüscher B 2005 Distinct gamma2 subunit domains mediate clustering and synaptic function of postsynaptic GABAA receptors and gephyrin *J. Neurosci. Off. J. Soc. Neurosci.* **25** 594–603
- [52] Connolly CN, Krishek BJ, McDonald BJ, Smart TG, Moss SJ. 1996 Assembly and cell surface expression of heteromeric and homomeric gamma-aminobutyric acid type A receptors. *J Biol Chem* **271** 89–96.
- [53] Arslan, A. 2006 *Specifying molecular determinants of the subcellular targeting of synaptic and extrasynaptic GABA A receptors (Doctoral dissertation)*. (Germany: Ruprecht Karl University of Heidelberg)
- [54] Wu, X., Wu, Z., Ning, G., Guo, Y., Ali, R., Macdonald, R. L., De Blas, A. L., Luscher, B., & Chen, G. 2012 γ -Aminobutyric acid type A

- (GABAA) receptor α subunits play a direct role in synaptic versus extrasynaptic targeting. *J. Biol. Chem.* **287**(33), 27417–27430.
- [55] Ghit A, Assal D, Al-Shami A S and Hussein D E E 2021 GABAA receptors: structure, function, pharmacology, and related disorders *J. Genet. Eng. Biotechnol.* **19** 123
- [56] Olsen R. W. (2018). GABAA receptor: Positive and negative allosteric modulators. *Neuropharmacology*, **136**(Pt A), 10–22.
- [57] Baulac S, Huberfeld G, Gourfinkel-An I, Mitropoulou G, Beranger A, Prud'homme J F, Baulac M, Brice A, Bruzzone R and LeGuern E 2001 First genetic evidence of GABA(A) receptor dysfunction in epilepsy: a mutation in the gamma2-subunit gene *Nat. Genet.* **28** 46–8
- [58] Kang J Q, Shen W, Zhou C, Xu D and Macdonald R L 2015 The human epilepsy mutation GABRG2(Q390X) causes chronic subunit accumulation and neurodegeneration *Nat Neurosci* **18** 988–96
- [59] Shen D, Hernandez C C, Shen W, Hu N, Poduri A, Shiedley B, Rotenberg A, Datta A N, Leiz S, Patzer S, Boor R, Ramsey K, Goldberg E, Helbig I, Ortiz-Gonzalez X R, Lemke J R, Marsh E D and Macdonald R L 2017 De novo GABRG2 mutations associated with epileptic encephalopathies *Brain J. Neurol.* **140** 49–67
- [60] Todd E, Gurba K N, Botzolakis E J, Stanic A K and Macdonald R L 2014 GABAA receptor biogenesis is impaired by the γ 2 subunit febrile seizure-associated mutation, GABRG2(R177G) *Neurobiol. Dis.* **69** 215–24
- [61] Bouthour W, Leroy F, Emmanuelli C, Carnaud M, Dahan M, Poncer J C and Lévi S 2012 A human mutation in Gabrg2 associated with generalized epilepsy alters the membrane dynamics of GABAA receptors *Cereb. Cortex* **22** 1542–53
- [62] Huang X, Hernandez C C, Hu N and Macdonald R L 2014 Three epilepsy-associated GABRG2 missense mutations at the γ +/ β - interface disrupt GABAA receptor assembly and trafficking by similar mechanisms but to different extents *Neurobiol. Dis.* **68** 167–79
- [63] Frugier G, Coussen F, Giraud M F, Odessa M F, Emerit M B, Boué-Grabot E and Garret M 2007 A gamma 2(R43Q) mutation, linked to epilepsy in humans, alters GABAA receptor assembly and modifies subunit composition on the cell surface *J. Biol. Chem.* **282** 3819–28
- [64] Löscher, W., & Rogawski, M. A. 2012 How theories evolved concerning the mechanism of action of barbiturates. *Epilepsia*, 53 Suppl 8, 12–25.
- [65] Richardson R, Petrou S, Bryson A. 2024 Established and emerging GABAA receptor pharmacotherapy for epilepsy *Frontiers in Pharmacology*.
- [66] Kim, J. J., Gharpure, A., Teng, J., Zhuang, Y., Howard, R. J., Zhu, S., Noviello, C. M., Walsh, R. M., Jr, Lindahl, E., & Hibbs, R. E. 2020 Shared structural mechanisms of general anaesthetics and benzodiazepines. *Nature*, **585**(7824), 303–308.
- [67] Scheffer, I. E., Berkovic, S. et al. ILAE classification of the epilepsies: Position paper of the ILAE Commission for Classification and Terminology.
- [68] Knowles, J. K., Helbig, I., Metcalf, C. S., Lubbers, L. S., Isom, L. L., Demarest, S., Goldberg, E. M., George, A. L., Jr, Lerche, H., Weckhuysen, S., Whittemore, V., Berkovic, S. F., & Lowenstein, D. H. 2022 Precision medicine for genetic epilepsy on the horizon: Recent advances, present challenges, and suggestions for continued progress. *Epilepsia* **63** 2461–75
- [69] Katsonis, P., Wilhelm, K., Williams, A., & Lichtarge, O. 2022 Genome interpretation using in silico predictors of variant impact. *Hum. Genet.* **141**(10) 1549–77
- [70] Richards S, Aziz N, Bale S, Bick D, Das S, Gastier-Foster J, Grody W W, Hegde M, Lyon E, Spector E, Voelkerding K, Rehm H L and Committee A C M G L Q A 2015 Standards and guidelines for the interpretation of sequence variants: A joint consensus recommendation of the American College of Medical Genetics and Genomics and the Association for Molecular Pathology *Genet. Med. Off. J. Am. Coll. Med. Genet.* **17** 405–24
- [71] Katsonis P, Wilhelm K, Williams A and Lichtarge O 2022 Genome interpretation using in silico predictors of variant impact *Hum. Genet.* **141** 1549–77
- [72] Caswell R C, Gunning A C, Owens M M, Ellard S and Wright C F 2022 Assessing the clinical utility of protein structural analysis in genomic variant classification: experiences from a diagnostic laboratory *Genome Med.* **14** 77
- [73] Akbar F, Saleh R, Kirmani S, Chand P, Mukhtiar K, Jan F, Kumar R and Ibrahim S 2022 Utility of genetic testing in pediatric epilepsy: Experience from a low to middle-income country *Epilepsy Behav. Rep.* **20** 100575
- [74] Johannesen K M, Nikanorova N, Marjanovic D, Pavbro A, Larsen L H G, Rubboli G and Møller R S 2020 Utility of genetic testing for therapeutic decision-making in adults with epilepsy *Epilepsia* **61** 1234–9

- [75] Landrum M J, Lee J M, Riley G R, Jang W, Rubinstein W S, Church D M and Maglott D R 2014 ClinVar: public archive of relationships among sequence variation and human phenotype *Nucleic Acids Res.* **42** 980–5
- [76] Ng P C and Henikoff S 2003 SIFT: Predicting amino acid changes that affect protein function *Nucleic Acids Res.* **31** 3812–4
- [77] Thomas P D, Campbell M J, Kejariwal A, Mi H, Karlak B, Daverman R, Diemer K, Muruganujan A and Narechania A 2003 PANTHER: a library of protein families and subfamilies indexed by function *Genome Res.* **13** 2129–41
- [78] Cargill M, Altshuler D, Ireland J, Sklar P, Ardlie K, Patil N, Shaw N, Lane C R, Lim E P, Kalyanaraman N, Nemesh J, Ziaugra L, Friedland L, Rolfe A, Warrington J, Lipshutz R, Daley G Q and Lander E S 1999 Characterization of single-nucleotide polymorphisms in coding regions of human genes *Nat. Genet.* **22** 231–8
- [79] Capriotti E, Calabrese R and Casadio R 2006 Predicting the insurgence of human genetic diseases associated to single point protein mutations with support vector machines and evolutionary information **22** 2729–34
- [80] Capriotti E, Calabrese R, Fariselli P, Martelli P L, Altman R B and Casadio R 2013 WS-SNPs&GO: a web server for predicting the deleterious effect of human protein variants using functional annotation *BMC Genomics* **3** 6
- [81] Pejaver V, Urresti J, Lugo-Martinez J, Pagel K A, Lin G N, Nam H J, Mort M, Cooper D N, Sebat J, Iakoucheva L M, Mooney S D and Radivojac P 2020 Inferring the molecular and phenotypic impact of amino acid variants with MutPred2 *Nat. Commun.* **11** 5918
- [82] Capriotti E, Fariselli P and Casadio R 2005 I-Mutant2.0: predicting stability changes upon mutation from the protein sequence or structure *Nucleic Acids Res.* **33** 306–10
- [83] Glaser F, Pupko T, Paz I, Bell R E, Bechor-Shental D, Martz E and Ben-Tal N 2003 ConSurf: identification of functional regions in proteins by surface-mapping of phylogenetic information **19** 163–4
- [84] Ashkenazy H, Erez E, Martz E, Pupko T and Ben-Tal N 2010 ConSurf 2010: calculating evolutionary conservation in sequence and structure of proteins and nucleic acids *Nucleic Acids Res.* **38** 529–33
- [85] Ashkenazy H, Abadi S, Martz E, Chay O, Mayrose I, Pupko T and Ben-Tal N 2016 ConSurf 2016: an improved methodology to estimate and visualize evolutionary conservation in macromolecules *Nucleic Acids Res.* **44** 344–50
- [86] Adzhubei I A, Schmidt S, Peshkin L, Ramensky V E, Gerasimova A, Bork P, Kondrashov A S and Sunyaev S R 2010 A method and server for predicting damaging missense mutations *Nat. Methods* **7** 248–9
- [87] Sigel E and Steinmann M E 2012 Structure, function, and modulation of GABA(A) receptors *J. Biol. Chem.* **287** 40224–31
- [88] Wang, H., Bedford, F. K., Brandon, N. J., Moss, S. J., & Olsen, R. W. 1999 GABA(A)-receptor-associated protein links GABA(A) receptors and the cytoskeleton. *Nature* **397(6714)**, 69–72.
- [89] Sayers, E. W., Barrett, T., Benson, D. A., Bolton, E., Bryant, S. H., Canese, K., Chetvernin, V., Church, D. M., DiCuccio, M., Federhen, S., Feolo, M., Fingerman, I. M., Geer, L. Y., Helmberg, W., Kapustin, Y., Landsman, D., Lipman, D. J., Lu, Z., Madden, T. L., Madej, T., ... Ye, J. 2011 Database resources of the National Center for Biotechnology Information. *Nucleic Acids Res.* D38-D51.
- [90] Stenson P D, Ball E V, Mort M, Phillips A D, Shiel J A, Thomas N S, Abeyasinghe S, Krawczak M and Cooper D N 2003 Human Gene Mutation Database (HGMD): 2003 update *Hum. Mutat.* **21** 577–81
- [91] Mottaz, A., David, F. P., Veuthey, A. L., & Yip, Y. L. 2010 Easy retrieval of single amino-acid polymorphisms and phenotype information using SwissVar. *Bioinforma. Oxf. Engl.* **26(6)**, 851-852.
- [92] Armstrong D R, Berrisford J M, Conroy M J, Gutmanas A, Anyango S, Choudhary P, Clark A R, Dana J M, Deshpande M, Dunlop R, Gane P, Gáborová R, Gupta D, Haslam P, Koča J, Mak L, Mir S, Mukhopadhyay A, Nadzirin N, Nair S and Velankar S 2020 PDBE: improved findability of macromolecular structure data in the PDB consortium *Nucleic Acids Res.* **48** 335–43
- [93] consortium Pdb-K B 2020 PDBE-KB: a community-driven resource for structural and functional annotations *Nucleic Acids Res.* **48** 344–53
- [94] Luscher B, Fuchs T and Kilpatrick C L 2011 GABAA receptor trafficking-mediated plasticity of inhibitory synapses *Neuron* **70** 385–409
- [95] Lorenz-Guertin J M and Jacob T C 2018 GABA type a receptor trafficking and the architecture of synaptic inhibition *Dev. Neurobiol.* **78** 238–70
- [96] Wong, L. W., Tae, H. S., & Cromer, B. A. 2015 Assembly, trafficking and function of $\alpha 1\beta 2\gamma 2$ GABAA receptors are regulated by N-terminal

- regions, in a subunit-specific manner. *Journal of neurochemistry*, 134(5), 819–832.
- [97] Lachance-Touchette P, Brown P, Meloche C, Kinirons P, Lapointe L, Lacasse H, Lortie A, Carmant L, Bedford F, Bowie D and Cossette P 2011 Novel $\alpha 1$ and $\gamma 2$ GABAA receptor subunit mutations in families with idiopathic generalized epilepsy *Eur. J. Neurosci.* **34** 237–49
- [98] Draguhn A, Verdorn T A, Ewert M, Seeburg P H and Sakmann B 1990 Functional and molecular distinction between recombinant rat GABAA receptor subtypes by Zn²⁺ *Neuron* **5** 781–8
- [99] Smart T G, Moss S J, Xie X and Haganir R L 1991 GABAA receptors are differentially sensitive to zinc: dependence on subunit composition *Br. J. Pharmacol.* **103** 1837–9
- [100] Kasaragod V B, Mortensen M, Hardwick S W, Wahid A A, Dorovykh V, Chirgadze D Y, Smart T G and Miller P S 2022 Mechanisms of inhibition and activation of extrasynaptic $\alpha\beta$ GABAA receptors *Nature* **602** 529–33
- [101] Glaser F, Pupko T, Paz I, Bell R E, Bechor-Shental D, Martz E and Ben-Tal N 2003 ConSurf: identification of functional regions in proteins by surface-mapping of phylogenetic information *Bioinformatics* **19** 163–4
- [102] Kelley L A, Mezulis S, Yates C M, Wass M N and Sternberg M J 2015 The Phyre2 web portal for protein modeling, prediction and analysis *Nat. Protoc.* **10** 845–58
- [103] Zhang Y and Skolnick J 2005 TM-align: a protein structure alignment algorithm based on the TM-score *Nucleic Acids Res.* **33** 2302–9
- [104] Zhang, Y., & Skolnick, J. 2004 Scoring function for automated assessment of protein structure template quality. *Proteins*
- [105] Carugo O and Pongor S 2001 A normalized root-mean-square distance for comparing protein three-dimensional structures *Protein Sci. Publ. Protein Soc.* **10** 1470–3
- [106] Roy A, Kucukural A and Zhang Y 2010 I-TASSER: a unified platform for automated protein structure and function prediction *Nat. Protoc.* **5** 725–38
- [107] Yang J and Zhang Y 2015 Protein Structure and Function Prediction Using I-TASSER *Curr. Protoc. Bioinforma.* **52** 5 8 1-5 8 15
- [108] Colovos C and Yeates T O 1993 Verification of protein structures: patterns of nonbonded atomic interactions *Protein Sci. Publ. Protein Soc.* **2** 1511–9
- [109] Pettersen E F, Goddard T D, Huang C C, Couch G S, Greenblatt D M, Meng E C and Ferrin T E 2004 UCSF Chimera—a visualization system for exploratory research and analysis *J. Comput. Chem.* **25** 1605–12
- [110] Hernandez C C, Tian X, Hu N, Shen W, Catron M A, Yang Y, Chen J, Jiang Y, Zhang Y and Macdonald R L 2021 Dravet syndrome-associated mutations in GABRA1, GABRB2 and GABRG2 define the genetic landscape of defects of GABAA receptors *Brain Commun.* **3** 033
- [111] Maillard P Y, Baer S, Schaefer É, Desnous B, Villeneuve N, Lépine A, Fabre A, Lacoste C, El Chehadeh S, Piton A, Porter L F, Perriard C, Wardé M A, Spitz M A, Laugel V, Lesca G, Putoux A, Ville D, Mignot C and Milh M 2022 Molecular and clinical descriptions of patients with GABAA receptor gene variants (GABRA1, GABRB2, GABRB3, GABRG2): A cohort study, review of literature, and genotype-phenotype correlation *Epilepsia* **63** 2519–33
- [112] Kang J Q and Macdonald R L 2016 Molecular Pathogenic Basis for GABRG2 Mutations Associated With a Spectrum of Epilepsy Syndromes, From Generalized Absence Epilepsy to Dravet Syndrome *JAMA Neurol.* **73** 1009–16
- [113] Yang Y, Niu X, Cheng M, Zeng Q, Deng J, Tian X, Wang Y, Yu J, Shi W, Wu W, Ma J, Li Y, Yang X, Zhang X, Jia T, Yang Z, Liao J, Sun Y, Zheng H, Sun S and Zhang Y 2022 Phenotypic Spectrum and Prognosis of Epilepsy Patients With GABRG2 Variants *Front. Mol. Neurosci.* **15** 809163
- [114] Zou F, McWalter K, Schmidt L, Decker A, Picker J D, Lincoln S, Sweetser D A, Briere L C, Harini C, Undiagnosed Diseases Network M, Marsh E, Medne L, Wang R Y, Leydiker K, Mower A, Visser G, Cuppen I, Gassen K L, Smagt J, Yousaf A and McKnight D 2017 Expanding the phenotypic spectrum of GABRG2 variants: a recurrent GABRG2 missense variant associated with a severe phenotype *J. Neurogenet.* **31** 30–6
- [115] Hernandez C C and Macdonald R L 2019 A structural look at GABAA receptor mutations linked to epilepsy syndromes *Brain Res.* **1714** 234–47
- [116] Mele M, Costa R O and Duarte C B 2019 Alterations in GABAA-Receptor Trafficking and Synaptic Dysfunction in Brain Disorders *Front. Cell. Neurosci.* **13** 77
- [117] Arslan A 2023 Pathogenic variants of human GABRA1 gene associated with epilepsy: A computational approach *Heliyon* **9**
- [118] Köhler S, Gargano M, Matentzoglou N, Carmody L C, Lewis-Smith D, Vasilevsky N A, Danis D, Balagura G, Baynam G, Brower A M, Callahan T J, Chute C G, Est J L, Galer P D, Ganesan S, Griese M, Haimel M, Pazmandi J, Hanauer M, Harris N L

and Robinson P N 2021 The Human Phenotype Ontology in 2021 *Nucleic Acids Res.* **49** 1207–17

- [119] Rácz, A., Galvis-Montes, D. S., Borger, V., Becker, A. J., & Pitsch, J. 2024 Focused review: Clinico-neuropathological aspects of late onset epilepsies: Pathogenesis. *Seizure*, S1059-1311(24)00182-1.
- [120] Trowbridge, S., Poduri, A., & Olson, H. 2021 Early diagnosis and experimental treatment with fenfluramine via the Investigational New Drug mechanism in a boy with Dravet syndrome and recurrent status epilepticus. *Epileptic Disord. Int. Epilepsy J. Videotape* 954–6

Assessing the Acoustic Comfort Conditions of a Historical Mosque: Pergamon Great Mosque

Fatma YELKENCİ SERT^{1*}, Özgül YILMAZ KARAMAN²

^{1,2}Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye

(Alınış / Received: 24.11.2023, Kabul / Accepted: 20.11.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Keywords

Mosque acoustics,
Cultural heritage,
Objective acoustical
parameters,
Reverberation time.

Abstract: The acoustics of historical mosques are essential cultural heritages that should be protected as carefully as their architectural features. The Pergamon Great Mosque is one of the few large-volume historical worship buildings nearby. Some researchers, especially historians, have studied this mosque. Since the acoustic comfort conditions of the mosque have not yet been studied, the analysis of objective acoustic parameters in the mosque according to ISO 3382 led to the study. The article aims to document its acoustics as an intangible cultural heritage and to analyze the current acoustic conditions of the mosque through background noise levels, T30, D50, C80, STI, and SPLA parameters. When the measurement results are compared with optimum values, it is revealed that the mosque is suitable for music functions. Moreover, the parameter values related to speech are also close to the optimum values. The reason for this situation can be explained by the fact that the renovations have not changed the original physical environment of the mosque. The SPL-A measured at the receiver points are close to each other (except for the women's worship area), and it is thought that the curvilinear forms used on the upper cover and the niches on the walls have a positive effect on the homogeneous distribution.

Tarihi Bir Caminin Akustik Konfor Koşullarının Değerlendirilmesi; Bergama Ulu Cami

Anahtar Kelimeler

Cami akustiği,
Kültürel miras,
Nesnel akustik
parametreler,
Yansım süresi

Öz: Günümüzde tarihi camilerin mimari özellikleri kadar ana ibadet mekânı olarak iç ortam hacimlerinin akustik özellikleri de özenle korunması beklenen önemli bir kültürel miras olarak kabul edilmektedir. Bergama Ulu Cami, bulunduğu bölgedeki az sayıdaki büyük hacimli tarihi ibadet yapılarından biridir. Başta tarihçiler olmak üzere çoğu araştırmacı bu cami üzerinde çalışmalar gerçekleştirdiği ve cami hacminin akustik konfor koşullarını belgeleyen henüz bir çalışma olmadığı tespit edilmiştir. Caminin boyutu, tarihsel önemi ve günümüzde özgün işlevinde hala kullanılabilir durumda olması yapının akustik özelliklerinin somut olmayan kültürel miras bağlamında belgelenmesine yol açmıştır. Bu çalışma, cami hacminin akustik ortamını belgelemek ve mevcut akustik koşullarını ISO 3382'ye göre objektif akustik parametreler (arka plan gürültü seviyeleri, T30, D50, C80, STI, SPLA) aracılığıyla analiz etmeyi amaçlamaktadır. Ölçüm ile elde edilen ortalama parametre değerleri optimum değerlerle karşılaştırıldığında caminin müzik işlevli ritüeller için uygun koşullarda olduğu görülmektedir. Ayrıca konuşma işlevi ile ilgili parametre değerleri de optimum değerlere yakındır. Bu durum cami için yapılan yenileme çalışmalarının caminin özgün mimarisine ve hacimde kullanılan yapı elemanları özelliklerinde büyük değişikliklere sebep olmamasıyla açıklanabilir. Alıcı noktalarda ölçülen SPL-A'lar birbirine yakın (kadın ibadet alanı hariç) olup, üst örtüde kullanılan eğrisel formlar ve duvarlardaki nişlerin homojen dağılıma olumlu etki yaptığı düşünülmektedir.

* Corresponding author: fatma.yelkenci@deu.edu.tr

1. Introduction

Mosques are one of the essential building typologies that describe the culture, traditions and history of the region in which they are located. The acoustic properties of historical mosques, considered part of cultural heritage, are also important. The acoustic properties of the historical volume also affect the overall perception of the indoor environment [1].

The idea that acoustics are a cultural heritage, especially in historical worship buildings, has become widespread in recent years [1, 2]. In the literature, many studies investigate the acoustic characteristics of mosques [3, 4, 5] and focus on the relationship between worship building as a 'tangible' cultural heritage and its acoustics as an 'intangible' cultural heritage [6, 7]. An acoustic model of a historical cathedral on the grounds was created in a different study. It did not show the physical traces of the period in which it was built, and even the sound of the cathedral was virtually recreated using "acoustic archaeology". With this work, the sound of the original acoustic environment of the cathedral, which is one of the lost or forgotten intangible cultural heritage values, was restored [8].

From an acoustic point of view, it is seen that the speech function is at the forefront in mosques, but some rituals also have musical requirements. In mosques, giving sermons on Fridays and holidays constitute the speech function, while the hymns sung on some special religious days constitute the musical function. T30, C80, D50, and STI are important objective acoustic parameters to evaluate for sacred buildings, especially mosques, due to the performance of speech and musical rituals. If acoustic problems, such as high background noise levels and long or short reverberation time, occur in mosques, the quality of auditory comfort conditions will be negatively affected. As a result, the consequences of acoustic defects hinder the sense of unity or wholeness that is intended to be created during religious rituals. Therefore, while documenting the acoustic environments of historical mosques, evaluating the environmental conditions in terms of user comfort is important.

When the literature is examined, it is seen that acoustic data can be ignored in conservation studies. Studies in the field of acoustics on Mimar Sinan mosques emphasize the importance of this issue [9, 10, 11]. In Süleymaniye Mosque, it was determined that the closure of the sebus (clay pots) in the dome during repairs caused long reverberation times at low frequencies [10]. In addition, it is thought that the renewal of the plaster applied to the surfaces, which was not in accordance with the original, caused longer reverberation times to be recorded than the original situation [11]. CAHRISMA, one of the leading studies on this subject (Conservation of Acoustic Heritage

through Identification and Revitalization of Acoustic Characteristics of Sinan Mosques) Research Project (2000-2003) emphasizes that the acoustics of old buildings are part of cultural heritage. The project aims to identify, revitalize and preserve the visual + acoustic heritage [12]. In another study, it was revealed that acoustic parameters alone are not sufficient in the evaluation of the auditory environment of mosques, and that acoustic parameters should be considered as a whole with the geometric parameters and material properties of mosques. In this context, an acoustic classification is proposed based on the architectural features that are expected to affect the acoustic characters of the main worship spaces of the historical mosques in the Aegean Region [13].

When the researches about the acoustic evaluation of religious buildings are examined, it is seen that church buildings are predominantly the subject of study. There are many studies documenting acoustical features and examining the relationship between the acoustic environment in religious buildings and architectural design [1, 14, 15]. In addition to documenting the acoustic properties of churches, the effects of architectural elements and volume formations on acoustics have been studied [16, 17, 18, 19, 20]. Although internationally recognized reference parameter ranges/values have been defined for church buildings, studies are ongoing for mosque-specific assessments.

Bergama, in Turkey, has many cultural heritages, especially worship spaces, which belong to different historical periods. Bergama Great Mosque is the largest mosque structure in Bergama. Today, in addition to being used for religious purposes by a large community, it hosts many visitors throughout the year for touristic purposes. This paper mainly aims to analyze the Bergama Great Mosque as a case, which is architecturally well preserved from past to present, outlining its acoustic characteristics.

2. Material and Method

2.1. Mosque description

As understood from the Arabic inscription of the building, the mosque was built by Bayezid I between 1398 and 1399 [21]. The mosque has a multi-unit basilical scheme. During the Ottoman period, starting from the 15th century, the central plan typology became widespread in mosque architecture, and the construction of mosques with multi-unit basilical plans decreased. According to some sources, it is stated that the Pergamon Great Mosque is the last representative of the multi-unit basilical plan typology [21].

The main worship space, which has a longitudinal rectangular plan, is covered with a top cover using a

combination of domes and vaults (Figure 1). The dimensions of the plan are 21.75x 27.85 m, and the height from the floor to the pulley is 11.35m. The volume of the mosque is 6450 m³. The rectangular plan is divided into three aisles perpendicular to the mihrab wall. The three domes on the mihrab axis have a diameter of approximately 7.5 m. The height of the middle dome (4.95 m) is about 60 cm higher than the others (4.35 m). The side aisles are covered with vaults. The women's mahfil is in the southern part of the mosque and is supported by wooden pillars. It is visually separated from the main prayer hall by perforated wooden surfaces. The mimbar is made of marble, and the preaching platform is made of wood. The mihrab niche was made by using plaster. The frame surrounding the mihrab niche contains many floral motif decorations. The mosque is illuminated by non-wide opening windows (Picture 1).

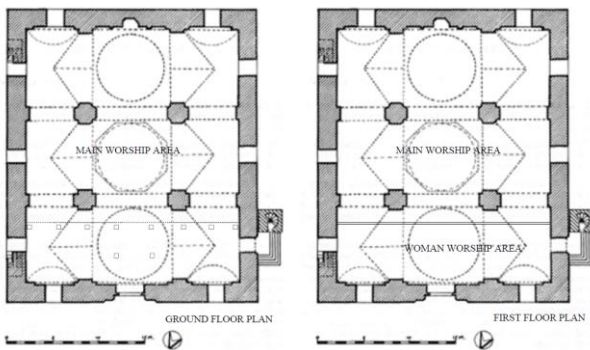


Figure 1. The plan of Bergama Great Mosque [21]



Picture 1. Main worship area and exterior view of the mosque

As a result of the examinations, it is known that the mosque has not received any major intervention except for minor repairs due to earthquakes and other disasters that occurred over time. According to the some researches, the mosque was repaired in 1905 and 1949. Due to the decay of the forged tension irons used in the past to prevent the arches from opening and to connect the building, the irons were removed in the last repair and putrels were put in their place. In 1905, the inscription on the door and the ornaments on the mihrab were uncovered. It is known that the plasters were renewed during the repair works. The minaret, which was demolished in 1949, was reconsidered in 1956 and was demolished and rebuilt during the repairs in 1970-1971. The fountain was also added after 1949. It is stated that the mahfil in the north of the harim was rebuilt during the repairs.

Therefore, it is thought that the women's worship area was also used in the earlier periods of the mosque [22]. It can be seen that the original physical environment of the building's interior has been preserved from past to present.

2.2. Field measurement method

Religious rituals take place in mosques where intelligibility of speech and clarity of music are important. The rituals in mosques include the imam's sermon, the reading of the sermon, the hymn recited on important religious days and individual and collective acts of prayer. For this study, the field measurement was based on the prayer ritual and the positions and heights of the imam, and worshippers were adjusted in accordance with this scenario. The prayer ritual can be performed collectively with the congregation or individually. During the congregational ritual, the imam (the source) recites verses and suras from the Qur'an and leads the congregation in prostration, giving commands at regular intervals. Throughout the entire act of prayer, the imam stands facing the mihrab. The congregation performs the ritual, sometimes standing and sometimes sitting on their knees, in accordance with the requirements of the prayer. Objective acoustic parameter values were obtained with the acoustic field measurement performed in the mosque following ISO 3382-1:2010 [23]. Dirac Room Acoustics Software Type 7841 v.6 is used to assess the measured impulse response from receiver points. One preamplifier, one power amplifier, one dodecaedric speaker, one microphone and a microphone tripod were also used in the field measurement. A total of 16 receiver points (R1- R16) were determined for the acoustic measurement. 15 of them are located in the main worship area, and the last one is located in the women's worship area. For each receiver point, the microphone is placed at 0.85 m, considering the ear level of the worshipper sitting on the ground. The front of the mihrab was determined as the omnipower sound source point at the height of 1.50 m, considering the standing Imam position (Figure 2) (Picture 2).

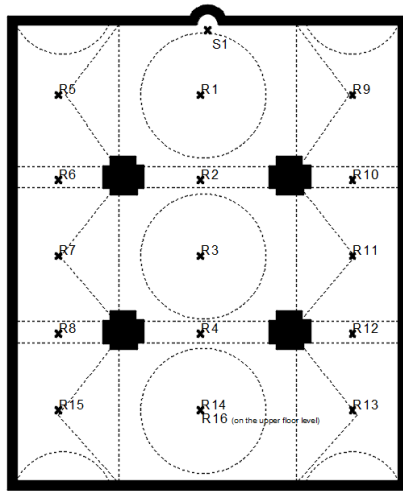


Figure 2. Locations of the sound source and receiver on the plan view of the mosque (S1; Sound source, R1-R16; Receiver points)



Picture 2. The location of R2 and R16

The evaluations between the original condition of the mosque at the time it was built (the historical plastered condition of surfaces such as walls, domes, etc.) and its current condition are not included in the scope of the study. Evaluation studies of both conditions of the mosque are targeted as future studies.

3. Results (T30, C80, D50 and STI Data: Comparison with the Literature)

T30, C80, D50, A-weighted sound levels (SPL-A) and STI are the most definable objective parameters associated with mosques. Related objective acoustical parameters are assessed according to the results of field measurements inside the mosque.

3.1 T30 (s)

Based on reverberation time information, a quick preliminary assessment of the suitability of a space for music or speech can be made. Because of this reason, reverberation time remains one of the most valuable measurable quantities for room acoustics [24]. In this building, the average T30 value in mid frequencies is 2.04 s. The minimum value of the average T30 is 1.91 s at R6, and the maximum is 2.16 s at R7. While T30

average values are obtained close to the recommended ranges for music functions, they were found to be high for speech (Figure 3). It is observed that average T30 values decrease from low to high frequencies. This may have been caused by the fact that carpet, a material with high sound absorption at high frequencies in volume, and a different insulation layer underneath were applied to the floor, one of the mosque's most extensive surfaces.

Creating a warm sound environment for musical rituals is also crucial for mosques. A parameter called bass ratio is used to evaluate the warmth in volumes. This ratio, which is obtained by dividing the T30 values in the low frequencies (125 Hz+ 250 Hz) by the T30 values in the mid frequencies (500Hz+ 1kHz), is expected to be greater than 1.2 according to Egan and is expected to be in the range of 1.1 to 1.45 for volumes with reverberation time between 1.8 and 2.2 s, according to Beranek [25, 26]. According to Long, achieving a rising reverberation time at very low frequencies is difficult due to the weight and thickness of the materials required. High bass reverberation is a beneficial solution for volumes used for unreinforced music but is not necessarily desirable in spaces where the low frequency is provided by loudspeakers [27]. The bass ratio for this mosque is calculated as 2.0, and according to the optimum value suggested by Egan, it can be interpreted that the warmth of the main worship area is suitable for musical religious rituals.

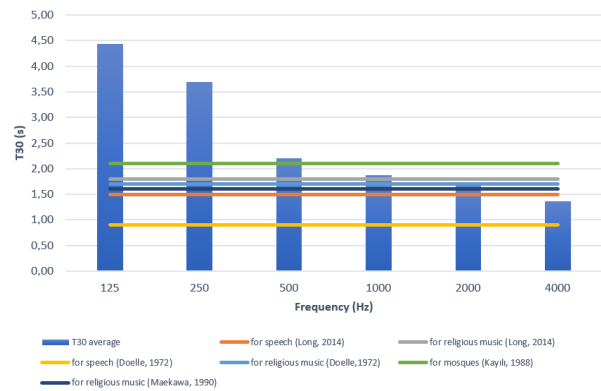


Figure 3. Measured reverberation times in octave bands and the recommended ranges [10, 27, 28, 29]

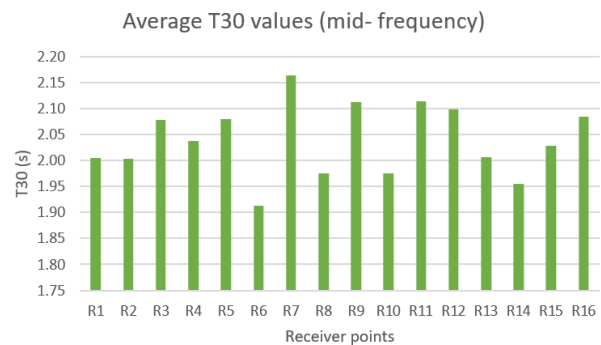


Figure 4. Measured average reverberation times at receiver points (R1-R16)

When the average reverberation time values according to the receiver points are analyzed, it is seen that the lowest T30 values are obtained at the receiver points (R6, R8, R10) under the arches located in the transition sections in the side sections and at point R14 under the women's worship area (Figure 4). It is thought that these differences in values may be due to reasons such as the form of the upper cover of the mosque, the height difference between the middle section and the side sections, and the fact that the transition sections are located behind the columns.

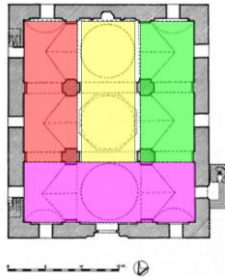


Figure 5. The parts of mosque to evaluate T30 values (■ left part, ■ center part, ■ right part, ■ back part)

It is felt that the side sections of the mosque are differentiated from the middle section with the effect of the columns, height differences and the form of the upper cover. In this context, in order to examine the distribution of reverberation time values within the scope of the study, the mosque was divided into 4 main parts: side parts (right / left), middle part (mihrab axis) and back part (women's worship area) (Figure 5).

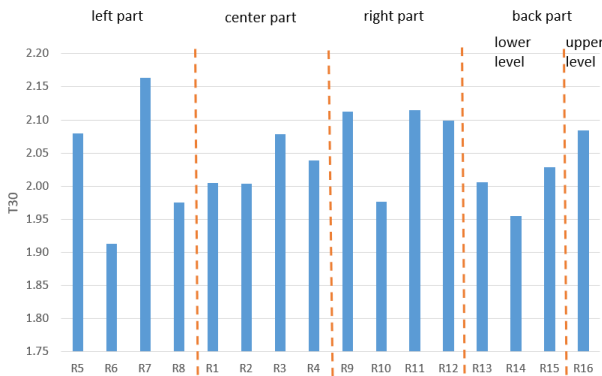


Figure 6. The average T30 values at receiver points

When Figure 6 is examined, it is seen that the T30 value distribution at the receiver points in the center of the mosque is close to each other and more balanced. In the left and right-side sections where the ceiling height decreases, T30 values show a more variable distribution.

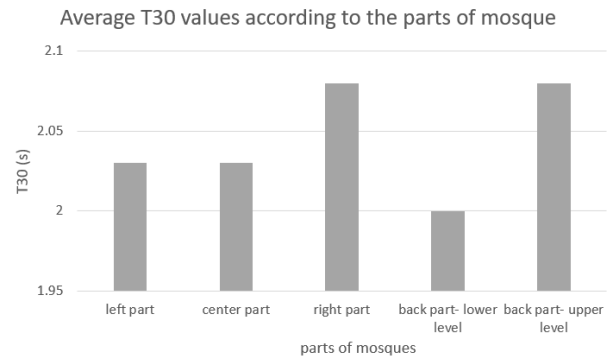


Figure 7. The average T30 values according to the parts of mosque

In Figure 7, the average T30 values for the four main sections of the mosque are calculated and compared with each other. According to the graph, the lowest T30 average was obtained in the back part- lower level, the highest in the right part and back part- upper level as 2.08 s, and the left and the middle parts were obtained at a value of 2.03 s. In general, as a result of obtaining average values close to each other, it can be said that the average T30 values in the parts of the mosque show a balanced distribution.

According to the measurement results, it can be said that the T30 values are high in the right section, but there is no difference that the ear can understand (JND), and in general, the reverberation times are distributed evenly in the main worship area. The use of recessed and protruding surfaces such as niches, domes and vaults on the upper cover and walls, which are common in historical mosques, distorts the mutual flat surfaces. This situation can be explained by the fact that it has a positive effect on the scattering and diffusion of sound and helps the balanced distribution of sound by creating an equivalent sound field at different receiver positions within the volume. T30 values close to each other in the center part (mihrab axis), a more irregular T30 distribution was obtained in the side stages (left and right parts). The reason for this is that the height of the side sections is less than the center section, the dome pulleys in the center section have windows and their surfaces are covered with glass, which has a high reflectivity value, and the receiver points behind the thick-section columns remain in the acoustic shadow areas, so T30 values are generally lower in the side sections than in the center section. The use of marble with high reflectivity value in the pulpit element in the right section can be considered to contribute to the increase in T30 values in that section. Although there is no difference (JND) that can be perceived by the ear between the receiver points R16 in the women's worship area covered with domes and vaults and R13, R14, R15 on the lower level, differences in T30 values were detected. The T30 value at R16 in the area covered with curvilinear elements was higher than the T30 values at the receiver points in the area covered with wood and flat surface on the lower floor. The increase in T30 values can be explained by the fact that curvilinear surfaces (dome/vault) increase the volume, and plastered

surfaces are more reflective than wooden surfaces. However, the Just Noticeable Difference (JND), which refers to the change that can be perceived by the listener in a sound field, is stated as 5% (0.1 s) for T30 in the literature [5]. According to the recommended JND value for T30, the T30 values obtained at different listener/prayer locations in the Bergama Great Mosque were below the 5% limit. Although there were differences in the T30 values obtained according to the receiver points, it can be said according to these values that the auditory perception did not change at different locations.

3.2 C80 (dB)

In the literature, the allowable C80 limits for listening to music at 500-1000-2000 Hz in the volumes are 1- (-4) dB [30] or 2 and (-4) range [31]. The average C80 for 500 Hz is -2.95 dB, the minimum value is -6.14 in the women's worship area (R16), and the maximum value is 5.37 dB close to mihrab (R1). The average C80 for 1000 Hz is -0.70 dB, while the minimum value is -5.49 at R16, and the maximum value is 4.89 dB at R1. The average C80 for 2000 Hz is -0.26 dB, while the minimum value is -3.94 at R16, and the maximum value is 4.92 dB at R1.

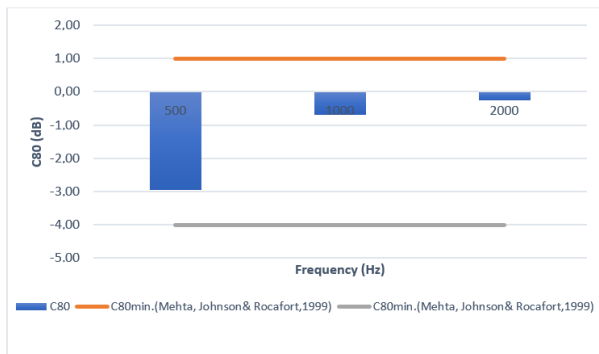


Figure 8. Measured clarity (C80) for 500- 1000- 2000 Hz and the recommended ranges [30]

According to the recommended ranges, the average C80 (clarity) values presented for the mosque in Figure 8 are considered acceptable. The obtained C80 values show that the desired otherworldly feeling in this mosque reaches the users. In the context of the obtained average C80 values, this mosque can be said to be able to give the feeling of being surrounded by music, which correlates with a sensation of “spaciousness”.

3.3 D50 (%)

Definition (D50) is an objective acoustic parameter related to speech, and higher D50 values are desired for better speech intelligibility in the volumes. The optimal range for D50 should be between 30% and 70% according to ISO3382-1 and greater than 20% for music and speech functions according to Templeton. [23, 32]. When the recommended values and measurement results are compared, the averages are

close to the lower limit but within the optimum range (Figure 9).

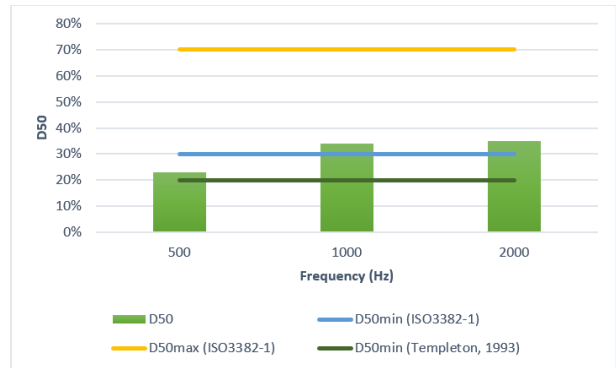


Figure 9. Measured definition (D50) for 500- 1000- 2000 Hz and the recommended ranges [23, 32]

3.4 STI

Mosques have rituals related to speech functions, such as Friday’s sermon on the minbar and giving information to the prayers on the pulpit. In these rituals, speech intelligibility is expected to be good. STI is an important objective acoustical parameter to assess speech intelligibility in the volumes.

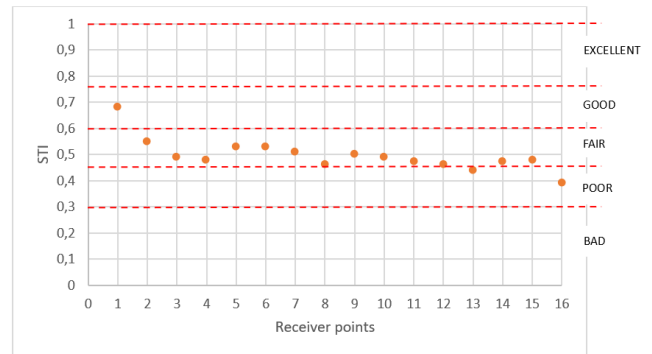


Figure 10. Average of STI values on the receiver points (R1-R16)

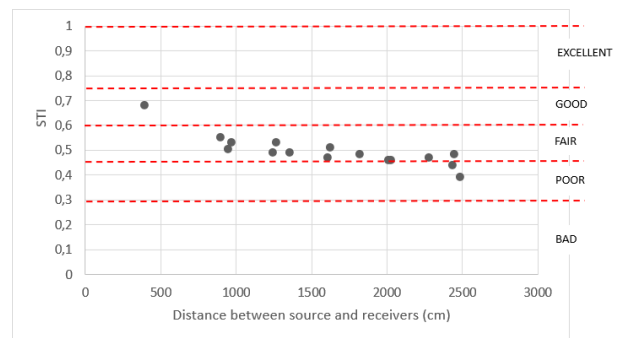


Figure 11. Average of STI values according to the distance to S1

In this mosque, the average STI value is measured as 0.5, which means the speech intelligibility is considered as fair. The minimum STI value in the mosque is 0.39 at the woman worship area (R16) while the maximum STI value is 0.68 at R1 in the front of mihrab (Figure 10). STI values decrease in each

corridor due to increasing distance to the source (Figure 11).

3.5 SPL-A (dBA)

Sound pressure level is the most widely used indicator of acoustic wave power and is related to the human perception of loudness [27]. This study aimed to evaluate the distribution in the main place of worship by measuring the sound pressure levels at the receiver points. The difference of SPL-A values measured at the receiver points should not exceed 10 dBA to have a balanced pressure distribution within the volume.

The SPL-A values at receiver points and their distance to the sound source are reported in Table 1. It shows the SPL-A values decrease with distance from the sound source in the main worship area. It is also observed that SPL-A values decrease at the receiver points located in the acoustic shadow area behind the columns and under the arches. The average SPL-A for this mosque is 72.0 dBA. The minimum value in the mosque is 68 dBA, and maximum value is 78.6 dBA. The difference in SPLA between minimum and maximum value is 10.6 dBA more than 10 dBA. This means that the sound pressure level within the volume is not homogeneous, and different perceptions may occur depending on the position of the prayer.

Table 1. The distance of each receiver points from the sound source position (S1)

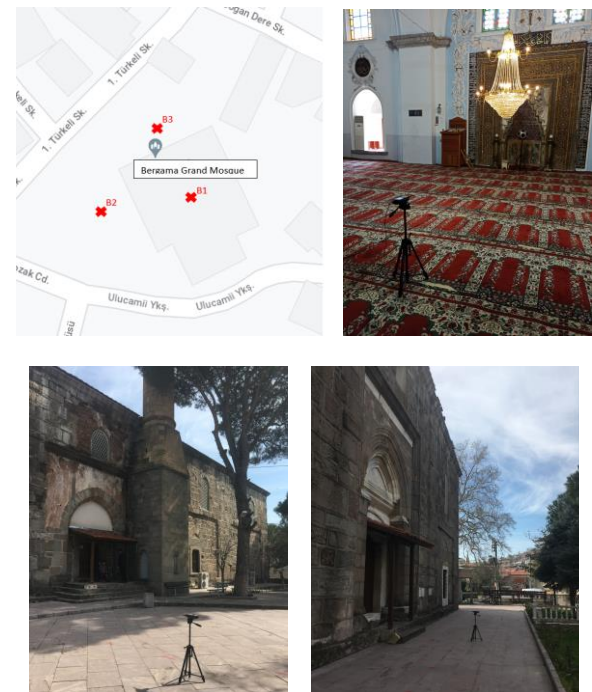
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Distance from S1 (m)	3.9	9	13.6	18.2	9.8	12.7	16.2	20.3
SPLA (DBA)	78.6	74.7	72.6	71.5	74.6	73.6	72.2	70.4
	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16
Distance from S1 (m)	9.5	12.5	16.1	20.2	24.4	22.8	24.5	24.9
SPLA (DBA)	72.7	73.5	71.3	70.2	69	69.9	69.1	68

3.6 Background Noise Level

Background noise level is mainly related to environmental noise factors around the building and the sound of mechanical equipment within the volume. For an activity in an enclosed volume to be easily understood, the background noise in the volume is expected to be below a certain limit. In the list of basic requirements determined by Doelle (1972) for the design of speech rooms, the statement that background noise levels should be low enough not to interfere with the listening environment is included. It is recommended that the highest noise levels be 25-30 dBA (NC15-20 in terms of noise criterion) for volumes with speech and/or music activities [4, 28]. Knudsen and Harris emphasized in their book that religious buildings need insulation from outside noise. They added the noise inside doesn't exceed 30 dB for religious buildings [33].

Background noise is related to environmental noise factors that will reach inside through the walls of the

building and noise factors inside the volume (mechanical equipment, human noise, etc.). In historical mosques, the sound insulation properties of building elements such as wall thicknesses, roofs, properties of windows and doors show positive features in the absorption of environmental noise into the interior volume. It is also important to consider the sound insulation properties of these building elements in repair works of historical mosques. Therefore, A-weighted sound levels (LAeq) were measured at 3 locations (two on the courtyard, one in the building) for this mosque using the Bruel & Kjaer sound level meter type 2250. (Picture 3) Internal and external measurements were made to understand the acoustic conditions around the mosque and to reveal the effect of the building envelope on the difference between the sound level inside and outside of the mosque. The background noise levels for inside and outside of the mosque are listed. (Table 2)



Picture 3. The locations of background noise level measurement points (B1, B2, B3)

Table 2. The results of background noise level measurements from inside and outside

	B1 (in the mosque)	B2 (on the courtyard)	B3 (on the courtyard)
Background Noise Levels (Dba)	24.1 dBA	47.9 dBA	48.7 dBA

According to the results, the mosque's background noise level was 24.1 dBA, within the optimum range. The noise levels measured in the courtyard (B2 and B3) are very close and 47.9 dBA, 48.7 dBA were obtained, respectively. The difference between inside and outside is approximately 24 dBA. The measured values are within the appropriate range because the

mosque is located far from the city center, surrounded by vehicle/pedestrian roads and low-rise residential buildings. In this mosque, design solutions such as wall thickness, window openings that are not too large, garden walls, trees, and building materials also help the interior have suitable background noise conditions.

4. Discussion and Conclusion

Bergama Great Mosque is a significant cultural heritage that needs to be protected, as it is a mosque that has remained almost unchanged in terms of architecture from the past to the present and represents the Ottoman period architecture when it was built. In this context, in addition to preserving the architectural features of the mosque as a tangible cultural heritage, documenting the acoustic environments of this building is also important in terms of intangible cultural heritage. Therefore, in the present study, the acoustic properties of the Bergama Great Mosque were documented by field measurement and the results were evaluated by comparing them with the values recommended in the literature. Parameters T30, C80, D50, STI, SPLA, and Background noise levels were measured according to ISO 3382, and the average values per octave band are described in the tables.

The average T30 value in mid frequencies is obtained as 2.04 s, which shows the volume is suitable for the musical version of the Holy Quran. The average C80 for 500-1000-2000 Hz is -1.3 dB, which is within the acceptable range for both speech and music. The values of D50 vary between 23% and 35%, which are close to the lower recommended limit within the optimum range. The lowest STI values were obtained in areas where sound-receiver distances were over approximately 20 m due to lack of direct sound. Mosques usually have separate prayer areas for men and women, divided by perforated wooden surfaces or curtains. In the mosque in this study, the women's gallery is located on the upper floor and is separated from the main worship space by using wooden perforated surfaces and curtains. Therefore, the lowest STI and SPLA values were obtained in R16, which is located in this area.

Evaluations demonstrate that the interior of the mosque is suitable for rituals with music. When the volume for speech purposes is evaluated, the reverberation time values obtained are higher than the desired range, although they are not far from the recommended values. However, to create the desired aural environment by the user during speech-function rituals, arrangements are needed to increase the absorbing surfaces and reduce the reverberation time to the desired range. After adjustments for the speech function, if the volume remains dry for the musical rituals, sound reinforcement systems (existing in the current situation) can be arranged to satisfy the users

desired lively environment. On the other hand, in this study, the reverberation time was measured when the mosque was empty. A high T30 value has been obtained for the speech function. When the mosque is occupied, it is expected that the reverberation time will decrease and approach the recommended values, thanks to the sound absorptions of the users.

This study supports the documentation of the acoustic conditions of historical religious structures as intangible cultural heritage. Bergama Great Mosque, with its history of approximately 625 years, is one of Turkey's most important sacred buildings that has survived until today. It is aimed to document the aural environment of this mosque, which has been found to have well-preserved architectural form and volume characteristics, as a cultural heritage and to bring it into the literature. It is thought that the surfaces in the interior volume of the mosque, which have not undergone major changes in terms of architecture, have been renewed using up-to-date materials through maintenance and repair works. Since the carpet and plaster coverings of these surfaces are large surfaces, the mosque can be re-evaluated by applying the plaster and carpet absorbencies of the period when the mosque was built to these surfaces through acoustic simulation for the future of the study.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Elicio, L., Martellotta, F. 2015. Acoustics as a cultural heritage: The Case of Orthodox Churches and of the "Russian church" in Bari. *Journal of Cultural Heritage*, 16, 912–917.
- [2] Brezina, P. 2015. Measurement of Intelligibility and Clarity of the Speech in Romanesque Churches. *Journal of Cultural Heritage*, 16, 386–390.
- [3] Karabiber, Z. 2000. A New Approach to An Ancient Subject: Cahrisma Project. 7th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch-Partekirchen.
- [4] Sü Gül, Z., Çalışkan, M., Tavukçuoğlu, A. 2014. Geçmişten Günümüze Süleymaniye Camii Akustiği. *Megaron*, 9, 201–216.
- [5] Sü Gül, Z. and Çalışkan, M. 2013. Acoustical Design of Turkish Religious Affairs Mosque. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133 (5), 3404-3404.

- [6] Vecco, M. 2010. A Definition of Cultural Heritage: From the Tangible to the Intangible. *Journal of Cultural Heritage*, 11, 321-324.
- [7] Suarez, R., Alonso, A., Sendra, J. 2016. Archaeoacoustics of intangible cultural heritage: The sound of the Maior Ecclesia of Cluny. *Journal of Cultural Heritage*, 19, 567-572.
- [8] Suarez, R., Alonso, A., & Sendra, J. 2015. Intangible cultural heritage: The sound of the Romanesque cathedral of Santiago de Compostela. *Journal of Cultural Heritage*, 16, 239-243.
- [9] Ergin, N. 2008. The soundscape of sixteenth-century Istanbul mosques: architecture and Qur'an recital. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 67(2), 204-221.
- [10] Kayılı, M. 1988. Mimar Sinan'ın Camilerindeki Akustik Verilerin Değerlendirilmesi. *Mimarbaş Koca Sinan: Yaşadığı Çağ ve Eserleri*, 1, 545-555.
- [11] Sü Gül, Z. 2019. Acoustical impact of architectonics and material features in the lifespan of two monumental sacred structures. *Acoustics*, 1, (3), 493-516.
- [12] Yüksel, Z., Erdogan, S. 2005. Virtual Conservation of Acoustical Heritage: CAHRISMA and ERATO Projects. In *Forum Acusticum*. <http://www.conforg.fr/acoustics2008/cdrom/data/fa2005-budapest/paper/251-0.pdf>.
- [13] Yelkenci Sert, F., Yılmaz Karaman, Ö. 2022. Ege Bölgesi'ndeki Tarihi Camiler İçin Akustik Etkin Bir Sınıflandırma Önerisi. *Sanat Tarihi Dergisi*, 31(1), 91-121. <https://doi.org/10.29135/std.963410>.
- [14] Álvarez Morales, L., Girón, S., Galindo, M., Zamarreño, T. 2016. Acoustic environment of Andalusian cathedrals. *Building and Environment*, 103, 182-92.
- [15] Suárez, R., Alonso, A., Sendra, J. J. 2016. Study archaeoacoustics of intangible cultural heritage: The sound of the the Maior Ecclesia of Cluny. *Journal of Cultural Heritage*, 2016.
- [16] Martellotta, F., Morales, L. A. 2014. Virtual acoustic reconstruction of the church of Gesù in Rome: a comparison between different design options, *Forum Acusticum*.
- [17] Martellotta, F. 2009. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *Journal Acoustical Society of America*, 126, 3, 1175-1186.
- [18] P. R. Magrini, «Coupling Effects In Christian Churches: Preliminary Analysis Based On A Simple Theoretical Model And Some Experimental Result,» %1 içinde *Forum Acusticum*, Seville, 2002.
- [19] Berardi, U. 2014. "Simulation of acoustical parameters in rectangular churches", *Journal of Building Performance Simulation*, 7, 1, 1-16.
- [20] Desarnaulds, V., Carvalho, A. P., Monay, G. 2002. Church Acoustics and the Influence of Occupancy. *Building Acoustics*, 9, 1, 29-47.
- [21] Ersoy, B. 1988. Bergama Ulu Camii. *Sanat Tarihi Dergisi*, 4 (4), 57-66.
- [22] Bayatlı, O. 1956. Bergama Tarihinde Türk-İslâm Eserleri, İstanbul, 18-21.
- [23] TS EN ISO 3382-1: Akustik- Odaların Akustik Parametrelerinin Ölçülmesi. 2010. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- [24] Barron, M. 2010. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Spon Press, USA, p.489.
- [25] Egan, M. D. 1988. *Architectural Acoustics*. New York: McGraw-Hill.
- [26] B Beranek, L.L. 1996. *Concert and Opera Halls: How Rathey Sound*. Acoustical Society of America, Woodbury, New York.
- [27] Long, M. 2014. *Architectural acoustics*. Elsevier Academic Press, USA.
- [28] Doelle, L. 1972. *Environmental Acoustics*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [29] Maekawa Z. 1990. *Architectural and Environmental Acoustics*. Kyouritu-Shuppan, Japan.
- [30] Mehta, M., Johnson, J., Rocafort, J. 1999. *Architectural Acoustics Principles and Design*. Prentice-Hall, New Jersey.
- [31] Harris, C. M. 1997. *Handbook of Noise Control*. McGraw Hill.
- [32] Templeton, D. 1993. *Acoustics in the Built Environment: Advice for the Design Team*. Oxford: Butterworth.
- [33] Knudsen, V., Harris, C. 1967. *Acoustical Designing in Architecture*. John Wiley&Sons, New York

***Craterellus cornucopioides* Biyosorbanı ile Sulu Çözeltilerden Kongo Kırmızısı'nın Biyosorpsiyonu: Kinetik, İzotermal ve Termodinamik Çalışmalar**

Şirin Nuray ÇAKAR¹, ASLI GÖÇENOĞLU SARIKAYA^{2*}, Bilgen OSMAN³

^{1,2,3} Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

(Alınış / Received: 18.03.2024, Kabul / Accepted: 22.09.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Craterellus cornucopioides,
Kongo kırmızısı,
Biyosorpsiyon

Öz: Bu çalışmada yenilebilir bir mantar türü olan *Craterellus cornucopioides* biyokütlesinin sulu çözeltilerden Kongo kırmızısının biyosorpsiyonunda biyosorban olarak kullanımı araştırılmıştır. Biyosorbanın karakterizasyonu gerçekleştirildikten sonra biyosorpsiyon koşulları optimize edilmiştir. Elde edilen verilere göre 0,01 g biyosorban miktarı kullanılarak pH: 6,0'da 25 °C ortam sıcaklığında 2 saatlik biyosorpsiyonun ardından biyosorpsiyon kapasitesi (q_e) 150 mg/L başlangıç Kongo kırmızısı derişimi için $46,22 \pm 2,14$ mg/g olarak bulunmuştur. Biyosorpsiyonun doğasının aydınlatılabilmesi için biyosorpsiyon izotermi, biyosorpsiyon kinetiği ve termodinamiği araştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçların kullanılmasıyla hesaplanan fizikokimyasal parametrelere göre, biyosorpsiyon prosesinin Freundlich izoterm modeline ve yalancı-ikinci derece kinetik modele uygun olduğu görülmüştür. Proses ekzotermik karakterde ve kendiliğinden oluşmaktadır. Son olarak biyosorpsiyon-desorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve kullanılan biyosorbanın etkin bir şekilde tekrar kullanılabilirliği gösterilmiştir. Hazırlanan biyosorbanın sulu çözeltilerden boyar madde gideriminde ucuz, verimli ve etkin bir biyosorban olacağı düşünülmektedir.

Biosorption of Congo Red from Aqueous Solutions by *Craterellus cornucopioides* Biosorbent: Kinetic, Isothermal and Thermodynamic Studies

Keywords

Craterellus cornucopioides,
Congo red,
Biosorption

Abstract: In this study, the use of *Craterellus cornucopioides* biomass, an edible mushroom species, as a biosorbent for the biosorption of Congo red from aqueous solutions was investigated. After characterization of the biosorbent, biosorption conditions were optimized. according to the data obtained, using a biosorbent amount of 0,01 g, at pH: 6.0 at 25 °C ambient temperature after 2 hours of biosorption, the biosorption capacity (q_e) was found to be 46.22 ± 2.14 mg/g for an initial Congo red concentration of 150 mg/L. In order to investigate the nature of biosorption, biosorption isotherms, biosorption kinetics and thermodynamic parameters were calculated using the obtained experimental results, the biosorption process was fitted to Freundlich isotherm model and the pseudo-second-order kinetic model. The process is exothermic and occurs spontaneously. Finally, biosorption-desorption studies were carried out and it was shown that the biosorbent can be reused effectively. It is thought that the prepared biosorbent will be cheap, efficient and effective biosorbent for the removal of dyestuff from aqueous solutions.

*İlgili yazar: agocenoglu@uludag.edu.tr

1. Giriş

Boya ve boyar maddeler kozmetik, tekstil, gıda işleme, boya üretimi ve kağıt endüstrisi gibi bir çok endüstriyel uygulamada yaygın olarak

kullanılmaktadır. Endüstriyel alanda kullanılan boya ve boyar maddelerin birçoğu su kaynaklarını kirletmekte, kimyasal yapıları ve moleküler boyutları nedeniyle biyolojik olarak parçalanamamakta ve dünya çapında önemli bir çevresel sorun haline gelmektedir [1]. Bu kirleticilerin çoğu nehir ve

denizlerdeki besin zincirinin doğal döngüsünü bozmakta ve hem sucul kaynaklardaki canlılar hem de insanlar için ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır [2-4]. Boyalar katyonik (bazik boyalar), iyonik olmayan (dispers boyalar) ve anyonik (reaktif, direct ve asit boyalar) olarak sınıflandırılmaktadır. Reaktif azo boya türlerinden olan metil oranj, Kongo kırmızısı, fenil turuncu, metil kırmızısı gibi boyaların endüstride kullanımı yaklaşık % 50 oranında olduğu düşünülmektedir [5].

Atık suların arıtımında birçok yöntem mevcuttur. Aerobik oksidasyon ya da anaerobik uygulamaların yer aldığı biyolojik prosesler, aromatik halkalar, amin grupları, metal iyonları veya sülfonik gruplar içeren boyalara karşı etkili değildir [6-8]. Bunun yanı sıra adsorpsiyon, koagülasyon/flokülasyon, ozonlama, ileri oksidasyon işlemleri, elektrokimyasal bozunma, membran filtrasyonu, iyon değişimi ya da çökeltme gibi geleneksel fizikokimyasal prosesler küçük ölçekli endüstriler için oldukça verimlidir [6, 9] fakat bu tür yöntemler maliyetli ve uzun süren proseslerdir. Bu nedenle, genellikle doğal malzemelerin kullanıldığı biyosorpsiyon süreçleri düşük maliyetli olmaları ve yüksek verime sahip olmaları nedeniyle son zamanlarda oldukça ilgi görmektedir [10].

Son yıllarda oldukça fazla çalışılan biyosorpsiyon prosesi, metaller [11, 12], boyalar [13], antibiyotikler [14], endokrin bozucu bileşikler gibi organik ve anorganik maddelerin [15, 16] gideriminde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Canlı ya da cansız hücrelerin kullanıldığı biyosorpsiyon proseslerinde bakteri, mantar, alg, deniz yosunu, fermantasyon endüstrilerinin yan ürünleri gibi birçok biyokütle kullanılabilir [17]. Son yıllarda mantarların biyosorban olarak kullanıldığı biyosorpsiyon prosesi oldukça fazla çalışılmaktadır [18-20]. Atık sulardan kirleticilerin uzaklaştırılmasında çevre dostu, verimli ve ekonomik olmaları nedeniyle çok fazla tercih edilmektedir. Biyosorbanlar hücre duvarı yapısında glikoprotein, glikan ve kitin içermelerinin yanı sıra, hidroksil, amin, karboksil gibi fonksiyonel gruplar da içermekte ve çeşitli kirleticilerin hücre duvarı arasında biyosorpsiyonuna olanak sağlamaktadırlar [21, 22].

Kongo kırmızısı (CR) yapısında azo grubu içeren bir diazo boyadır. CR yapısal olarak kararlıdır ve bozunması oldukça zordur [23]. Azo grubu insanlarda kolaylıkla kanserojen bir kaynak olan benzenine metabolize olabilir. Ayrıca, renkli yapısı nedeniyle ışığın suya geçişini engelleyerek sucul yaşamın fotosentez ve solunum faaliyetlerini engeller [24]. Atık sulardan bu tür azo boyaların gideriminde geleneksel yöntemlerin yanı sıra, yüzey alanı, yüzeyde bulunan fonksiyonel grupların varlığı, tekrar kullanım ve gözenek hacmi nedeniyle biyosorpsiyon prosesi son yıllarda oldukça fazla kullanılmaktadır [25].

Bu çalışmada, sulu çözeltilerden CR giderimi için *Craterellus cornucopioides* biyokütlesinden elde edilen biyosorbanın kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yenilebilir bir mantar türü olan ve halk arasında Borazan mantarı olarak da bilinen *C. cornucopioides* Agaricomycetes sınıfına ait, siyaha yakın koyu gri renkli bir mantardır. Özellikle sonbahar ve kış mevsimlerinde görülen bu mantar türünün antioksidan, antijenotoksik, antikanser ve antimikrobiyal özellik gösterdiği yapılan çalışmalarda gösterilmiştir [26, 27]. Biyosorban olarak hazırlanan biyokütlenin karakterizasyonunun ardından, biyosorban miktarı, pH, başlangıç CR derişimi, süre ve sıcaklık gibi parametreler optimize edilmiş, ayrıca izoterm ve kinetik parametreler hesaplanarak biyosorpsiyonun doğası aydınlatılmaya çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Materyaller

HCl (% 37) ve NaOH (\geq % 98) Merck (Darmstadt, Germany), Kongo kırmızısı Koch Light Laboratories (Colnbrook, UK) firmasından temin edilmiştir. Kullanılan tüm diğer kimyasallar analitik saflıktadır.

2.2. Biyosorbanın hazırlanması ve karakterizasyonu

Craterellus cornucopioides mantarı Kemalpaşa-İzmir'den toplanmış, saf su ile 3 defa yıkandıktan sonra oda sıcaklığında kurutulmuş, blender yardımıyla küçük parçalara ayrıldıktan sonra eleklerden geçirilerek (Retsch GmbH&Co., KG, Haan, Almanya) farklı boyut aralıklarında elde edilmiştir. Çalışmalarda kullanılmak üzere 300-425 μ m boyut aralığı seçilmiş ve cam kavanozlarda muhafaza edilmiştir [13].

C. cornucopioides biyosorbanın hücre duvarında yer alan fonksiyonel gruplarının belirlenebilmesi için CR biyosorpsiyonu öncesi ve sonrasında Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrumları FTIR spektrometresi ile (Perkin elmer, Spectrum 100) alınmıştır.

Biyosorbanın yüzey morfolojisinin analiz edilebilmesi için biyosorpsiyon öncesi ve sonrası taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır (ZEISS EVO 40, Carl Zeiss AG, Almanya).

2.3. Biyosorpsiyon çalışmaları

Biyosorpsiyon çalışmaları toplam hacim 50 mL olacak şekilde 100 mL'lik erlenlerde gerçekleştirilmiştir. Biyosorban miktarı (0,01-0,1 g), pH (3,0-8,0), başlangıç CR derişimi (20-200 mg/L), ortam sıcaklığı (25-45 °C) ve biyosorpsiyon süresi (5-120 dakika) optimize edildikten sonra biyosorpsiyon kapasitesi (q_e) hesaplanmıştır [13] (Denklem 1):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

Denklemden yer alan C_0 ve C_e (mg/L) sırasıyla başlangıç ve denge halindeki CR derişimi, m (g) biyosorban miktarı, V (L) ise çözeltinin toplam hacmini vermektedir. Toplanan örnekler filtrelerden geçirildikten sonra renk ölçümleri UV-Vis spektrofotometre (Perkin Elmer Lambda 35 UV/vis) ile gerçekleştirilmiştir (λ_{max} : 499 nm). Tüm çalışmalar çift tekrarlı (n: 2) olacak şekilde yapılmıştır.

2. 4. Desorpsiyon ve tekrar kullanım

Biyosorbanın tekrar kullanımının belirlenebilmesi amacıyla farklı desorpsiyon ajanları (etanol, 0,1 N HCl, 0,1 N NaOH ve aseton) kullanılmış ve desorpsiyon oranı (%D) hesaplanmıştır [14] (Denklem 2):

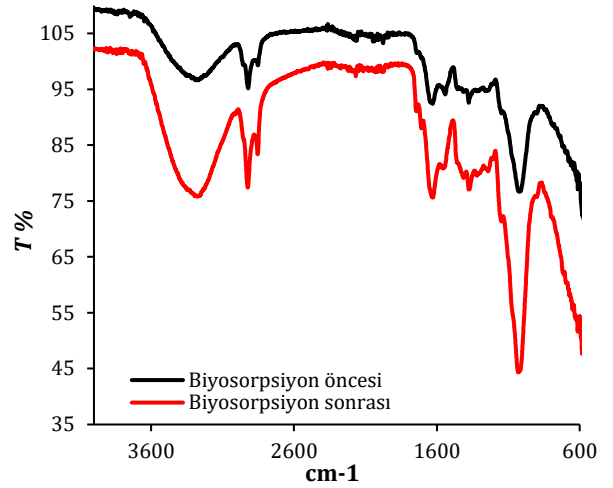
$$\%D = \frac{Q_d}{Q_b} \times 100 \quad (2)$$

Denklemden yer alan Q_d ve Q_b (mg/L) sırasıyla desorpsiyon ortamındaki CR derişimini ve biyosorban tarafından biyosorbe edilen CR derişimini vermektedir.

3. Bulgular

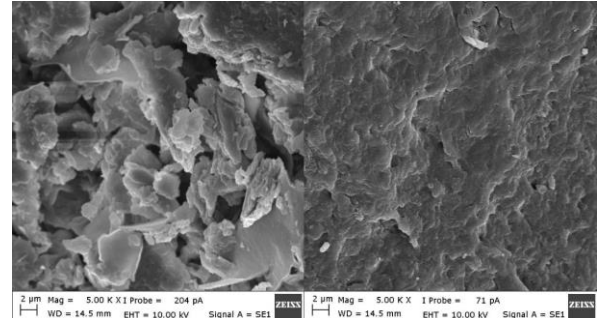
3. 1. Biyosorbanın karakterizasyonu

Biyosorbanın biyosorpsiyondan sorumlu fonksiyonel gruplarının belirlenebilmesi için biyosorpsiyon öncesi ve sonrası FTIR spektrumları alınmıştır (Şekil 1). Elde edilen verilere göre, 3270-3260 cm^{-1} 'de yer alan geniş bantlar -OH ve -NH gerilme titreşimlerini vermektedir. -COO gerilmesine ait pik 1377 cm^{-1} 'de gözlenirken, C-H gerilmesi ise 2920 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. 1543 cm^{-1} 'de gözlenen pik N-H bozulmalarını, -C-O- ve -C-N- gruplarını temsil eden pik ise 1050 cm^{-1} 'de gözlenmektedir. 1628 cm^{-1} 'de ise karboksilat ya da birincil aminleri temsil etmektedir. Elde edilen spektrumlara göre, doğal bir biyolojik materyal olan *C. cornucopioides* biyokütlesine ait hücre duvarında gözlenen amin, karboksil ve hidroksil gibi radikal gruplar biyosorpsiyonda etkin olabilecek fonksiyonel grupları temsil etmektedir. Boyar madde biyosorpsiyonundan sonra elde edilen spektrumlar incelendiğinde, farklı yoğunluk ve formlarda benzer tepe noktalarının varlığı ve boyar madde ile etkileşime giren fonksiyonel gruplarda kaymalar olması da biyosorpsiyonun gerçekleştiğinin bir kanıtıdır.



Şekil 1. Biyosorbanın biyosorpsiyon öncesi ve sonrası FTIR spektrumları

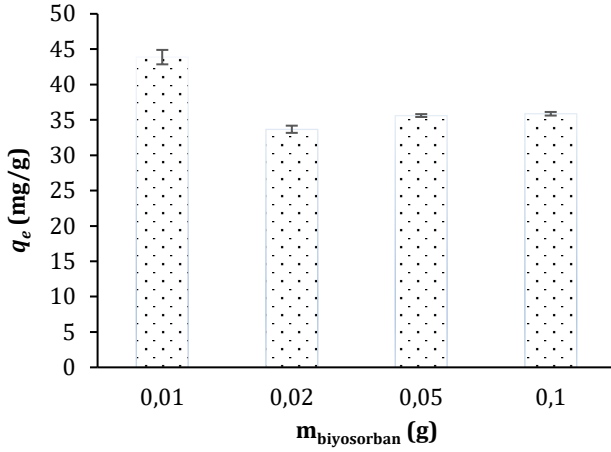
Biyosorbanın yüzey morfolojisinin belirlenebilmesi için biyosorpsiyon öncesi ve sonrasında SEM görüntüleri alınmıştır. Elde edilen verilere göre, biyosorpsiyon öncesi pürüzlü ve geniş bir yüzey alanına sahip olan biyosorban, biyosorpsiyon sonrası daha homojen ve pürüzsüz hale gelmiştir (Şekil 2). Bu da biyosorban ile boyar madde iyonlarının etkileşime girdiğinin bir kanıtıdır.



Şekil 2. Biyosorbanın biyosorpsiyon öncesi ve sonrası SEM görüntüleri

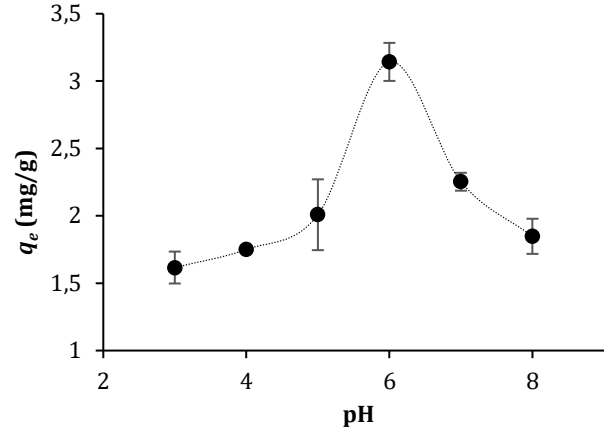
3. 2. Biyosorpsiyon çalışmaları

Biyosorpsiyon prosesinde biyosorban miktarı, malzemenin optimizasyonu ve maliyet verimliliği açısından oldukça önemlidir. 0,01 g ile 0,1 g arasındaki biyosorban miktarının 100 mg/L başlangıç CR derişiminde pH ayarsız ortamda 25 °C sıcaklıkta CR biyosorpsiyonu üzerine etkisi Şekil 3'te gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre 0,01 g biyosorbanın kullanıldığı biyosorpsiyonda q_e değeri 43,88±1,02 mg/g bulunurken, 0,1 g biyosorbanın kullanıldığı biyosorpsiyonda q_e değeri 35,87±0,25 mg/g olarak bulunmuştur. Biyosorban miktarının artmasıyla q_e değerinin düştüğü gözlenmektedir. Bunun nedeninin biyosorbanın yüzeyinde bulunan bağlanma bölgelerinin yeteri doygunluğa ulaşamaması olarak düşünülebilir. Elde edilen verilere göre daha sonraki çalışmalarda 0,01 g biyosorban miktarı kullanılmıştır.



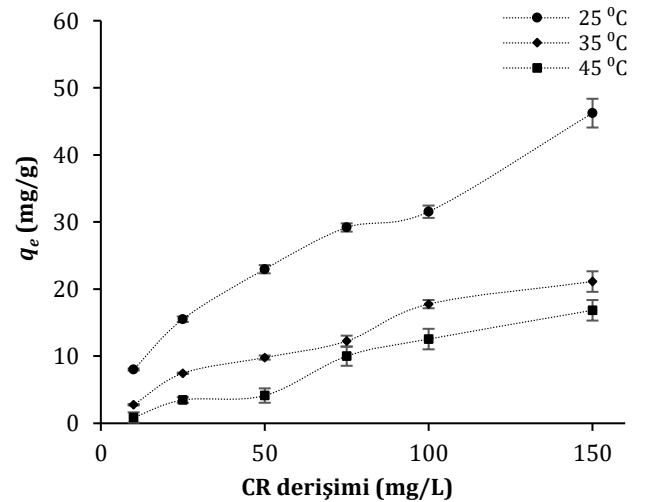
Şekil 3. Biyosorban miktarının biyosorpsiyon üzerine etkisi

Çözeltinin pH değeri, biyosorbanların yüzey yükünü, boyanın moleküler yapısını ve kirleticilerin iyonlaşma potansiyelini değiştirdiği için biyosorpsiyon sürecinin düzenlenmesinde oldukça önemli bir parametredir [28]. CR doğal bir dipolardır, bu nedenle çözeltinin pH değerine bağlı olarak anyonik ve katyonik özellik göstermektedir. Yüksek pH değerlerinde CR deprotonasyon nedeniyle negatif yüklü SO_3^- olarak bulunur. Öte yandan, düşük pH değerlerinde CR'in SO_3^- ve NH_2 grupları protonasyona uğrar ve sırasıyla SO_3H ve NH_3^+ 'e dönüşür [29]. Ayrıca biyosorban olarak kullanılan fungal biyokütle düşük pH değerlerinde pozitif yük kazanmaktadır. Sonuçta, protonlanmış yüzeyler ve CR arasında elektrostatik çekim başlar ve CR'nin uzaklaştırılmasında artışa neden olur. Çözeltinin pH'ı alkalinite aralığına yükseldiğinde, çözeltideki ve biyosorban yüzeylerindeki OH^- türlerinin sayısı artar ve anyonik CR boya ile rekabet gözlenir. Sonuç olarak, benzer yükler arasında itme gerçekleşir [30]. CR'in pH değişikliklerine karşı oldukça hassas olduğu ve asitlikten alkaliliğe geçtikçe renk değişiminin maviden kırmızıya doğru değiştiği bilinmektedir. Sonuç olarak pH: 5,0-8,0 aralığında kırmızı renkte kararlılık sergilemektedir [31]. Elde edilen deneysel çalışmaların sonucunda 0,01 g biyosorbanın kullanıldığı, başlangıç CR derişiminin 10 mg/L olduğu biyosorpsiyon koşullarında q_e değerinin pH: 6,0'da ($3,14 \pm 0,14$ mg/g) en yüksek olduğu gözlenmiştir (Şekil 4). Bu nedenle diğer biyosorpsiyon işlemlerinde ortamın pH değeri pH: 6,0 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Ortam pH değerinin biyosorpsiyon üzerine etkisi

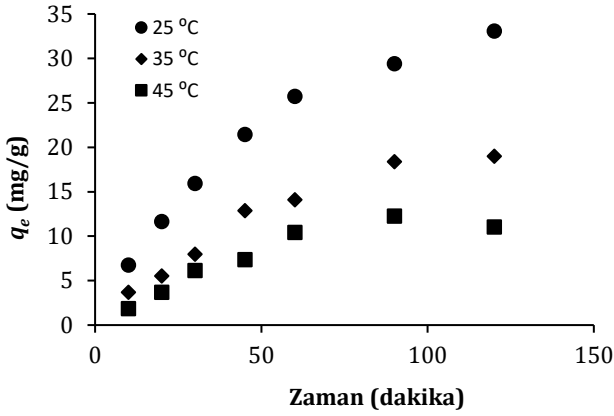
Başlangıç CR derişiminin (10-150 mg/L) biyosorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi farklı sıcaklık değerlerinde (25-45 °C), 2 saat etkileşim süresinde, pH: 6,0 ve 0,01 g biyosorban miktarının kullanıldığı koşullarda araştırılmıştır (Şekil 5). 25 °C'de gerçekleştirilen biyosorpsiyon prosesi için başlangıç CR derişiminin 10 mg/L'den 150 mg/L'ye artmasıyla, biyosorpsiyon kapasitesi $8,01 \pm 0,15$ mg/g'dan $46,22 \pm 2,14$ mg/g'a artmıştır. Benzer şekilde derişimin artmasıyla q_e değeri 35 °C'de $2,76 \pm 0,10$ mg/g'dan $21,12 \pm 1,53$ mg/g'a, 45 °C'de ise $0,87 \pm 0,76$ mg/g'dan $16,84 \pm 1,53$ mg/g'a artmıştır. Elde edilen sonuçlara göre başlangıç CR derişiminin artmasıyla q_e değerinin de arttığı gözlenmektedir. Bu durum, CR iyonları ile biyosorbanın fonksiyonel grupları arasında gerçekleşen etkileşim olasılığının artmasından kaynaklandığı şeklinde düşünülebilir. Bunun yanı sıra, sıcaklığın artması q_e değerinde düşüşe neden olmaktadır, bu da biyosorpsiyon prosesinin ekzotermik karakterde olduğunu göstermektedir [32].



Şekil 5. Başlangıç CR derişiminin biyosorpsiyon üzerine etkisi

Etkileşim süresinin CR biyosorpsiyonu üzerine etkisi Şekil 6'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ilk 60 dakikada q_e değerinde keskin bir artışın ardından, 120 dakikanın sonunda dengeye ulaştığı gözlenmiştir. Başlangıçta biyosorpsiyonun hızlı olması,

biyosorbannın yüzeyindeki boş aktif bölgelerin bolluğuna bağlıdır [33]. 120 dakikanın sonunda elde edilen q_e değerleri 100 mg/L başlangıç CR derişimi için 25 °C, 35 °C ve 45 °C için sırasıyla 33,06 mg/g, 18,98 mg/g ve 11,02 mg/g olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. Etkileşim süresinin biyosorpsiyon üzerine etkisi

3. 3. Biyosorpsiyon izotermeleri

C. cornucopioides biyosorbannının CR biyosorpsiyonundaki etkinliği Langmuir, Freundlich ve Dubinin-Raduiskevich (D-R) izoterm modelleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Langmuir modeli (Denklem 3), biyosorpsiyonun tek tabakada gerçekleştiğini ve birbirleriyle etkileşime girmeyen homojen aktif bölgelerde meydana geldiğini varsayar [34].

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_L K_L} + \frac{C_e}{Q_L} \quad (3)$$

Denklemde yer alan C_e (mg/L) CR biyosorpsiyonundan sonra çözeltideki CR derişimi, Q_L ve K_L ise sırasıyla en yüksek biyosorpsiyon kapasitesi ve Langmuir sabitini vermektedir. C_e 'ye karşı çizilen C_e/q_e grafiğinden Q_L ve K_L değerleri hesaplanmıştır. Hall ayırma faktörünün (R_L , boyutsuz) hesaplanmasıyla biyosorbannın CR için uygunluğu belirlenebilir (Denklem 4). R_L , Langmuir sabiti (K_L) ve en yüksek başlangıç CR derişimi (C_0 , mg/L) kullanılarak hesaplanır [35].

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (4)$$

Freundlich modeli (Denklem 5), biyosorpsiyonun biyosorbannın çok katmanlı heterojen yüzeylerinde gerçekleştiğini öngörmektedir. Ayrıca, farklı biyosorpsiyon enerjilerine sahip sınırlı sayıda bölgenin varlığını açıklamaktadır [36].

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (5)$$

Denklemde yer alan n ve K_F (mg/L) değerleri sırasıyla Freundlich sabiti ve biyosorpsiyon kapasitesidir. $\ln q_e$ 'ye karşı $\ln C_e$ grafiğinin çizilmesiyle K_F ve n değerleri

hesaplanmaktadır. n değeri biyosorpsiyonun yoğunluğunu ve heterojenliğini temsil etmektedir.

D-R modeli (Denklem 6), CR gideriminin hem homojen hem de heterojen yüzeylerde gerçekleştiğini öne sürmektedir. Bu model ayrıca, biyosorpsiyon enerjisinin tahmin edilmesini ve işlemlerin biyosorpsiyonun fiziksel ve kimyasal doğasını sağlar [37].

$$\ln Q_e = \ln Q_{D-R} - \beta \varepsilon^2 \quad (6)$$

Denklemde yer alan Q_e (mg/g) biyosorbe olan CR miktarını, Q_{D-R} (mg/g) ise en yüksek biyosorpsiyon kapasitesini vermektedir. ε (J/mol) ve β (mol²/J²) değerleri ise sırasıyla Polanyi potansiyeli ve D-R sabitini ifade etmektedir. Polanyi sabiti Denklem 7'den elde edilebilir:

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (7)$$

Denklemde yer alan C_e (mg/L), T (K) ve R (J/mol K) sırasıyla biyosorbannın denge durumundaki derişimini, sıcaklığı ve evrensel gaz sabitini (8,314 J/mol K) ifade etmektedir. Ortalama biyosorpsiyon enerjisi (E_{fe} , kJ/mol) Denklem 8'e göre hesaplanmaktadır. E_{fe} değerinin 8 kJ/mol'den küçük olması biyosorpsiyon prosesinin fiziksel, 8 kJ/mol ile 16 kJ/mol değeri arasında olması ise kimyasal özellikte olduğunu göstermektedir [38].

$$E_{fe} = \frac{1}{\sqrt{-2\beta}} \quad (8)$$

Deneyel sonuçların kullanılmasıyla hesaplanan izoterm modellerine ait parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Elde edilen verilere göre, biyosorpsiyon prosesinin Freundlich modeline daha uygun olduğu ve heterojen yüzeylerde kendiliğinden gerçekleştiği, n değerinin 1'den küçük olması nedeniyle biyosorpsiyonun fiziksel biyosorpsiyon şeklinde gerçekleştiğini göstermektedir [39]. D-R izoterm modelinde yer alan E_{fe} değerinin 8 kJ/mol'den düşük olması biyosorpsiyon prosesinin her üç sıcaklık değeri için fiziksel özellikte olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. İzoterm modellerine ait parametreler

	T (K)		
	298	308	318
q_e (mg/g) (deneysel)	33,06	18,98	11,02
Langmuir			
Q_L (mg/g)	0,78	0,30	0,16
K_L (L/mg)	0,02	0,03	0,04
R^2	0,88	0,84	0,99
R_L	0,39	0,03	0,74
Freundlich			
n	0,59	0,37	0,94
K_F (L/mg)	1,96	1,73	1,10
R^2	0,99	0,97	0,96

D-R			
Q_{D-R} (mg/g)	29,73	14,12	9,12
K_{D-R} (mol ² /J ²)	2x10 ⁻⁵	3x10 ⁻⁵	4x10 ⁻⁵
E_{fe} (kJ/mol)	0,16	0,13	0,11
R^2	0,78	0,84	0,78

3. 4. Biyosorpsiyon kinetikleri

C. cornucopioides biyosorbanının CR biyosorpsiyonu üzerindeki kinetik davranışı yalancı-birinci derece (YBD) [40] ve yalancı-ikinci derece (YİD) [41] modelleri kullanılarak aydınlatılmaya çalışılmıştır. Kinetik modellerin doğrulanmış formları sırasıyla Denklem 9 ve Denklem 10'da verilmiştir.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (9)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (10)$$

Denklemlerde yer alan q_e (mg/g) ve q_t (mg/g) sırasıyla biyosorban tarafından denge halinde ve herhangi bir t anında biyosorbe edilen CR miktarını, t (dk) zamanı vermektedir. k_1 (1/dk) ve k_2 (g/mg dk) sırasıyla YBD'den ve YİD'den hız sabitlerini vermektedir. YBD modelde yer alan k_1 ve q_e değerleri $\ln(q_e - q_t)$ 'ye karşı çizilen t grafiğinden, YİD modelde yer alan k_2 ve q_e değerleri ise t/q_t 'ye karşı çizilen t grafiğinden elde edilmektedir. Kinetik modellere ait parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Hesaplanan parametre değerlerine göre biyosorpsiyon prosesinin YİD kinetik modele uyumlu olduğu belirlenmiştir. Her üç sıcaklık değeri için hesaplanan q_e değerleri ile deneysel olarak hesaplanan q_e değerleri YİD kinetik modelde birbirine yakın çıkmıştır. Ayrıca R^2 değerleri de YİD kinetik modelde, YBD kinetik modele göre daha yüksek çıkmıştır.

Tablo 2. Kinetik modellere ait parametreler

	T (K)		
	298	308	318
q_e (mg/g) (deneysel)	33,06	18,98	11,02
YBD			
q_e (mg/g)	3,63	1,14	3,44
k_1	0,08	0,19	0,45
R^2	0,93	0,83	0,78
YİD			
q_e (mg/g)	31,05	15,97	11,55
$k_2 \times 10^{-3}$	0,29	0,28	0,54
R^2	0,99	0,94	0,86

3. 5. Biyosorpsiyon termodinamiği

Biyosorpsiyonun termodinamik parametreleri, farklı çözelti sıcaklıklarında (25-45 °C) Denklem 11 ve Denklem 12 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\ln K = -\frac{\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (11)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (12)$$

Denklemlerde yer alan ΔG° (kJ/mol), ΔH° (kJ/mol) ve ΔS° (J/mol K) sırasıyla Gibbs serbest enerji, entalpi ve entropiyi vermektedir. R (8,314 J/mol K) evrensel gaz sabitini, T (K) mutlak sıcaklık ve K_L ise Langmuir denge sabitini vermektedir. K_L 'ye karşı çizilen $1/T$ grafiği yardımıyla ΔS° ve ΔH° değerleri hesaplanmaktadır. Elde edilen deneysel veriler yardımıyla hazırlanan parametreler Tablo 3'te verilmiştir. Buna göre, negatif ΔG° değeri, biyosorpsiyon prosesinin kendiliğinden gerçekleştiğini, negatif ΔH° değeri ise prosesin ekzotermik karakterde olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Termodinamik modele ait parametreler

	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (kJ/mol K)	
		-14,85	
T (K)	298	308	318
ΔG° (kJ/mol)	-20,62	-20,81	-21,01

Tablo 4'te CR gideriminde kullanılan biyosorbanların q_e değerleri verilmiştir.

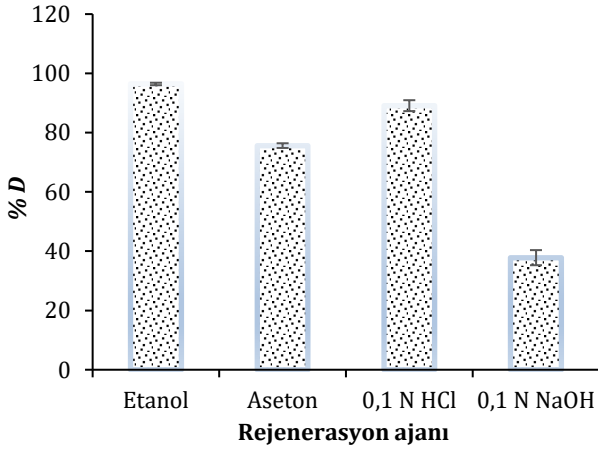
Tablo 4. Farklı biyosorbanlar ile CR giderimi

Biyosorban	q_e (mg/g)	Kaynakça
<i>Pleurotus mutilis</i>	36,68	[42]
Buğday kepeği	22,73	[43]
Çam kozalağı	40,19	[44]
<i>Aspergillus carbonarius</i>	99,01	[45]
Portakal kabuğu	22,4	[46]
Lahana atık tozu	1,6	[47]
Zeolit	4,30	[48]
Kaolin	5,60	[48]
Nane yaprağı	60,24	[49]
Fıstık kabuğu	3,26	[50]
Pirina	5,08	[50]
Deniz kabuğu	6,31	[50]
<i>C. cornucopioides</i>	46,22	Mevcut Çalışma

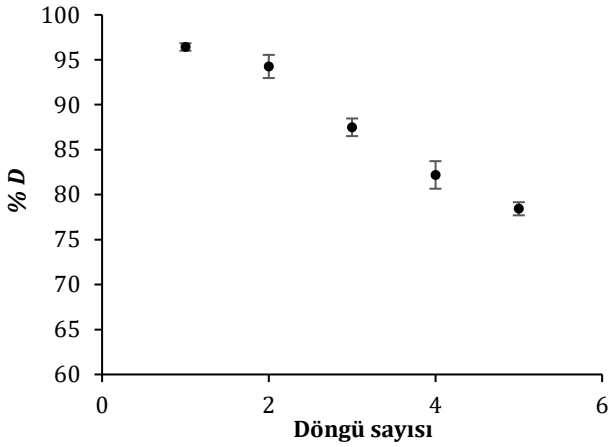
3. 6. Desorpsiyon ve tekrar kullanım

Gerçek uygulamalarda, kullanılan biyosorbanların tekrar kullanımı oldukça önemlidir. CR yüklü sorbanların toksik olması nedeniyle berterafının oldukça önemlidir. Bu tür sorbanların yakma işlemine tabi tutulmasıyla toksik patlayıcılar ve alev çıkabilmektedir [51]. Bu nedenle biyosorban olarak kullanılan materyallerin rejenerasyonu ve tekrar kullanılabilirliği, ekonomik kullanım ve çevre için önemlidir. CR yüklü *C. cornucopioides* biyosorbanı etanol, aseton, 0,1 N HCl ve 0,1 N NaOH kullanılarak rejenerasyon edilerek desorpsiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan rejenerasyon ajanlarının toplam hacmi 50 mL olacak şekilde ayarlanmış, CR yüklü biyosorbanlar bu ortamlara konularak 6 saat, 25 °C, 150 rpm çalkalama koşullarında desorbe edilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre en yüksek % D etanolde elde edilmiştir (% 96,43±0,41). Aseton, 0,1 N HCl ve 0,1 N NaOH için % D değerleri sırasıyla % 75,62±0,79, % 89,11±1,85, ve % 37,81±2,55 bulunmuştur. Biyosorbanlar ortamdan alındıktan sonra oda koşullarında kurutulmuş ve geri

kazanımdan sonra en yüksek desorpsiyon oranının (%D) elde edildiği rejenerasyon ajanıyla (etanol) 5 biyosorpsiyon-desorpsiyon döngüsü için tekrar kullanılmıştır (Şekil 8). İlk döngüde % 96,43±0,41 olan % D değeri beşinci döngünün sonunda % 78,43±0,73'a düşmüştür. Elde edilen sonuçlara göre etanolün rejenerasyon ajanı olarak kullanıldığı biyosorpsiyon-desorpsiyon prosesinde *C. cornucopioides* biyosorbanı beş döngüye kadar verimli bir şekilde kullanılabilir. Buna göre, *C. cornucopioides* biyosorbanı atık sulardan CR biyosorpsiyonu için etkin, geri kazanılabilir ve başarılı bir şekilde tekrar kullanılabilir özellik göstermektedir.



Şekil 7. Rejenerasyon ajanı



Şekil 8. Desorpsiyon oranı

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, sulu çözeltilerden CR'in gideriminde potansiyel biyosorban olarak *C. cornucopioides* biyokütlesinden elde edilen fungal biyosorban hazırlanmış, FTIR ve SEM ile karakterize edilmiştir. Deneysel parametreler olarak biyosorban miktarı, ortam pH'ı, başlangıç CR derişimi, sıcaklık ve süre optimize edilmiştir. Buna göre 0,01 g biyosorbanın kullanıldığı koşullarda pH: 6,0'da 150 mg/L başlangıç CR derişimi için 25 °C'de q_e değeri 46,22±2,14 mg/g olarak bulunmuştur. 2021 yılında yapılan bir çalışmada CR giderimi için on farklı odun atığı biyosorban olarak kullanılmış ve en iyi giderimin (q_e :

3,3 mg/g, %71,8) pH:4'te 100 mg/g başlangıç CR derişimi için, Avrupa-Amerika kavağında elde edilen biyosorbanda gerçekleştiği rapor edilmiştir [52]. 2021 yılında yapılan bir başka çalışmada ise, sulu çözeltilerden CR giderimi için asitle muamele edilmiş meyve kabukları biyosorban olarak kullanılmıştır. Biyosorpsiyon koşullarının pH:5,5, 212,5 mg/L başlangıç CR derişimi için 105 dakikalık temas süresi sonunda q_e değerinin 107,52 mg/g olduğu rapor edilmiştir [53]. Denge biyosorpsiyon verileri Langmuir, Freundlich ve Dubinin-Raduiskevich modellerine göre incelenmiş ve en uygun modelin Freundlich izoterm modeli olduğu bulunmuştur. Kinetik model biyosorpsiyon prosesi için YİD modele uyduğu belirlenmiştir. Termodinamik parametrelere göre biyosorpsiyon prosesi ekzotermik karakterde ve kendiliğinden gerçekleştiğini göstermektedir. 2023 yılında yapılan bir çalışmada, asitle muamele edilmiş *Vangueria infausta* meyvesinin biyosorban olarak kullanıldığı biyosorpsiyon çalışmasında CR gideriminin %92,3, q_e değerinin ise 7,91 mg/g olduğu rapor edilmiştir. Biyosorpsiyonun YİD kinetik modeline ve Langmuir izoterm modeline daha uygun olduğu belirtilmiştir [54]. Muz kabuğundan elde edilen biyokömürün atık sudan CR gideriminde kullanıldığı bir başka çalışmada ise, YBD kinetik modeline ve heterojen sorpsiyon yüzeyinden dolayı Freundlich izoterm modeline daha uygun olduğu ve q_e değerinin 35,46 mg/g olduğu rapor edilmiştir [55]. CR giderimi amacıyla hazırlanan biyosorbanların türüne, biyosorban miktarına, hazırlama prosedürlerine, deneysel koşullara ve giderilen kirleticinin doğasına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Biyosorbanın biyosorpsiyon-desorpsiyon döngüsündeki rejenerasyonunda, en etkin rejenerasyon ajanının etanol olduğu ve beş döngüye kadar etkin bir şekilde kullanılabilmesini göstermektedir. Sonuç olarak yenilebilir bir mantar türü olan *C. cornucopioides* mantarından hazırlanan biyokütlelerin sulu çözeltilerden CR giderimi için alternatif bir biyosorban olarak kullanılabilirliği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma BUÜ BAP FHIZ-2023-1503 no'lu proje tarafından desteklenmiştir.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

[1] Keharia, H., Madamwar, D. 2003. Bioremediation concepts for treatment of dye containing

- wastewater: A review. *Indian Journal of Experimental Biology*, 41, 1068-1075.
- [2] Bekci, Z., Sekia, Y., Cavas, L. 2009. Removal of malachite green by using an invasive marine algae *Caulerpa racemosa* var. *Clyndracea*. *Journal of Hazardous Materials*, 161, 1454-1460.
- [3] Sun, J. H., Sun, S. P., Wang, G. L., Qiao, L. P. 2007. Degradation of azo dye Amido black 10B in aqueous solution by Fenton oxidation process. *Dyes and Pigments*, 74, 647-652.
- [4] Daneshvar, E., Kousha, M., Koutahzadeh, N., Sohrabi, M. S., Bhatnagar, A. 2013. Biosorption and bioaccumulation studies of acid orange 7 dye by *Ceratophyllum demersum*. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 32(2), 285-293.
- [5] Alver, E., Metin, Ü. 2012. Anionic dye removal from aqueous solutions using modified zeolite: Adsorption kinetics and isotherm studies. *Chemical Engineering Journal*, 202, 59-67.
- [6] Asgher, M. 2012. Biosorption of reactive dyes: A review. *Water, Air and Soil Pollution*, 223(5), 2417-2435.
- [7] Corso, C. R., Almeida, E. J. R., Santos, G. C., Morão, L. G., Fabris, G. S. L., Mitter, E. K. 2012. Bioremediation of direct dyes in simulated textile effluents by paramorphogenic form of *Aspergillus oryzae*. *Water Science and Technology*, 37, 49-54.
- [8] Sriharsha, D. V., Kumar, R. L., Savitha, J. 2017. Immobilized fungi on *Luffa cylindrica*: An effective biosorbent for the removal of lead. *Journal of the Taiwan Institute Chemical Engineers*, 80, 589-595.
- [9] Saba, B., Christy, A. D., Jabeen, M. 2016. Kinetic and enzymatic decolorization of industrial dyes utilizing plant-based biosorbents: A review. *Environmental Engineering Science*, 33(9), 601-614.
- [10] Souza, F. H. M., Leme, V. F. C., Costa, G. O. B., Castro, K. C., Giraldo, T. R., Andrade, G. S. S. 2020. Biosorption of rhodamine B using a low-cost biosorbent prepared from inactivated *Aspergillus oryzae* cells: kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Water, Air and Soil Pollution*, 231(5), 242.
- [11] Rizvi, A., Ahmed, B., Zaidi, A., Khan, M.S. 2020. Biosorption of heavy metals by dry biomass of metal tolerant bacterial biosorbents: an efficient metal clean-up strategy, *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 801.
- [12] Gu, S., Lan, C.Q. 2024. Mechanism of heavy metal ion biosorption by microalgal cells: A mathematic approach, *Journal of Hazardous Materials*, 463, 132875.
- [13] Göçenoğlu Sarıkaya, A., Erden Kopar, E. 2022. Biosorption of Sirius Blue azo-dye by *Agaricus campestris* biomass: Batch and continuous column studies, *Materials Chemistry and Physics*, 276, 125381.
- [14] Göçenoğlu Sarıkaya, A., Osman, B., Tümay Özer, E. 2024. Biosorption of tetracycline antibiotics by *Lactarius deliciosus* biomass, *Chemical Engineering Communications*, 211(4), 592-602.
- [15] Farias, K.C.S., Guimaraes, R.C.A., Oliveira, K.R.W., Nazario, C.E.D., Ferencz, J.A.P., Wender, H. 2023. Banana peel powder biosorbent for removal of hazardous organic pollutants from wastewater, *Toxics*, 11(8), 664.
- [16] Ngeno, E., Ongulu, R., Shikuku, V., Ssentongo, D., Otieno, B., Ssebugere, P., Orata, F. 2024. Response surface methodology directed modeling of the biosorption of progesterone onto activated *Moringa oleifera* seed biomass: Parameters and mechanisms, 360, 142457.
- [17] Arslan, D.Ş. 2023. Bio-removal of Remazol black 5 dye by *Allium scorodoprasum* L. biomass; isotherms, kinetic and thermodynamic studies, *Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology*, 39(2), 223-234.
- [18] Aslıyüce, S., 2023. Screening the heavy metal removal capacity of magnetically modified fungal biosorbent, *Chemical Papers*, 77, 4331-4344.
- [19] Karatay, S.E., Aksu, Z., Özeren, İ., Dönmez, G. 2023. Potentiality of newly isolated *Aspergillus tubingensis* in biosorption of textile dyes: equilibrium and kinetic modeling, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 4777-4784.
- [20] Şenol, Z.M., Keskin, Z.S., Dinçer, E., Aayed, A.B. 2024. Influential lead uptake using dried and inactivated-fungal biomass obtained from *Panaeolus papilionaceus*: biological activity, equilibrium, and mechanism, *Biomass Conversion and Biorefinery*, Doi no: 10.1007/s13399-024-05584-4.
- [21] Lo, Y. C., Cheng, C. L., Han, Y. L., Chen, B. Y., Chang, J. S. 2014. Recovery of high-value metals from geothermal sites by biosorption and bioaccumulation. *Bioresource Technology*, 160, 182-190.
- [22] Göçenoğlu Sarıkaya, A. 2021. Biosorption of hexavalent chromium metal ions by *Lentinula edodes* biomass: Kinetic, Isothermal, and Thermodynamic parameters, *Acta Chimica Slovenica*, 68(3), 587-593.
- [23] Al-dahri, T., AbdulRazak, A. A., Rohani, S. 2020. Preparation and characterization of Lindetype A zeolite (LTA) from coal fly ash by microwave-assisted synthesis method: its application as adsorbent for removal of anionic dyes. *International Journal of Coal Preparation Utilization*, 42(7), 1-14.

- [24] Wang, L., Wang, A. 2008. Adsorption properties of congo red from aqueous solution onto surfactant-modified montmorillonite. *Journal of Hazardous Materials*, 160(1), 173-180.
- [25] Pathania, D., Sharma, A., Siddiqi, Z. M. 2016. Removal of congo red dye from aqueous system using *Phoenix dactylifera* seeds. *Journal of Molecular Liquids*, 219, 359-367.
- [26] Kosanic, M., Rankovic, B., Stanojkovic, T., Radovic-Jakovljevic, M., Ciric, A., Grujicic, D., Milosevic-Djordjevic, O. 2019. *Craterellus cornucopioides* edible mushroom as source of biologically active compounds. *Natural Product Communications*, 14(5), 1-6.
- [27] Liu, Y., Duan, X., Zhang, M., Li, C., Zhang, Z., Hu, B., Liu, A., Li, Q., Chen, H., Tang, Z., Wu, W., Chen, D. 2021. Extraction, structure characterization, carboxymethylation and antioxidant activity of acidic polysaccharides from *Craterellus cornucopioides*. *Industrial Crops and Products*, 159, 113079.
- [28] Astuti, D. W., Mudasir, M., Mada, U. G. 2020. Adsorption of the anionic dye of congo red from aqueous solution using a modified natural zeolite with Benzalkonium. *Rasayan Journal of Chemistry*, 13(2), 845-853.
- [29] Sahar, J., Naeem, A., Farooq, M., Zareen, S. 2019. Thermodynamic studies of adsorption of rhodamine B and Congo red on graphene oxide. *Desalination and Water Treatment*, 164, 228-239.
- [30] Karaman, C., Karaman, O., Show, P., Karimi-maleh, H., Zare, N. 2022. Chemosphere Congo red dye removal from aqueous environment by cationic surfactant modified-biomass derived carbon: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic modeling, and forecasting via artificial neural network approach. *Chemosphere*, 290, Article 133346.
- [31] Akkaya Saygılı, G. 2015. Synthesis, characterization and adsorption properties of a novel biomagnetic composite for the removal of Congo red from aqueous medium. *Journal of Molecular Liquids*, 211, 515-526.
- [32] Göçenoğlu Sarıkaya, A., Osman, B., Tümay Özer, E. 2023. *Lactarius deliciosus* biyokütlesi ile sulu çözeltilerden oksitetrasiklin giderimi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 1135-1152.
- [33] Alarifi, I. M., Al-ghamdi, Y. O., Darwesh, R., Omaish, M., Kashif, M. 2021. Properties and application of MoS₂ nanopowder: characterization, Congo red dye adsorption, and optimization. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 1169-1180.
- [34] Langmuir, I. 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of American Chemical Society*, 40, 1361-1403.
- [35] Hall, K. R., Eagleton, L. C., Acrivos, A., Vermeulen, T. 1966. Pore- and solid diffusion kinetics in fixed-bed adsorption under constant-pattern conditions, *Industrial Engineering and Chemical Fundamentals*, 5, 212-223.
- [36] Freundlich, H. 1906. Over the adsorption in solution. *The Journal of Physical Chemistry*, 57, 385.
- [37] Dubinin, M. M., Radushkevich, L. V. 1947. The equation of the characteristic curve of activated charcoal. *Proceeding of the Academy of Sciences, Physical Chemistry Section*, 55, 331.
- [38] Tran, H. N., You, S. J., Chao, H. P. 2016. Thermodynamic parameters of cadmium adsorption onto orange peel calculated from various methods: a comparison study, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(3), 2671-2682.
- [39] Jia, M., Wang, F., Bian, Y., Jin, X., Song, Y., Kengara, F. O., Xi, R., Jiang, X. 2013. Effects of pH and metal ions on oxytetracycline sorption to maize-straw-derived biochar. *Bioresource Technology*, 136, 87-93.
- [40] Lagergren, S. 1898. Zur theorie der sogenannten adsorption gel oster stoffe. *Kunliga Svenska Vetenskapsakademiens, Handlingar*, 25, 1.
- [41] Ho, Y. S., McKay, G. 1999. Pseudo-second-order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34, 451.
- [42] Alouache, A., Selatnia, A., Sayah, H. E., Moussous, S., Daoud, N. 2021. Biosorption of hexavalent chromium and Congo red dye onto *Pleurotus mutilus* biomass in aqueous solutions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 2477-2492.
- [43] Wang, X. S., Chen, J. P. 2009. Biosorption of Congo red from aqueous solution using wheat bran and rice bran: batch studies. *Separation Science and Technology*, 44(6), 1452-1466.
- [44] Dawood, S., Sen, T. K. 2012. Removal of anionic dye Congo red from aqueous solution by raw pine and acid-treated pine cone powder as adsorbent: Equilibrium, thermodynamic, kinetics, mechanism and process design. *Water Research*, 46(6), 1933-1946.
- [45] Bouras, H. D., Yeddou, A. R., Bouras, N., Hellel D., Holtz, M. D., Sabaou, N., Chergui, A., Nadjemi, B. 2017. Biosorption of Congo red dye by *Aspergillus carbonarius* M333 and *Penicillium glabrum* Pg1: Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 80, 915-923.

- [46] Namabsivayam, C., Muniasamy, N., Gayatri, K., Rani, M., Ranganathan, K. 1996. Removal of dyes from aqueous solutions by cellulosic waste orange peel. *Bioresource Technology*, 57, 37–43.
- [47] Wekoye, J. N., Wanyonyi, W. C., Wangila, P. T., Tonui, M. K. 2020. Kinetic and equilibrium studies of Congo red dye adsorption on cabbage waste powder. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2, 24–31.
- [48] Zhang, Z., Shan, Y., Wang, J., Ling, H., Zang, S., Gao, W., Zhao, Z., Zhang, H. 2007. Investigation on the rapid adsorption of Congo Red catalyzed by activated carbon powder under microwave irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, 147(1–2), 325–333.
- [49] Kütük, N. 2022. Congo red biosorption with dried mint leaves; isotherm and kinetic studies. *European Journal of Science and Technology*, 42, 113-117.
- [50] Gürkan, E. H., Çoruh, S. 2017. Yeni potansiyel biyosorbentlerle Kongo kırmızısının biyosorpsiyon çalışmaları. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 203-212.
- [51] Rashtbari, Y., Afshin, S., Hamzezadeh, A., Abazari, M. 2020. Application of powdered activated carbon coated with zinc oxide nanoparticles prepared using a green synthesis in removal of Reactive Blue 19 and Reactive Black-5: adsorption isotherm and kinetic models. *Desalination and Water Treatment*, 179, 354–367.
- [52] Stjepanovic, M., Velic, N., Galic, A., Kosovic, I., Jakovljevic, T., Habuda-Stanic, M. 2021. From waste to biosorbent: removal of congo red from water by waste wood biomass. *Water*, 13(3), 279.
- [53] Oyekanmi, A.A., Ahmad, A., Setapar, S.H.M., Alshammari, M.B., Jawaid, M., Hanafiah, M.M., Khalil, H.P.S.A., Vaseashta, A. 2021. Sustainable *Durio zibethinus*-derived biosorbents for congo red removal from aqueous solution: statistical optimization, isotherms and mechanism studies. *Sustainability*, 13(23), 13264.
- [54] Kitemangu, A., Vegi, M.R., Malima, N.M. 2023. Biosorption of congo red dye from aqueous solution using adsorbent prepared from *Vangueria infausta* fruit pericarp. *Adsorption Science & Technology*, 2023, 2023, <https://doi.org/10.1155/2023/4319053>.
- [55] Daffalla, S., Taha, A., Da'na, E., El-Aassar, M.R. 2024. Sustainable banana-waste-derived biosorbent for congo red removal from aqueous solutions: kinetics, equilibrium, and breakthrough studies. *Water*, 16(10), 1449.

Doğal Çevre Verilerinin Yüksek Yapılar Özelinde İrdelenmesi: Yaşayan Harika Burj Khalifa

Hatice BAL^{*1}, Hale DEMİR KAYAN²

^{1,2}Dicle Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

(Alınış / Received: 03.04.2024, Kabul / Accepted: 06.11.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Dubai,
Burj Khalifa,
Doğal Çevre Verileri,
İnşaat Teknikleri

Öz: Mimari tasarım sürecini biçimlendiren doğal çevre verileri (topografya, iklim, güneş ve rüzgâr vb. parametreler), tasarım kararları alınırken en zorlayıcı faktörlerdir. Bu faktörleri işbirlikçi bir çabayla gerçekleştiren Burj Khalifa, benzersiz bir örnek olmuştur. Yüksekliği 828 metre olan yapı çöl iklimi, kum fırtınaları, güçlü rüzgârlar, yakıcı güneş ve aşındırıcı zayıf bir zemin gibi zorluklara karşı yeni teknikler geliştirmiş ve güncel teknolojileri kullanmıştır. Çalışmada literatür taraması yapılarak, Dubai kentinin güncel ve istatistiksel doğal çevre verileri kullanılmıştır. Bu verilerle inşaat sürecindeki zorluklar karşısında alınan tasarım kararları irdelenmiştir. Bu çalışma ile kulede kullanılan yapı, yöntem ve tekniklerin inşa edilecek yeni yapılar için ilham kaynağı olması hedeflenmektedir. Böyle devasa bir binanın yan yatmasını engellemek için "Hymenocallis" adlı çiçeğin formu kullanılarak kulede "burun" ve "kuyruk" kısımları rüzgârı kontrol etmiştir. Zayıf bir zemine karşı temelde yaşanacak sorunlara karşı su yalıtım sistemleri, artırılmış beton kaplama, titanyum ağ, katodik koruma sistemi ve kalıp astarı uygulanmıştır. Güneşin sıcaklığını kontrol altına almak için ise el yapımı özel cam paneller üretilmiştir. Birçok zorluğa karşı çölde yükselmeyi başaran bu ikonik yapı kentin ticari merkezi haline gelmiş ve "En"leri başararak, ezberleri bozmuştur.

Examination of Natural Environmental Data Specific to High-Rise Buildings: Living Wonder Burj Khalifa

Keywords

Dubai,
Burj Khalifa,
Natural Environment Data,
Construction Techniques

Abstract: Natural environmental data (parameters such as topography, climate, sun and wind, etc.) that shape the architectural design process are the most compelling factors when making design decisions. By realizing these factors through a collaborative effort, the Burj Khalifa has been a unique example. The building, which is 828 meters high, has developed new techniques and used up-to-date technologies against difficulties such as desert climate, sandstorms, strong winds, burning sun and a weak abrasive ground. In the study, literature review was conducted and current and statistical natural environment data of Dubai city were used. With these data, the design decisions taken in the face of difficulties during the construction process were examined. With this study, it is aimed that the construction, methods and techniques used in the tower will be a source of inspiration for new structures to be built. In order to prevent such a huge building from tilting sideways, the "nose" and "tail" parts of the tower were used to control the wind by using the form of a flower called "Hymenocallis". Waterproofing systems, increased concrete coating, titanium mesh, cathodic protection system and mold lining were applied to address the problems that would arise in the foundation against a weak ground. Special handmade glass panels were produced to control the heat of the sun. This iconic structure, which managed to rise in the desert against many difficulties, became the commercial center of the city and broke the routine by achieving the "Best".

*İlgili yazar: hatice.ba4265@gmail.com

1. Giriş

İnsanoğlu dinsel ya da simgesel güdülenmelerle hep daha yüksek yapılar inşa etme eğiliminde olmuştur. Tarihi süreçte uygarlıklara bakıldığında; Mısır piramitler, Mezopotamya zigguratlar, Çin pagodalar, Müslümanlar ise minareler ile göğe uzanmaya çalışmışlardır. Yükselme isteği her zaman dinsel olmamıştır. Örneğin; Keops piramidi, 146 metrelik yüksekliği ve etkileyici mimarisiyle Firavun'un gücünü göstermiştir [1]. Yüksek yapıların şehirler için sakıncaları vardır. Mimarlar ve mühendisler tarih boyunca gölge, rüzgâr, trafik yoğunluğu ve pahalı yapımlar gibi sorunlara doğru çözümler üretmek zorunda kalmıştır [2].

"Nisshoken (güneş ışığı hakkı)" Japoncada yapımlar alanında çokça kullanılan bir kelimedir. Yüksek bina yapan kişiler, güneş ışığını kesmesiyle komşularının evine gölge düşürmektedir. Bu gölgeden dolayı insanlar evin ısıtılması için kışın daha çok yakıt tüketmesine sebep olduğundan bina sahiplerine saat başına belli bir bedel ödemek zorunda bırakılmaktadır. Bu bedel inşaatın başlangıcında tek defada ödenmekte bazen bedelin yüksekliği caydırıcılık boyutlarına ulaşabilmektedir [3]. Arazinin az ve nüfusun çok olduğu ülkelerde doğal çevre verilerinin önemi bu uygulamada olduğu gibi anlaşılmaktadır. Bu da modern toplumlarda başarılı projelerin, büyümenin temellerinden biri olduğunu göstermektedir. Ancak, günümüzde proje yönetimi kritik bir beceri durumuna gelmiştir.

Proje yönetimini en iyi şekilde sürdürmüş yapılardan biri de Burj Khalifa'dır. Birleşik Arap Emirlikleri'nin başkenti olan Dubai'de bulunan Burj Khalifa, insanoğlunun şimdiye kadar inşa ettiği, açık ara farkla, en yüksek binasıdır. Hem "Dikey Şehir" hem de "Yaşayan Harika" olarak tanımlanmaktadır [4]. Burj Khalifa'nın hedefi yalnızca dünyanın en yüksek binası olmak değil; aynı zamanda dünyanın en yüksek arzularını da somutlaştırmaktır [5].

Burj Khalifa'nın inşaat sürecinde mevcut teknolojiler kullanılarak; yeni inşaat yöntemleri geliştirilmiş ve dünyanın [6] "En" leri başarılmıştır. En yüksek bina, en çok katlı bina, en hızlı asansör, en yüksek gece kulübü, en yüksek restoran, en yüksek cami [7] ünvanlarına sahip yapı birçok rekora imza atılmıştır. Bu dikey şehir, 828 metrenin üzerinde 160 kattan oluşmaktadır. Karma bir yapı olan Burj Khalifa'nın inşaatı altı yıl sürmüştür. Hükümet bu yapıyı finans, ticaret ve turizm açısından şehrin merkezi haline getirmiştir [8].

Çalışmada literatür taraması yapılarak, Dubai kentindeki doğal çevre verileri ile inşaat sürecindeki

zorluklar karşısında alınan tasarım kararları irdelenmiştir. Bu çalışma ile kulede kullanılan yapımlar, yöntem ve tekniklerin inşa edilecek yeni yapılara ilham kaynağı olması hedeflenmektedir. Dünyanın en yüksek binası olarak tanınan Burj Khalifa için, bu çalışmada doğal çevre verileri kapsamında karşılaşılan sorunlar ve bu sorunlar için üretilen çözümler üzerinde durulmuş; yapı, yazılı ve basılı kaynaklardan faydalanılarak mimari tasarım sürecinde doğal çevre verileri ve bu verilerin getirdiği zorluklara karşı alınan mühendislik ve tasarım çözümlerini detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

1.1. Literatür taraması

Zamanla teknolojinin ilerlemesiyle gelişen ve değişen malzemeler (çelik, betonarme), asansör gibi araçlar, yeni yapı elemanları ve yapımlar tekniklerinin kullanımı vb. gelişmeler 19. yüzyıldan başlayarak daha yüksek binaların yapımlarına olanak vermiştir [1]. CTBUH¹ yüksekliği 50 metre ve üstü olan ya da 14 ve üstü kata sahip olan binaların "yüksek bina", yüksekliği 300 metreden daha fazla olan binaları "süper yüksek bina" ve yüksekliği 600 metreden daha fazla olan binaları ise "mega yüksek bina" olarak sınıflandırmıştır [9]. Yüksek binalar, genel olarak zemine gömülmüş bodrum katının üzerinde yer alan az katlı podyum katı ve onun üzerinde yükselmekte olan kule bölümünden oluşmaktadır [10].

Dünyada yüksek katlı binalara Şikago'da bulunan Monadnock Block ile kapı aralanmıştır [11]. Çelik gibi güçlü bir malzemenin inşaat sürecine girmesiyle ilk olarak Home Insurance ve ardından Tacoma Building binalarının yükselmeye başladığı görülmektedir [12]. Gökdelenlerin tarihinde ise Empire State binasının ayrı bir yeri vardır. Bu bina ABD'ye büyük bir prestij kazandırmıştır. Empire State'in getirdiği gibi bir prestij kazanmak isteyen diğer ülkelerde yükselme yarışı başlamıştır [13].

Binalar yükseldikçe çevresel koşullardan etkileme oranı da bir o kadar artmıştır. Bu sebeple sadece yükselmek yetmemiş, sürdürülebilir olma, çevreye uyum sağlama, binayı koruma gibi önemli parametreler inşaat sürecine dâhil olmuştur. Örneğin; Gordon Bunshaft'ın Cidde'de yaptığı National Commercial Bank'ın inşaatında, o zamanların modası olan dış cephede cam giydirmeye yerine iklime uygun taş kaplı masif duvarlar kullanmıştır [15]. Bahreyn Dünya Ticaret Merkezi'nin tasarımında ise rüzgâr enerjisini kullanmak üzere yelken formunda iki simetrik kule üç rüzgâr türbiniyle bağlanmıştır [16].

Petronas Twin Tower'ın tasarımında 41. ve 42. katlar arasındaki iki kuleyi birbirine bağlayan 58 metrelik çelik köprü acil durumlarda yangın çıkışı olarak

¹ CTBUH: "Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Yüksek Binalar ve Kentsel Habitat Konseyi (CTBUH)", şehirlerin geleceğiyle üzerinde çalışan bir kuruluştur [14].

kullanılması amacıyla yapıldığı ve her iki kuleye de tam olarak bağlı olmadığı için yoğun rüzgâr ve deprem durumlarında ayrı hareket edebilmektedir [17].

Hong Kong'da bulunan International Commerce Centre'in tasarımında nüfus fazla ve yerleşim alanı oldukça dar olduğundan; şehrin yatay konumunda düzenlenen toplu taşıma araçları binanın içinden geçirilmektedir. Böylece yatay ve dikey mimari ihtiyaca göre tasarlanmıştır [18]. Shanghai World Financial Center tasarımında, sağlamlık için her seviyede küçük çevre kolonları ve çevre kemer kiriş elemanları yapılmıştır. Öyle ki bu elemanlar çökme olmadan binadan sökülebilmektedir [19].

Taipei 101 binası bir kıyı şeridinde inşa edildiği için zayıf zemin koşulları, deprem ve tayfun rüzgârlarına karşı süper sütunlar ve çelik plakalar gibi elemanların kullanıldığı görülmektedir [20]. New York'ta Nordstrom Tower binasındaki gün ışığı hasarını yapan iklim tabanlı gün ışığı modellemesi ile yapının tasarımının geliştirilmesinde öngörülen sorunlar için önlemler alınmasında kullanılmıştır [21]. One World Trade Center binası yükseldikçe köşelerle birleşen aerodinamik bir forma dönüşerek rüzgâr yüklerini yöneltmektedir [22].

Mekke'deki Abraj Al Bait kulesindeki, konut ve ticari birimler her yıl büyük miktarda elektrik enerjisi tüketmektedir. Bu nedenle, saat kulesinin küçük (laboratuvar boyutunda) bir modeli üretilip rüzgâr ve güneş enerjisi cihazlarının örnekleriyle donatılmıştır. Mevcut hesaplamalara dayanarak, ekipman kurulumunun oldukça düşük maliyetiyle elektrik faturasında büyük tasarruf sağlanabildiği gösterilmiştir [23].

Shanghai Tower'ın inşaatında da Şanghay'da sıkça görülen tayfun kuvvetindeki rüzgârlara dayanmasını sağlamak için tasarım ekibi, kulenin asimetrik formu, daralan profili ve yuvarlatılmış köşelerinden oluşan üç temel strateji ile binayı tasarlamıştır [24].

Dünya'nın ikon yapılarından biri olan Burj Khalifa, ulusal ve uluslararası dergiler, makaleler, haberler, posterler ve sunumlar gibi birçok çalışmaya konu olmuştur.

William F. Baker ve diğerlerinin, 2009 yılında yayımladıkları, "Dünyanın En Yüksek Yapısını Tasarlamının Zorlukları: Burj Dubai Kulesi" başlıklı makalede; kulenin tasarım sürecini ve felsefesini, tasarım ekibini, yanal rüzgârlar ve yerçekimi yükleriyle etkileşimini, inşaatın nasıl yapıldığını ve sorunların başarıyla aşılmasında kullanılan teknolojiyi analizlerle anlatmışlardır [5].

Subramanian, 2010 yılında, "Burj Khalifa, Dünyanın En Uzun Yapısı" başlıklı makalesinde; yapının tasarım ile ilgili sayısal ifadeleri, planları, strüktürel sistemi, rüzgâr yüküne karşı kullanılan mühendislik kararları,

temel, cephe ve mekanik detayları ve bazı özel teknolojik ve teknik sistemleri aktarılmıştır [25].

Zeyna Sanjania, 2012 yılında, "Burj Khalifa: Bir İkon" başlıklı tez çalışmasında; Burj Khalifa'nın mimari özelliklerini, kişisel deneyimlerini ve bu deneyimleriyle ilgili çıkarımlarını anlatmıştır [26].

Bill Baker ve diğerleri, 2015 yılında, "Dünyanın En Yüksek Binalarının Tasarımı ve İnşası: Burj Khalifa, Dubai" başlıklı makalede; tasarım sürecini, mimari çözümlerini ve formunu, rüzgâr yüküne karşı kullanılan mühendisliği, temel detayını, inşaat yöntemlerini, beton teknolojisini ve tasarım süreci boyunca edinilen yeni tecrübelerini anlatmıştır [6].

Mohammed Bin Rashid, 2016 yılında, "Zirvede, Burj Khalifa" başlıklı bilgi broşüründe; yapının iç ve dış tasarımını, strüktürel sistemini, mekanik sistemini, kırdığı dünya rekorlarını, tasarım kararları ile ilgili sayısal ifadeleri kullanarak birçok başlık açmış ve bu bilgileri özet niteliğinde anlatmıştır [4].

Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM), "Burj Khalifa Dünyanın En Yüksek Binasının Mühendisliği" başlıklı sunum çalışmasında; yapının neredeyse her açıdan görselleri bulunmaktadır. İnşaat süreci aşama aşama görsellerle desteklenerek anlatılmıştır. Mühendisliği ile ilgili neredeyse her detayın yer aldığı bu sunum 233 sayfa ile büyük bir arşivdir [27].

Ekoyapı Dergisinde 2017 yılında yayımlanan, "Burj Khalifa: Çöl Çiçeğinden Gökyüzüne Yükselmek" başlıklı çalışmada yapının genel özelliklerinden üç kısa paragrafta özet niteliğinde bahsedilmiştir [28].

Abraham, 2019 yılında, "Çağdaş Dünyada Etkin Proje Yönetimi Gelişmeler: Örnek Olay İncelemesi Burj Khalifa Kulesi" başlıklı makalede; yapının tasarım stratejisini, inşaat kronolojisini ve proje yönetim aşamalarını anlatmıştır [8].

Shubham Jain'in, 2019 yılında, "Örnek Olay İncelemesi Burj Khalifa, Dubai" başlıklı sunum çalışmasında ise mimari açıdan inceleme ağır basmaktadır. Yoğun bir şekilde kat planları, genel özellikleri, detaylı teknik özellikleri, strüktürel sistemi, teknolojik özellikleri, kulenin pozitif ve negatif yönleri anlatmıştır [29].

Makalede, Dubai'nin doğal çevre verilerinden yola çıkarak Burj Khalifa'nın tasarımında alınan kararlar, yukarıdaki çalışmaların perspektifinden faydalanılarak hazırlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Dünya'nın ikonik yapısından biri olan Burj Khalifa aslında Burj Dubai olarak adlandırılmışken [30]; 2010 yılında açılış esnasında projeyi bitirmek için fon sağlayan Birleşik Arap Emirlikleri Başkanı Khalifa bin

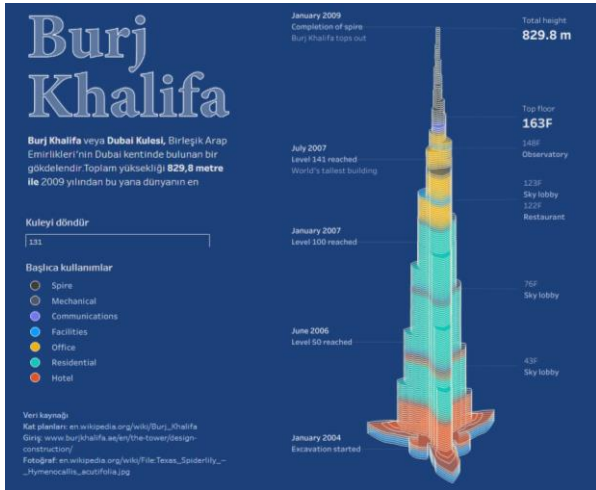
Zayed Al Nahyan'ın onuruna Burj Khalifa olarak yeniden adlandırıldığı duyurulmuştur [31].

Birleşik Arap Emirlikleri'nde Dubai'nin tam merkezinde yer alan "Şekil 1." Burj Khalifa, şimdiye kadar inşa edilmiş en yüksek gökdelendir. Öyle ki Ramazan orucunu açmak için 150. katın üzerinde yaşayanların üç dakika, 80. katın üzerinde yaşayanların iki dakika beklemesi gerekmektedir [32]. Bu devasa kule dünyanın en önemli turistik yerlerinden biri olarak kabul edilmektedir [8].



Şekil 1. Burj Khalifa [27].

Yüzlerce mühendis ve 100 farklı uyruktan olan yaklaşık 12 bin işçi ile 2004 yılında inşaatına başlanıp 22 milyon saat mesai yapılarak 2010 yılında tamamlanmıştır [33]. Burj Khalifa; otel, rezidans, restoran, gözlem güverteleri, fitness, eğlence kulübü, cami ve 37 katlı şirket ofisleriyle 160 katlı "Şekil 2." çok amaçlı bir kuledir [8].

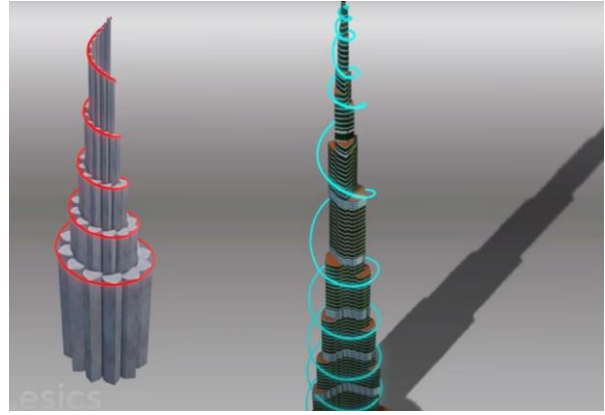


Şekil 2. Burj Khalifa'nın inşaat kronolojisi [34].

Kulenin ana tasarım konseptine, üç eksenli sarmal geometrisiyle organik bir forma sahip olan, yerli bir çöl çiçeği ilham vermiştir "Şekil 3." Kule merkezi bir çekirdeğe bağlanan üç ayrı kanadın oluşturduğu "Y" formu bir plana sahiptir. Kule yükseldikçe, her kattaki bir kanat, spiral "Şekil 4." bir şekilde geriye çekilerek olumsuz koşulları engellemeye yönelik tasarlanmıştır [6].

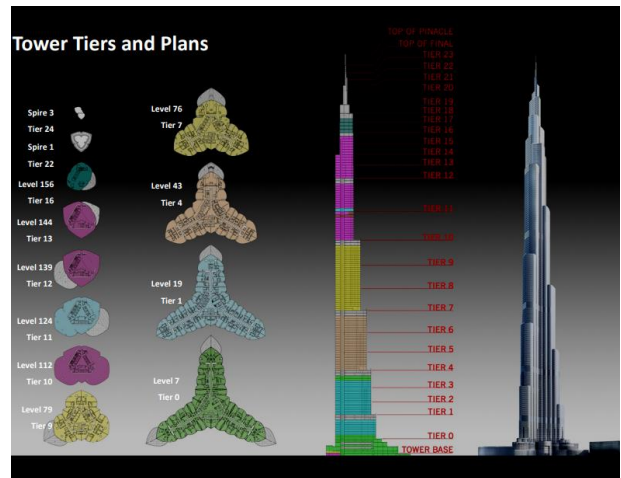


Şekil 3. Tasarım Konsepti [27].



Şekil 4.: Spiralleşen kulenin simülasyonu [35].

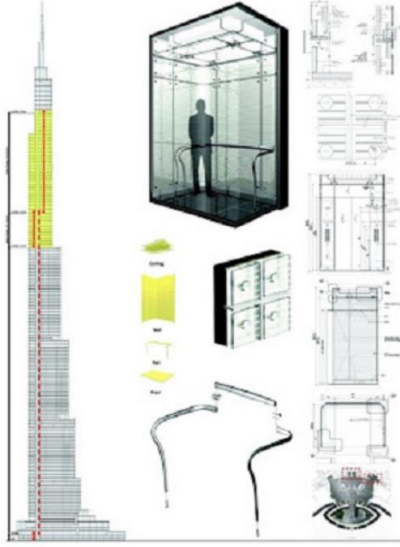
Plan düzleminin merkezinde bulunan farklı yüksekliklerdeki hacimler, çekirdeğin etrafında yükselerek yapının formu oluşturulmuştur. Yapı, spiral şeklinde yukarı doğru yükseldikçe belirli kotlarda kütle parçaları azalmaktadır "Şekil 5.". Doruk noktasına gelindiğinde ise merkezindeki çekirdek sivri bir kule ucuna dönüşmektedir. Her bir kütsel eksilme ile binanın genişliği de azalmaktadır [36].



Şekil 5. Kulenin katman ve planları [27].

Gökdelen, 160. kata kadar 2.909 basamağa sahiptir [37]. Dünya'nın en hızlısı ünvanını alan; maksimum

5.500 kiloyu taşıyabilen, 46 kişilik 57 asansöre sahiptir. Böylece kulenin saniyede 10 metre yükselen asansör sistemleriyle sadece 50 saniyede 120'nci kata çıkılmaktadır "Şekil 6." [33].



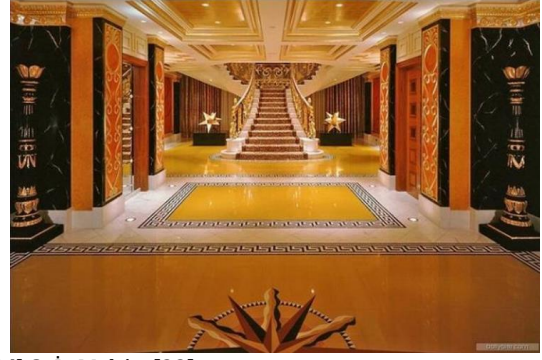
Şekil 6. Asansör sistemi [33].

Gökdelenin dış cephesi 26 bin özel üretilmiş cam panelden oluşmakta ve camların temizliği 3 veya 4 ay sürmektedir. Camın dış yüzeyi güneş ışığını bir ayna gibi yansıtırken "Şekil 7." iç kısmına yerleştirilmiş gümüş plakalar, binanın aşırı ısınmasını önlemek için, kızılötesi ışınları engelleyen bir katman oluşturmaktadır [33].



Şekil 7. Dış yüzeydeki yansıtıcı camlar [27].

Burj Khalifa'nın iç mimarlığını Nada Andric yapmıştır. Andric, ilhamını Dubai'nin yerel kültürünü "Şekil 8." kriter alarak tasarlamış olduğu iç mekânlarda; Venedik siva duvarlar², gümüş traverten döşemeler, paslanmaz çelik, cam, doğal taşlar ve el dokuması kilimler kullanmıştır [33].



Şekil 8. İç Mekân [33].

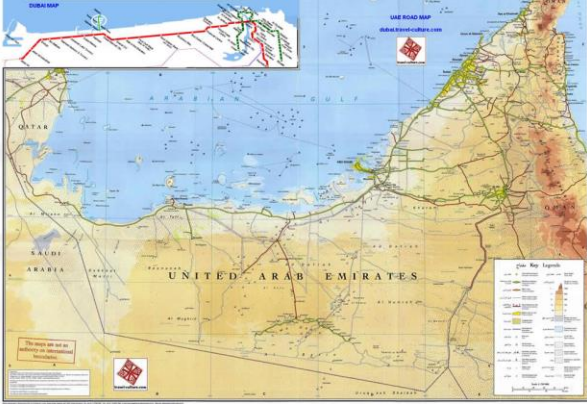
Burj Khalifa binasının tasarım kararları Dubai kentinin 2023 yılı doğal çevre verileri olan topografya, iklim, güneş ve rüzgâr parametreleri üzerinden ele alınmıştır. Burj Khalifa için tasarımı ve uygulamayı etkileyen bu kısıt ve sorunlara karşı üretilen çözümlerin detaylı olarak aktarılması için tasarımcılar tarafından hazırlanmış olan görsel simülasyon grafikleri aktarılmıştır. Böylece çevresel verilerin bina ile olan etkileşiminin okunması kolaylaştırılarak algılanması sağlanmıştır. Üretilen çözümlerin üzerinde durulmuştur. Bununla birlikte gökdelenlerin inşa sürecinden Burj Khalifa'ya doğru tasarımı etkileyen doğal çevre faktörlerinin anlaşılabilmesi için yerli ve yabancı literatür taranmıştır. Burj Khalifa özelinde ise yapı ile ilgili yapılmış yeterli çalışma olmadığından tasarım sürecini aktaran kaynaklardan faydalanılmıştır. Yapı, yazılı, basılı ve dijital yerli/yabancı kaynaklardan faydalanılarak mimari tasarım sürecinde doğal çevre verileri ve bu verilerin getirdiği zorluklara karşı alınan mühendislik ve tasarım çözümlerini detaylı bir şekilde ele alınması kapsamında değerlendirilmiştir. Gelecekte yapılacak bu tür yapılarda doğal çevre verileri dikkate alınarak tasarım yapılması önerilmektedir. Örneğin çöl ikliminde kum fırtınaları ve güneş parametreleri öne çıkarken daha ılıman iklimde nem, soğuk iklimde ısı kayıpları veya tropik iklimde yağış gibi faktörler tasarımda temel alınmaktadır. Bu bağlamda gökdelen tasarımında baz alınacak doğal çevre verileri tartışılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Topografya

Dubai kenti, kuzey yarım kürede 55°18' doğu boylamı, 25°16' kuzey enlemi üzerindedir [39]. Deniz seviyesinden ortalama 2 metre yüksekliğe konumlanmıştır [40]. Dubai, Basra Körfezi'nin kıyısında yer edinmiş 1971'den beridir kurulmuş Birleşik Arap Emirliği'ne "Şekil 9." ait yedi emirlikten biridir [41]. Abu Dhabi'nin ardından 3.885 km² ile Dubai ikinci en büyük yüzölçümüne sahip emirliktir [42].

²Venedik Sıvası: Temel bileşenleri; ince kireç tozu, doğal pigmentler ve mermer tozu olan bu karışım, duvara uygulandığında sertleşerek neme karşı dirençli bir yüzey oluşmasını sağlayan geleneksel bir duvar kaplama yöntemidir [38].



Şekil 9. Birleşik Arap Emirlikleri Fiziki Haritası [43].

Burj Khalifa, Dubai'nin şehir merkezinin yakınında yer almaktadır "Şekil 10." [25].



Şekil 10. Dubai Haritası [44].

Bu devasa yapı 500.000 ton ağırlığındadır. Sadece 3,7 metre kalınlığındaki podyum³, üçgen çerçeve temelinde dayanmaktadır [29].

Çerçeveyi destekleyen kazıklar 1,5 metre çapında olup 43 metre uzunluğa sahiptir "Şekil 11." Her bir kazığın kapasitesi 3000 tondur [5].



Şekil 11. Kazıklar [29].

³ Podyum, kuleyi zemine sabitleyen taban olarak adlandırılır [29].

⁴ Hem radye temelin hem de kazıkların kullanıldığı bu temel sistemine kazık destekli radye temel denilmektedir. Kazıklı radye temel; kazık, zemin ve radye olmak üzere üç taşıyıcı elemandan oluşan kompozit bir yapıdır [45].

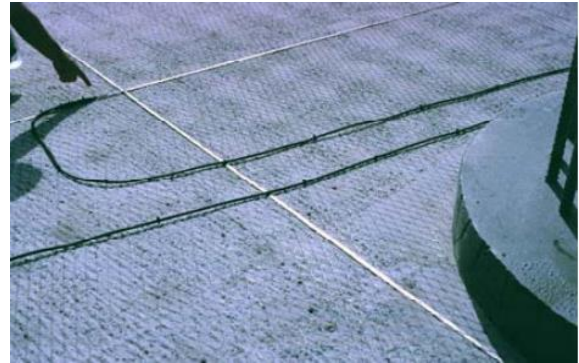
⁵ Beton, içeriğindeki malzemeler sebebiyle tozuma oluşturmaya elverişli bir yapıdadır. Artırılmış beton kaplama uygulamasında kullanılan ürünler betonun

Podyum, üç kanat ve bir merkez çekirdekle dört ayrı bölüm üzerine inşa edilmiştir "Şekil 12." Kule temelleri, kazık destekli radye temelden⁴ oluşmaktadır [5].



Şekil 12. Temel İnşaatı [5].

Devasa ölçüğe sahip olan bu yapı için problemleri saha koşulları sebebiyle çözüm üretilmesi gereken sorunlar ortaya çıkmıştır. Zemin yüzeyinin yaklaşık 2 metre altında bulunan su, son derece aşındırıcı özellik göstermektedir. Zemin yüzeyine yakın olan su, deniz suyundan yaklaşık üç kat daha fazla sülfat ve klorür içermektedir. Kule için temel sistemi uzun vadeli bütünlüğünü korumak için titiz bir şekilde korozyon önleyici programlarla takip edilmiştir. Su yalıtım sistemleri, artırılmış beton kaplama⁵ ve betona korozyon önleyicilerin eklenmesi ile sıkı bir çatlak kontrolü sağlanmıştır. Radye temelde titanyum ağ⁶ kullanılarak akım katodik koruma sistemi⁷ "Şekil 13." ve kontrollü geçirgenlik kalıp astarı uygulanmıştır [5].



Şekil 13. Akım Katodik Koruma Sistemi [5].

3.2. İklim

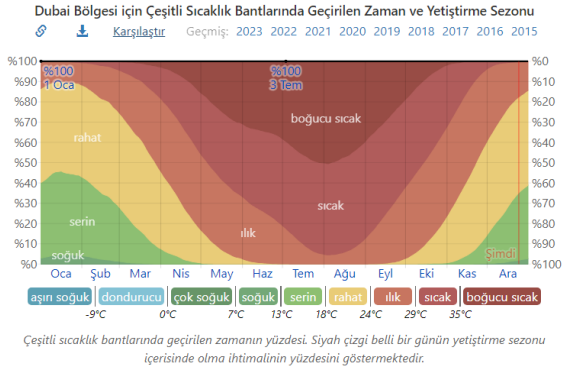
Birleşik Arap Emirlikleri, sırasıyla iki geçiş dönemine ayrılan kış ve yaz olmak üzere iki ana mevsimden oluşan kurak bir çöl iklimine sahiptir. Kış mevsiminde sıcaklık 16,4°C -24°C arasındadır. Yaz mevsiminde ise 50°C ye kadar yükselebilen aşırı sıcaklıklar görülmektedir [49]. "Şekil 14."de özet bir şekilde tüm yıl için saatlik ortalama sıcaklıklar gösterilmektedir. Dikey eksen o günün saatini, yatay eksen o yılın gününü, renk ise o saat ve gün içindeki ortalama

içine nüfuz ederek sertleşmesini ve yoğunlaşmasını sağlayıp, yüzeyin dayanımını artırır. Böylece sağlıklı ve uzun ömürlü betonlar elde edilmektedir [46].

⁶ Titanyum ağ: Asit ve alkali çevre koşullarında ortamları ayırarak tarama ve filtrasyon için kullanılmaktadır [47].

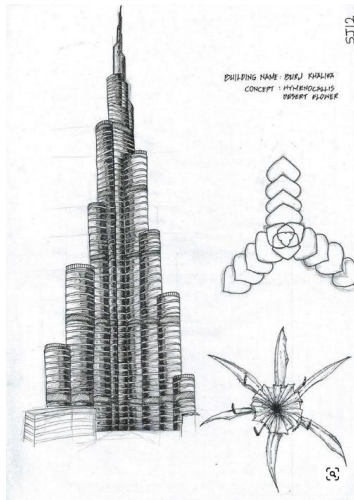
⁷ Katodik Koruma: Metal yapıların korozyondan dolayı deforme olmaması için kullanılan bir tekniktir [48].

sıcaklığı ifade etmektedir. Yıl boyunca sıcak-ılık hava etkisindeyken; Nisan ve Ekim ayları arasında boğucu sıcak- sıcak- ılık hava etkisinin büyük oranda yaşandığı, kış aylarında ise rahat havanın etkisinde olduğu görülmektedir [40].



Şekil 14. Sıcaklık Bandı [40].

Birleşik Arap Emirlikleri topraklarının yaklaşık %80'i çölle kaplıdır. Dünya Bankası verilerine göre ülkenin tarım arazilerinde 2002'den 2018 yılına kadar nerdeyse %50 azalmıştır [50]. Dubai Çöl Koruma Alanı (DDCR), Birleşik Arap Emirlikleri hükümeti tarafından 225 km² lik doğa koruma alanı olarak ilan edilen bölge 50'den fazla bitki, 43 memeli, 120 kuş ve sürüngen türlerine ev sahipliği yapmaktadır. [51]. Burj Khalifa ile ilgili tasarım kararları alınırken bu iklimlerde yetişen "Hymenocallis" adlı çöl çiçeğinden "Şekil 15." İlham alınarak oluşturulmuştur [52].



Şekil 15. Burj Khalifa Tasarım Eskizi [53].

Dubai, su kıtlığının en yüksek olduğu kentlerden biridir [53]. Su ihtiyacı, denizden arıtılan ve göllerinden elde edilen sular ile karşılanmaktadır [54]. Bu sebeple su çok değerlidir. Burj Khalifa da bu kıymetli suyu gelişmiş sistemler ile değerlendirmektedir. Yoğuşma suyunu geri kazanma sistemi bunlardan biridir "Şekil 16.". Klima sistemlerinden yoğuşan su toplanarak sulama tanklarına gönderilmektedir. Yılda 15 milyon galon su sağlayan bu tanklar ile peyzaj "Şekil 17." sulaması yapılmaktadır [29].

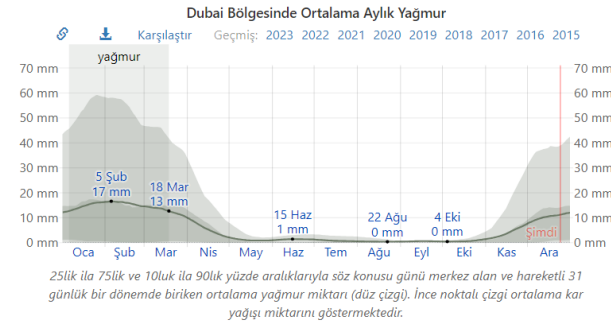


Şekil 16. Yoğuşma suyunu geri kazanma sistemi [29].



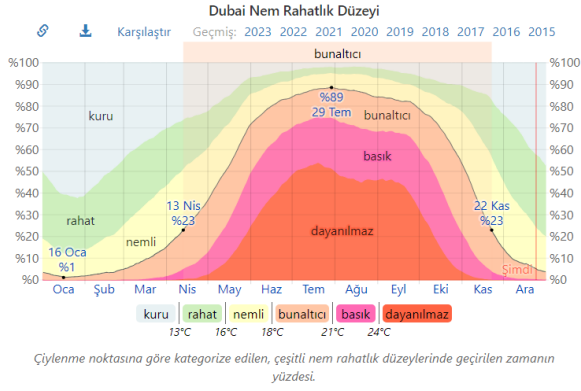
Şekil 17. Peyzaj [29].

Birleşik Arap Emirlikleri'nde yağışlar seyrek ve tutarsızdır [49]. "Şekil 18."de Dubai'nin 31 günlük dönemler üzerinden aylar içerisindeki yağış miktarı gösterilmektedir. Yılın yağmurlu dönemi 6 Ocak tarihinden 17 Mart tarihine kadar 2,4 ay boyunca sürdüğü görülmektedir. Yağmursuz dönemi ise 17 Mart tarihinden 6 Ocak tarihine kadar 9,6 ay boyunca sürdüğü görülmektedir. Dubai bölgesinde en yağmurlu ay Şubat olup, en az yağmurlu ayı ise Ağustos ayıdır [40].



Şekil 18. Ortalama Aylık Yağmur Grafiği [40].

Dubai'de nem rahatlık düzeyi için çiylenme noktaları dikkate alınmıştır "Şekil 19." Yüksek çiylenme nemli hissedilirken düşük çiylenme kuru hissettirmektedir. Yıl içerisindeki en bunaltıcı dönem 12 Nisan tarihinden 21 Kasım tarihine kadar 7,3 ay ve %23 civarında dayanılmaz, basık ve bunaltıcı hissedilmektedir. En az sayıdaki bunaltıcı günler ise Ocak ayında yaşanmaktadır [40].



Çizimleme noktasına göre kategorize edilen, çeşitli nem rahatlık düzeylerinde geçirilen zamanın yüzdesi.

Şekil 19. Dubai Nem Rahatlık Düzeyi [40].

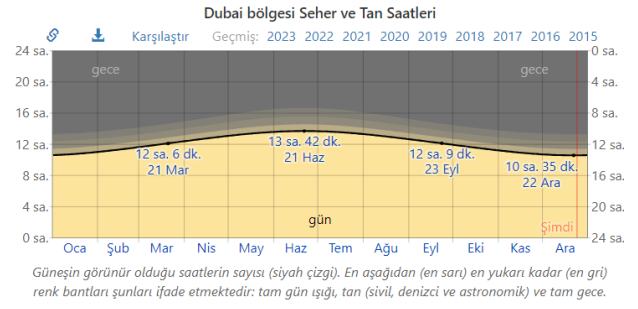
Dubai'nin bu iklim şartlarından ötürü Burj Khalifa'nın inşaatında ilk önce merkezi çekirdeğin ve döşemelerin üç bölüm halinde dökülmesini, ardından kanat duvarları, kanat burun kolonlarının ve döşemelerin dökülmesiyle bu süreç başlanmıştır. Hidratasyon ısısından yararlanmak için beton karıştırma ve yerleştirme yöntemleri belirlenmiştir [6]. Böylece çimento bileşenleri çözünmeye devam etse de ısı çıkış hızı hemen hemen sabit kalmaktadır [55]. Bu yöntemlerden biri C50 beton karışımını yavaşlatmak üzere %40 uçucu kül eklenip su/çimento oranı 0.34 olarak kullanılmasıdır. Ek olarak, ısı kazanımını sınırlamak için bir miktar buz kullanılmıştır. Betonun bu karışımında hata olup olmadığını tespit etmek için ise bir test programı "Şekil 20." başlatılarak 3,7 m test küpleri dökülüp sıcaklık performansı ölçülmüştür [6].



Şekil 20. Test Programı [27].

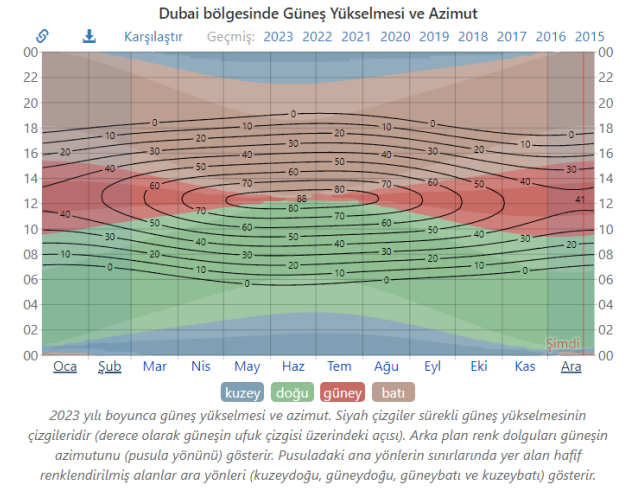
3.3. Güneş

Dubai'de gün uzunluğu yıl boyunca değişiklik göstermektedir "Şekil 21.". En kısa gün, 2023 22 Aralık tarihinde 10 saat 35 dakika iken, en uzun gün ise 2023 21 Haziran tarihinde 13 saat 42 dakika olarak yaşanmıştır [40].



Şekil 21. Dubai için seher ve tan saatleri grafiği [40].

Aşağıdaki grafikte güneşin ufuk çizgisi üzerindeki açısını (güneş yükselmesini) ve pusula yönü (azimutu) gösterilmektedir "Şekil 22.". Dikey eksen günün saatini, yatay eksen ise günü temsil etmektedir [40].



Şekil 22. Güneş yükselmesi ve azimutu [40].

Burj Khalifa'nın dış kaplaması yansıtıcı alüminyumdan ve çok sayıda küçük boru şeklindeki kanatçıklı paslanmaz çelik köşelikli panellerden oluşmaktadır. Bu sistem güçlü çöl sıcağına ve güneş ışınlarına daha iyi direnmek için tasarlanmıştır [25]. Birçok yazılı, basılı ve görsel kaynaktan işlenen Burj Khalifa ile ilgili yapılan bir belgeselin sunucusu olan Richard Hammond bu özel cam panellerin çöl sıcağına nasıl direndiğini ispatlamak için minyatür iki oda hazırlayarak bir deney yapmıştır. Bu iki odada tüm özellikleri aynı tutup sadece camlarını farklı kullanmıştır "Şekil 23.". Odalardan birinde Burj Khalifa' da kullanılan özel cam panel, diğerinde ise sıradan cam panel kullanmıştır [56].



Şekil 23. Deney düzeneği [56].

Gündüz, güneşin vurduğu bir noktada iki odanın içinde aynı anda tavanın içine birer yumurta kırarak belli bir süre tutmuştur. İlk olarak her iki oda 33°C

iken bekleme sonucu özel cam paneller ile oluşturulan oda sıcaklığı 40°C'de "Şekil 24." sabit kalırken, sıradan cam kullanılan odanın sıcaklığı 88°C'ye "Şekil 25." çıkarak yumurtayı pişirmiştir [56].



Şekil 24. Özel cam panelli oda 40°C [56].



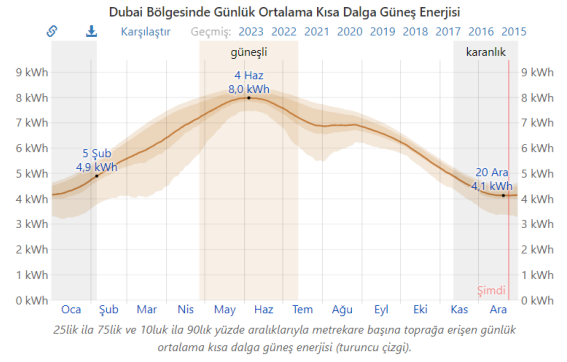
Şekil 25. Sıradan cam panelli oda 88°C [56].

Dış cephe kaplamasında 28.261 adet cam panel tek tek elle kesilerek kullanılmıştır. Kule, 18 adet kalıcı olarak monte edilmiş ray ve sabit teleskopik kızak ile donatılmıştır "Şekil 26.". Bu raya monteli üniteler, dış cephe bakımında kullanılmaktadır [25].



Şekil 26. İnşaat süreci [25].

Güneş, ultraviyole ve kısa dalga radyasyonlarına sahiptir. Kısa dalgalar ile gelen güneş ışığının ortalama günlük enerjisi yıl boyunca ciddi oranlarda farklılıklar göstermektedir "Şekil 27.". Dubai bölgesinde en güneşli ay olan Haziran ayında ortalama 7,8 kWh enerji yayarken; güneş ışınlarının az olan dönemi olan Aralık ayında metrekare başına ortalama 4,2 kWh enerjinin altında günlük ortalama kısa dalga enerjisi yaymaktadır [40].



Şekil 27. Kısa dalga güneş enerjisi grafiği [40].

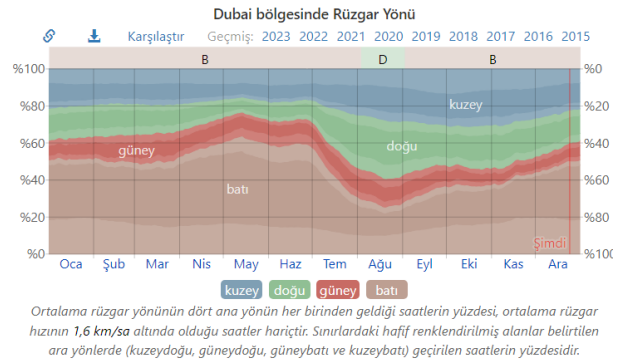
Güneş enerjisini kullanmak için, Burj Khalifa'da, 2,7 m²'lik alana 378 güneş paneli yerleştirilerek 32.000 kWh enerji elde edilmektedir "Şekil 28.". Bu enerji de kule için kullanılmaktadır [29].



Şekil 28. Güneş panelleri [29].

3.4. Rüzgâr

Yeryüzünün ısınması ve soğuması sonucunda ortaya çıkan kuvvetlerin etkisiyle yatay yönde devamlı yer değiştirebilen atmosfer basıncıyla oluşan hava hareketine "rüzgâr" denilmektedir [58]. Rüzgâr, bu hava hareketiyle mimari tasarımlarda binalarda titreşime neden olmaktadır. Rüzgâr sonucu oluşan titreşimler dış cephedeki camları, panelleri ve diğer bileşenleri etkilediğinden yapıların tasarımını değiştiren doğal faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Rüzgâr yükünün yapıya etkisi, titreşimin şiddetine, hızına ve yönlenmesine göre değişiklikler göstermektedir [59]. "Şekil 29." da Dubai için rüzgârın yıl boyunca dört ana yönden esse de batı yönlü rüzgârın etkisi daha baskın görülmektedir [40].



Ortalama rüzgâr yönünün dört ana yönün her birinden geldiği saatlerin yüzdesi, ortalama rüzgâr hızının 1,6 km/sa altında olduğu saatler hariçtir. Sınırlardaki hafif renklendirilmiş alanlar belirtilen ara yönlerde (kuzeydoğu, güneydoğu, güneybatı ve kuzeybatı) geçirilen saatlerin yüzdesidir.

Şekil 29.Rüzgâr yönü grafiği [40].

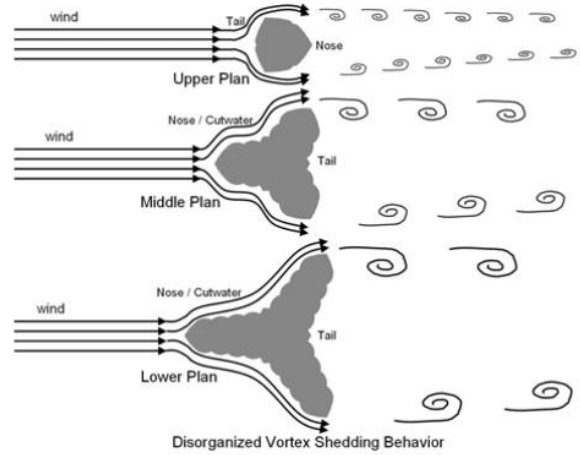
Dubai, çöl üzerine kurulduğundan dolayı sık sık kum fırtınaları yaşanmaktadır. Buradaki kum fırtınalarının hızı ortalama, saate 40 ila 150 km arasında farklılıklar göstermektedir [57]. Burj Khalifa'nın tasarım sürecinde de rüzgâr yükü kritik bir rol oynamıştır [6]. Kum fırtınalarının yaşandığı durumlarda devasa binanın yan yatmaması için "Şekil 30." yapı temelinin uçlarındaki beton kazıklarının sayısını arttırmak uygun görülmüştür [57].

**Şekil 30.** Kum fırtınası simülasyonu [35].

Rüzgârın yapı üzerindeki etkisini belirlemek ve tasarımı bu yönde düzenlemek üzere kapsamlı bir rüzgâr tüneli programı gerçekleştirilmiştir. Analiz ve tasarım için ABD'li Computers&Structures Inc. firmasının geliştirdiği "ETABS" yazılımı kullanılmıştır [25]. Her test turunda veriler bu yazılım aracılığıyla analiz edilip bina yeniden şekillendirilmiştir [6]. Bu çalışmada çoğunlukla 1: 500 ölçekte modeller kullanılmıştır. Bu modellerde katı model kuvvet dengesi testleri, tam aeroelastik⁸ model çalışması "Şekil 31.", yerel basınç ölçümleri ve yaya rüzgârı ortamı çalışmaları incelenmiştir [5].

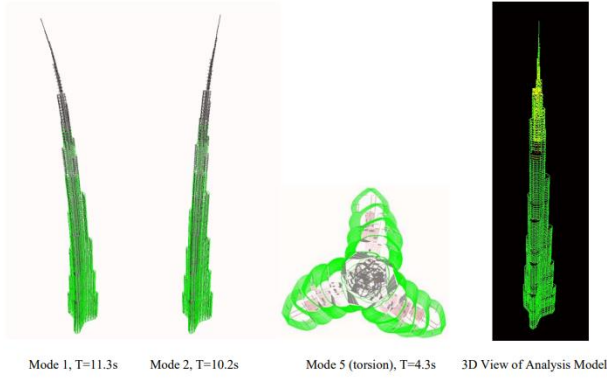
**Şekil 31.** Aeroelastik Rüzgâr Tüneli Modeli [5].

Binaya aeroelastik rüzgâr tüneli üzerinden çeşitli revizyonlar yapılmıştır. Bazı revizyonlar kulenin geometrisiyle ilgili olarak: kanatların boyutu ve şekliyle, geri çekilmelerin sayısı ve aralıkları süreç boyunca değiştirilmiştir. Bir diğer revizyon da binanın yönlendirmesiyle ilgilidir. Kulenin altı önemli rüzgâr yönü vardır. Bu yönlerin hepsi kanatların ana eksenlerine paraleldir. Rüzgârın her bir kanadın "burnuna" doğru estiği üç yön ve rüzgârın her bir kanadın "kuyruğuna" doğru estiği üç yön "Şekil 32." binanın merkezindedir [6].

**Şekil 32.** Kuledeki Rüzgâr Davranışı [6].

Kule inşaat sürecinde dahi rüzgâr tüneli tesisinde test edilerek her zaman güvenlik sağlanmıştır. Kulenin şekli rüzgâr kuvvetlerinin çok azalmasını sağlamıştır. Üç boyutlu ve dinamik analiz "Şekil 33."; kulenin en yüksek noktasında toplam 1,5 metre sallanır, birinci modun periyodu 11,3 saniye, dikey yanal mod 10,2 saniye ve beşinci burulma modu 4,3 saniye olduğunu göstermiştir [25].

⁸ Aeroelastisite, "elastik, ataletsel ve aerodinamik kuvvetlerinin mühendislikteki elastik yapıların üzerindeki etkileşimini inceleyen bir çalışma alanıdır" [60].



Şekil 33. Üç Boyutlu Analiz Modeli ve Dinamik Mod Şekilleri [5].

Bu sonuçlar, tahmin edilen bina hareketlerini ISO (International Organization for Standardization) standartlarının tavsiye edilen değerleri içinde olduğunu göstermiştir [5].

4. Tartışma ve Sonuç

Yapı tasarımları ile ilgili kararların alınmasında doğal çevre verileri büyük önem taşımaktadır. Topografya, iklim, güneş ve rüzgârın kontrol edilmesinin bir yapı üzerindeki etkileri kullanıcının konforunu ve binanın sürdürülebilirliğini belirleyen en önemli etkenlerdendir. Bu çalışmada “Dikey Şehir” “Yaşayan Harika” olarak tanımlanan [4] Burj Khalifa binasına odaklanılmıştır.

Dünyanın en yüksek binası olarak, inşaat sürecindeki zorluklar karşısında alınan tasarım kararları ile çevresel etkenleri ustalıkla yönetmiş olan ve dünyanın enleriyle tanınan Burj Khalifa, zorlu bir doğal çevre içerisinde uyguladığı çözümleri detaylı bir şekilde ele almasıyla dikkat çekmiştir.

Dubai, kum fırtınalarının ve denizden gelen rüzgârların etkisi altındaki bir kenttir. Burj Khalifa için “Hymenocallis” adlı bir çöl çiçeğinin formunun bu kuvvetlere karşı dayanıklı olmak için güçlü bir esin kaynağı olduğu görülmüştür. Kulenin oturduğu zeminin aşındırıcı ve zayıf olmasına karşın alınan önlemler ve üretilen çözümler, başarılı bir işbirliği örneğidir. Dubai’nin zorlu iklim koşullarında su kullanımı ve güneşin etkisinin avantaja çevrildiği görülmüştür.

Sonuç olarak, bu devasa yapının tasarımcıları proje yönetimini en iyi şekilde sürdürerek Dubai toplumuna ve ekonomisine büyük katkılar sağlamıştır. Burj Khalifa; yapısal sistem gereksinimleri, mühendislik becerileri, şartları zorlayan çözümleri, kullanılan son teknolojileri ve mimari estetiğiyle bundan sonraki tasarımlar için bir ilham kaynağı niteliindedir.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında

uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Hasol, D. 2007. Yüksek, Daha Yüksek, En Yüksek!. <http://www.doganhasol.net/yuksek-daha-yuksek-en-yuksek-2.html> (Erişim Tarihi: 18.11.2023).
- [2] Hasol, D. (2001) “İkiz Kulelerin Düşündürdükleri”, YAPI dergisi, 239/Ekim 2001, s.41-42. <https://www.doganhasol.net/ikizkulelerin-dusundurdukleri-2.html> (Erişim Tarihi: 16.08.2024).
- [3] Hasol, D. (1999) “Japonya’dan İzlenimler”, Mimari İzlenimler, YEM Yayın, 1999, s.153. <https://www.doganhasol.net/japonyadan-izlenimler-2.html> (Erişim Tarihi: 16.08.2024).
- [4] Boulevard, R., B., M. 2016. At The Top Burj Khalifa. Fact Sheet. <https://www.burjkhalifa.ae/img/fact-sheet.pdf> (Erişim Tarihi: 06.10.2024).
- [5] Baker, F. W., Pawlikowski, J. J., Young S. B. 2009. The Challenges in Designing the World’s Tallest Structure: The Burj Dubai Tower. Structures 2009: Don’t Mess with Structural Engineers, 1471-1480.
- [6] Baker, B., Pawlikowski J. 2015. The Design and Construction of the World’s Tallest Building: The Burj Khalifa, Dubai, Structural Engineering International, 25:4, 389-394.
- [7] Wikipedia. 2024. Burc Halife. https://tr.wikipedia.org/wiki/Burc_Halife (Erişim Tarihi: 16.08.2024).
- [8] Abraham, O. A. 2019. Effective Project Management in Contemporary Developments: Case Study Burj Khalifa Tower. Iconic Research And Engineering Journals, Volume 3, Issue 2, 690-701.
- [9] CTBUH. 2010. Criteria for Defining and Measuring Tall Buildings. https://store.ctbuh.org/PDF_Previews/Posters/Criteria_2010_Preview.pdf (Erişim Tarihi: 16.08.2024).
- [10] Fraidoon, A. B. 2020. Betonarme Yüksek Bir Binanın TBDY 2018’e Göre Tasarımı ve Deprem Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 162.
- [11] Smarthistory. 2023. Pushing the Limits, The Monadnock Building. <https://www.youtube.com/watch?v=c2hie9nlx4M> (Erişim Tarihi: 16.08.2024).

- [12] Begeç, H. 1999. Çok Katlı Binalarının Gelişiminin Biçimlenme Özellikleri Açısından Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir. 173.
- [13] Tevfik, M. 2021. Bir Zamanlar Dünyanın En Yüksek: Empire State Binası. <https://hangitarihte.com/neoldu/tarih/bir-zamanlar-dunyanin-en-yuksegi-empire-state-binası/> (Erişim Tarihi: 16.08.2024).
- [14] CTBUH. 2024. About Us. <https://www.ctbuh.org/about> (Erişim Tarihi: 16.08.2024).
- [15] Sev, A. 2011. Geçmişten Geleceğe Enerji Etkin Yüksek Yapılar Ve Uygulama Örnekleri, X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye.
- [16] Begeç, H. 2022. Yüksek Yapılarda Rüzgâr Türbinlerinin Kullanımının İncelenmesi. Eksen Dokuz Eylül Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi, 3(2). 1-18.
- [17] Arkitektuel. 2020. Petronas İkiz Kuleleri. <https://www.arkitektuel.com/petronas/> (Erişim Tarihi: 11.08.2024).
- [18] Malott, D. 2011. International Commerce Centre. Elevator World, May 2011. 76-80.
- [19] Katz, P.L., Pedersen K., Robertson L., Robertson E.L., 2008. Case Study: Shanghai World Financial Center. CTBUH Journal, 2008 Issue II. 10-14.
- [20] Shieh, S. S., Chang, C. C., & Jong, J. H. 2003. Structural Design Of Composite Super-Columns for the Taipei 101 Tower. In Proceedings of International Workshop On Steel And Concrete Composite. Constructions. 25-33.
- [21] Mardaljevic, J., Janes, G. ve Kwartler, M. 2015. The 'Nordstrom Tower': A Landmark Daylight Injury Study. School of Civil and Building Engineering, Loughborough University. CIE 28th Session, Manchester, UK, June 28- July 4, 2015.
- [22] Lewis K., Holt N. 2011. Case Study: One World Trade Center. CTBUH Journal. 2011 Issue III. 14-19.
- [23] Gawad, A., A. 2021. Development Scheme of the Clock-Tower in Makkah by Employment of Renewable Energy Resources. Cairo, Egypt. Conference: Fourteenth International Conference of Fluid Dynamics 2-3 April 2021.
- [24] Archdaily. 2016. Shanghai Tower / Gensler. <https://www.archdaily.com/783216/shanghai-tower-gensler> (Erişim Tarihi: 11.08.2024).
- [25] Subramanian N. 2010. Burj Khalifa, World is Tallest Structure, NBM & CW, Vol. 15, 199-211.
- [26] Sanjania, Z., 2012, Burj Khalifa: An Icon, De Montfort University Faculty of Art & Design Leicester School Of Architecture Arch3031 Architectural Discourse.
- [27] Young B., SOM. 2017. Burj Khalifa, Engineering the World's Tallest Building. https://seaoa.wildapricot.org/resources/Documents/2017%20Convention/2017%20Presentations/Burj_SEAOA_2017_vf.pdf (Erişim Tarihi: 02.01.2024).
- [28] EKOYAPI. 2017. Burj Khalifa: Çöl Çiçeğinden Gökyüzüne Yükselmek. <https://www.ekoyapidergisi.org/burj-khalifa-col-ciceginden-gokyuzyune-yukselmek> (Erişim Tarihi: 16.08.2024).
- [29] Jain, S. 2019. Case Study- Burj Khalifa, Dubai. <https://www.slideshare.net/ShubhamJain685/burj-khalifa-172039480> (Erişim Tarihi: 01.12.2023).
- [30] Sarık. 2019. Burj Khalifa. <https://architectuul.com/architecture/burj-khalifa> (Erişim Tarihi: 15.08.2024).
- [31] Milliyet Gazetesi. 2010. Burj Dubai'nin Adı Halife Oldu. <https://www.milliyet.com.tr/pembenar/burj-dubai-nin-adi-halife-oldu-1181923> (Erişim Tarihi: 15.08.2024).
- [32] BBC NEWS. 2011. Dubai Burj Khalifa: Ramadan fast 'lasts longer high up'. <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-14437334> (Erişim Tarihi: 02.01.2024).
- [33] Durucu, Ş. 2014. 18 Maddede Modern Zamanların Babil Kulesi Burj Al Khalifa. <https://listelist.com/babil-kulesi-burj-al-khalifa/> (Erişim Tarihi: 05.02.2024).
- [34] Durucu, Ş. 2014. 18 Maddede Modern Zamanların Babil Kulesi Burj Al Khalifa. <https://listelist.com/babil-kulesi-burj-al-khalifa/> (Erişim Tarihi: 05.02.2024).
- [35] Shija W. 2020. Workbook: Burj Khalifa (Dubai Tower). https://public.tableau.com/views/BurjKhalifaDubaiTower/TheTower?%3Aembed=y&%3AshowVizHome=no&%3Adisplay_count=y&%3Adisplay_static_image=y&%3AbootstrapWhenNotified=true&%3Alanguage=ja&%3Amobile=true&:embed=y&:showVizHome=n&:apiID=host0 (Erişim Tarihi: 01.02.2024).
- [36] Lesics. 2022. Burj Khalifa | All the Engineering Secrets of the Mega structure. <https://www.youtube.com/watch?v=SqFx0cBR0oo> (Erişim Tarihi: 25.12.2023).
- [37] Arkitektuel. 2020. Burj Khalifa. <https://www.arkitektuel.com/burj-khalifa/> (Erişim Tarihi: 01.02.2024).
- [38] Emaar Properties PJSC. Burj Khalifa. <https://www.burjkhalifa.ae/en/the-stories.aspx> (Erişim Tarihi: 16.08.2024).

- [38] Kale Mimarlık. 2024. Venedik Sıva Nedir? <https://www.italyansivaboya.com/venedik-siva-nedir/> (Erişim Tarihi: 03.01.2024).
- [39] GeoHack. 2024. GeoHack-tr:Dubai. https://geohack.toolforge.org/geohack.php?pagename=tr:Dubai¶ms=25.2697_N_55.3095_E (Erişim Tarihi: 18.08.2024).
- [40] Wearher Spark. 2023. Dubai Bölgesinde Yıl Boyu İklim ve Hava Durumu. <https://tr.weatherspark.com/y/105470/Dubai-Birle%C5%9Fik-Arap-Emirlikleri-Ortalama-Hava-Durumu-Y%C4%B1-Boyunca> (Erişim Tarihi: 25.12.2023).
- [41] Morris, J. M. 2009. United Arab Emirates. https://www.researchgate.net/publication/38183802_United_Arab_Emirates (Erişim Tarihi: 18.08.2024).
- [42] TETSİAD. BAE Ülke Raporu. <https://www.tetsiad.org/files/raporlar/bae.pdf> (Erişim Tarihi: 18.08.2024).
- [43] Birleşik Arap Emirlikleri Haritası ve Birleşik Arap Emirlikleri Uydu Görüntüleri. <https://www.turkiye-rehberi.net/birlesik-arap-emirlikleri-haritasi.asp> (Erişim Tarihi: 18.08.2024).
- [44] Dubai Haritası ve Dubai Uydu Görüntüleri. <https://www.turkiye-rehberi.net/harita/birlesik-arap-emirlikleri/dubai-haritasi.asp> (Erişim Tarihi: 18.08.2024).
- [45] Özdemir U. O. 2006. Kazıklı Radye Temellerde Taban Basıncı Değişiminin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 43s, İstanbul.
- [46] KYK Blog. 2019. Endüstriyel Zeminlerde Artırılmış Beton Dayanımı ve Tozumsuzluk. <https://www.kyk.com.tr/blogdetay-endstriyel-zeminlerde-artirilmis-betondayanimi-ve-tozumsuzluk> (Erişim Tarihi: 03.01.2024).
- [47] Baoji Tianbo Metal. 2021. Titanyum Ağ Nedir? <https://tr.tianbometal-wom.com/info/what-is-titanium-mesh61643434.html> (Erişim Tarihi: 03.01.2024).
- [48] MEB. 2011. Kimya Teknolojisi, Korozyon ve Katodik Koruma. https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Korozyon%20Ve%20Katodik%20Koruma.pdf (Erişim Tarihi: 19.08.2024).
- [49] IFRC. UNITED ARAB EMIRATES (UAE) Climate Fact Sheet. https://prddsgofilestorage.blob.core.windows.net/api/documents/UAE_-_Climate_Fact_Sheet/UAE_Climate_Fact_Sheet_EN.pdf (Erişim Tarihi: 19.08.2024).
- [50] The Level Consulting. 2023. Dubai'de tarım nasıl gelişiyor? <https://thelevelconsulting.ae/tr/media/kak-v-dubae-razvivaetsya-selskoe-khozyaistvo> (Erişim Tarihi: 18.08.2024).
- [51] Dubai Çöl Koruma Alanı. <https://www.visitdubai.com/tr/places-to-visit/dubai-desert-conservation-reserve> (Erişim Tarihi: 18.08.2024).
- [52] Garcia F.C. 2014. Burj Khalifa- A. Smith. <https://es.paperblog.com/burj-khalifa-a-smith-2858565/> (Erişim Tarihi: 08.02.2024).
- [53] UCLG-MEWA ve CDP.2021.Orta Doğu Ve Batı Asya'daki Yerel Yönetimlerden İklim Eylemi. https://uclgmewa.org/uploads/file/bde3bf4a6887485cbffbda2868fb092/Orta_Dogu_ve_Bati_Asyadaki_Yerel_Yonetimlerden_Iklim_Eylemi.pdf (Erişim Tarihi: 19.08.2024).
- [54] EURONEWS. 2023. Dubai İçme Suyu Üretimi İçin Bulut Tohumlama Gibi Teknolojileri Kullanıyor. <https://tr.euronews.com/next/2022/11/24/dubai-icme-suyu-uretimi-icin-bulut-tohumlama-gibi-teknolojileri-kullaniyor> (Erişim Tarihi: 19.08.2024).
- [55] Şahin G.F. 2022. ÇİMSA. Hidratasyon Süreçleri Nedir? Hidratasyon Aşamalarına Göre Dayanıklı Beton Nasıl Sağlanır? <https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/hidratasyon-surecleri-nedir-hidratasyon-asamalarına-gore-dayanikli-beton-nasil-saglanir/> (Erişim Tarihi: 19.08.2024).
- [56] DMAX Türkiye. 2020. Burc Halife: Dünyanın En Yüksek Gökdeleni- Richard Hammond ile Dev Yapılar. https://www.youtube.com/watch?v=JBCBDtdye_o&t=508s (Erişim Tarihi: 08.01.2024).
- [57] Yurt Gazetesi. 2023. Depremde zeminin önemi anlatılırken, Burj Khalifa çölde nasıl ayakta kalıyor? <https://www.yurtgazetesi.com.tr/dunya/depreme-zeminin-onemi-anlatilirken-burj-khalifa-colde-nasil-ayakta-kaliyor-h220316.html> (Erişim Tarihi: 24.11.2023).
- [58] Kaymak K.M. 2009. Rüzgâr Enerjisi. <https://web.itu.edu.tr/~kaymak/images/windpower.html> (Erişim Tarihi: 24.11.2023).
- [59] SMD. 2023. Cephe ve Gökdelen Dekorasyonlarında Rüzgârın Etkisi Uygun Bir Seçimdir. <https://smddecoration.com/> (Erişim Tarihi: 24.11.2023).
- [60] Akbal Ö. 2018. Hafif Bir Uçağın CFD Yöntemi ile Aeroelastik Analizi. Bitirme Çalışması. İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul. 7-9. (Erişim Tarihi: 25.08.2024).

When Escitalopram is Surrounded by Ethanol: A DFT and QTAIM Approach to Analyze The Drug and The Alcohol Interactions and It's Possible Outcomes

Özge BAĞLAYAN^{1*}, Mustafa Kemal KARAMAN², Cemal PARLAK³, Özgür ALVER⁴

^{1,2,4}Eskişehir Technical University, Science Faculty, Department of Physics, 26470, Eskişehir, Türkiye

³Department of Physics, Ege University, Science Faculty, İzmir, 35100, Türkiye

(Alınış / Received: 21.04.2024, Kabul / Accepted: 02.09.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Keywords

Escitalopram,
Drug-Alcohol Interaction,
DFT,
QTAIM

Abstract: In the scope of this work the antidepressant escitalopram was surrounded by ethanol commonly referred as alcohol step by step and the possible results of this invasion on escitalopram drug molecule were examined principally by density functional theory methods. Moreover, for analyzing hydrogen bonding interactions, quantum theory of atoms in molecules was used. In this method, the nature of interaction is classified whether it is covalent, partially covalent or noncovalent. According to the results, depending on the interaction edges of the title molecules, it was observed that the escitalopram under attack by ethanol shows quite different interaction characteristics, chemical and electronic properties effecting its chemical reactivity and biological activity which must be taken into account when used together with alcohol.

Essitalopram Etanol ile Çevrelendiğinde: İlaç ve Alkolün Etkileşimlerini ve Olası Sonuçlarını Analiz Etmek için QTAIM ve DFT Yaklaşımı

Anahtar Kelimeler

Essitalopram,
İlaç-Alkol Etkileşimi,
DFT,
QTAIM

Öz: Bu çalışma kapsamında antidepresan essitalopram, yaygın olarak alkol olarak adlandırılan etanol ile adım adım çevrelendi ve bu çevrelemenin essitalopram ilaç molekülü üzerindeki olası sonuçları yoğunluk fonksiyonel teorisi ile incelendi. Ayrıca hidrojen bağı etkileşimlerini analiz etmek için moleküllerdeki atomların kuantum teorisi kullanılmıştır. Bu yöntemde, etkileşimin doğası kovalent, kısmi kovalent veya kovalent olmayan olarak sınıflandırılır. Elde edilen sonuçlara göre etanol ile çevrelenen essitalopramın, alkolle birlikte kullanıldığında dikkate alınması gereken oldukça farklı kimyasal özellikler gösterdiği gözlemlendi.

1. Introduction

The simultaneous use of ethanol (EtOH), also known as alcohol, and medications has been continuously becoming a serious public health concern all over the world [1, 2]. The underlying interaction mechanism between medicines and alcohol is not fully enlightened. However, it is known that pharmacokinetic and pharmacodynamic interactions play an important role [3]. Patients with high rate of alcohol consumptions are considered at high risk of pharmacological interactions since the use of several medications make the pharmacokinetic and pharmacodynamic interferences of ethanol are possible [4]. However, the available data on this subject is rare.

Major depressive disorder is a prevalent mental illness affecting the ever-increasing number of people all around the world [5]. Depression appears as a complex heterogeneous disorder and its pathogenesis includes many factors ranging from genetic to social factors, most of which are not clearly understood [6]. Escitalopram (ESCI) is a selective serotonin reuptake inhibitor and it has been used for the treatment of several disorders such as depression, general anxiety and panic disorder [7, 8]. ESCI is known as a very effective and generally well tolerated drug for the treatment of generalized anxiety problems [9].

Quantum chemical calculations are extensively employed for the examination of the ground state properties of different types of molecular systems in order to understand the chemical process and

*Corresponding author: obaglayan@eskisehir.edu.tr

reactivity of the examined compounds [10-12]. Within the computational applications, density functional theory (DFT) appears as a widely used method offering acceptable accuracy and reliability [13, 14]. It is clear that experimental approaches for biological applications require extensive amount of time on financial resources. At this point computational point of views are very useful to obtain beforehand information to follow more object-oriented pathways for the experimental works. In order to analyze the hydrogen bonding (HB) interactions, quantum theory of atoms in molecules put forward by Bader was used [15]. In QTAIM method by examining the Laplacian of electron density $\nabla^2\rho$ and electronic energy density H , the nature of interaction is classified whether it is covalent, partially covalent or noncovalent [16].

2. Computational Method

First of all, single isolated ESCI and EtOH were optimized. Then NBO charge distributions for ESCI was calculated in order to determine the possible interaction points with EtOH. Four possible interaction sites for ESCI molecule were determined based on NBO charge distributions as seen in Figure 1. Therefore, the sites where partially negative N, O and F atoms are present were selected as active interaction edges. Then for one interaction site one EtOH molecule was brought the nearby interaction point of ESCI and the system was optimized to find the minimum energy configuration. This process was carried out for four interaction sites of ESCI molecule. After this, each time one more EtOH was added to ESCI and the optimization process was carried out for each system which requires many calculations to reach a fully surrounded ESCI by EtOH with stable form of cluster. It is worth noting that for EtOH two possible point groups C_1 and C_s are the case. However, the structure belonging to C_s point group was found lower in energy in magnitude. Henceforth, for all calculations and interactions C_s point group was considered for EtOH. The energies of each hydrogen bond (E_{HB}) were calculated using Espinosa-Molins-Lecomte equation as following [17,18]:

$$E_{HB} = 0.5 V(rBCP)$$

In the given equation, $V(rBCP)$ is the value of local potential energy density (Virial field) at the bond critical points.

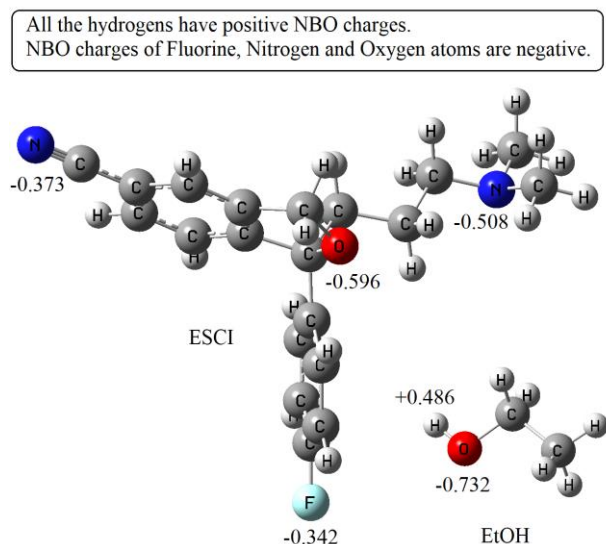


Figure 1. Some important NBO charges and interaction edges of the optimized ESCI and EtOH molecules.

The binding energies (E_b) between EtOH and ESCI drug were calculated by using the following equations:

(1xEtOH):

$$E_b = E_{ESCI&1xEtOH} - (E_{ESCI} + E_{EtOH(site-I,site-II,site-III \text{ or } site-IV)} + E_{EtOH})$$

(2xEtOH) for site - I:

$$E_b = E_{ESCI&2xEtOH} - (E_{ESCI&EtOH(site-II)} + E_{EtOH})$$

(2xEtOH) for site - II:

$$E_b = E_{ESCI&2xEtOH} - (E_{ESCI&EtOH(site-I)} + E_{EtOH})$$

(3xEtOH) for site - I:

$$E_b = E_{ESCI&3xEtOH} - (E_{ESCI&EtOH(site-II&site-III)} + E_{EtOH})$$

(3xEtOH) for site - II:

$$E_b = E_{ESCI&3xEtOH} - (E_{ESCI&EtOH(site-I&site-III)} + E_{EtOH})$$

(3xEtOH) for site - III:

$$E_b = E_{ESCI&3xEtOH} - (E_{ESCI&EtOH(site-I&site-II)} + E_{EtOH})$$

(4xEtOH) for site - I:

$$E_b = E_{ESCI&4xEtOH} - (E_{ESCI&EtOH(site-II&site-III&site-IV)} + E_{EtOH})$$

(4xEtOH) for site - II:

$$E_b = E_{ESCI&4xEtOH} - (E_{ESCI&EtOH(site-I&site-III&site-IV)} + E_{EtOH})$$

(4xEtOH) for site - III:

$$E_b = E_{ESCI&4xEtOH} - (E_{ESCI&EtOH(site-I&site-II&site-IV)} + E_{EtOH})$$

(4xEtOH) for site - IV:

$$E_b = E_{ESCI&4xEtOH} - (E_{ESCI&EtOH(site-I&site-II&site-III)} + E_{EtOH})$$

where all the statements like $E_{ESCI&1xEtOH}$, $E_{ESCI&2xEtOH}$, $E_{ESCI&3xEtOH}$, $E_{ESCI&4xEtOH}$ present the optimized energies of the related systems. The determination of functionals and the basis sets effects the required computational sources. It is clear that higher level of functionals and basis sets mean long calculation times and robust computational resources which are not available for most of the researchers. In our previous study, we reported that compared with several solvation models, functionals and the basis sets, the B3LYP/6-31G(d) level of theory with the polarizable continuum model enables to get acceptable outcomes compared to higher level of time-consuming

computations [19]. Since water is the most plentiful molecule in biological systems, all calculations were carried out with B3LYP functional along with the 6-31G(d) basis set in water media. During the calculations the interacting atoms within a molecular system approach each other, henceforth, their basis functions overlay. This effect is named as basis set superposition error (BSSE). In order to eliminate or to reduce the BSSE effect, the counterpoise correction method was used [20]. Calculations were carried out with Gaussian 09 program package [21]. GaussView was used for the creation of molecular structures and visualization of molecular orbitals [22]. QTAIM computations were performed using the Multiwfn program [23].

3. Results

3.1. ESCI vs 1xEtOH, site-I to site-IV interactions

In this part of the work four interaction sites were identified and one EtOH molecule interacted with identified sites named as Site-I, Site-II, Site-III and Site-IV. The optimized structures were given in Fig. 2. For the structures S1, S2, S3 and S4, the O—H...N≡C, O—H...N, O—H...O and O—H...F interatomic distances were calculated as 1.990, 1.864, 1.901 and 2.019 Å, respectively which indicates the requirements for structurally stable interaction distances depending on the atomic radii and partial charges at the interaction edges. The OH stretching/bending vibrations of single isolated EtOH molecule were calculated as 3745/1479 cm^{-1} . As for the interacted structures S1, S2, S3 and S4 OH stretching/bending vibrations were computed as 3645/1492, 3284/1530, 3610/1491 and 3737/1481 cm^{-1} , correspondingly. It is clear that OH stretching vibrations were red shifted in the IR spectra. On the other hand, OH bending vibrations showed blue shifts in the IR spectra. While the largest red shift in the IR spectrum was observed for S2 structure with a value of 461 cm^{-1} , the smallest red shift was found for S4 system with a value of 8 cm^{-1} . This fact suggests that with an IR instrument having a typical resolution of 2 cm^{-1} , both shifts are observable and distinguishable. In the same way, while the largest blue shift in the IR spectrum was found for S2 structure with a value of 51 cm^{-1} , the smallest blue shift was observed for S4 system with a value of 2 cm^{-1} . It is worth noting that the largest and smallest shifts of OH vibrational and bending bands occur where the interatomic distances at the interaction sites are the smallest and the largest, correspondingly.

The BSSE uncorrected/corrected E_b energies were calculated as -4.17/-2.94 (Site-I), -8.48/-5.07 (Site-II), -6.19/-2.34 (Site-III) and -4.14/-0.51 kcal/mol (Site-IV). It is seen that while the strongest interaction occurs at Site-II, the weakest interaction occurs at Site-IV. It is seen that upon BSSE correction E_b values tend

to change by 29% (Site-I), 40% (Site-II), 62% (Site-III) and 88% (Site-IV). The corrections appear at quite high particularly where the E_b energy is smallest in magnitude, therefore, for the possible studies carried out at B3LYP/6-31G(d) level of theory this correction is suggested to be considered.

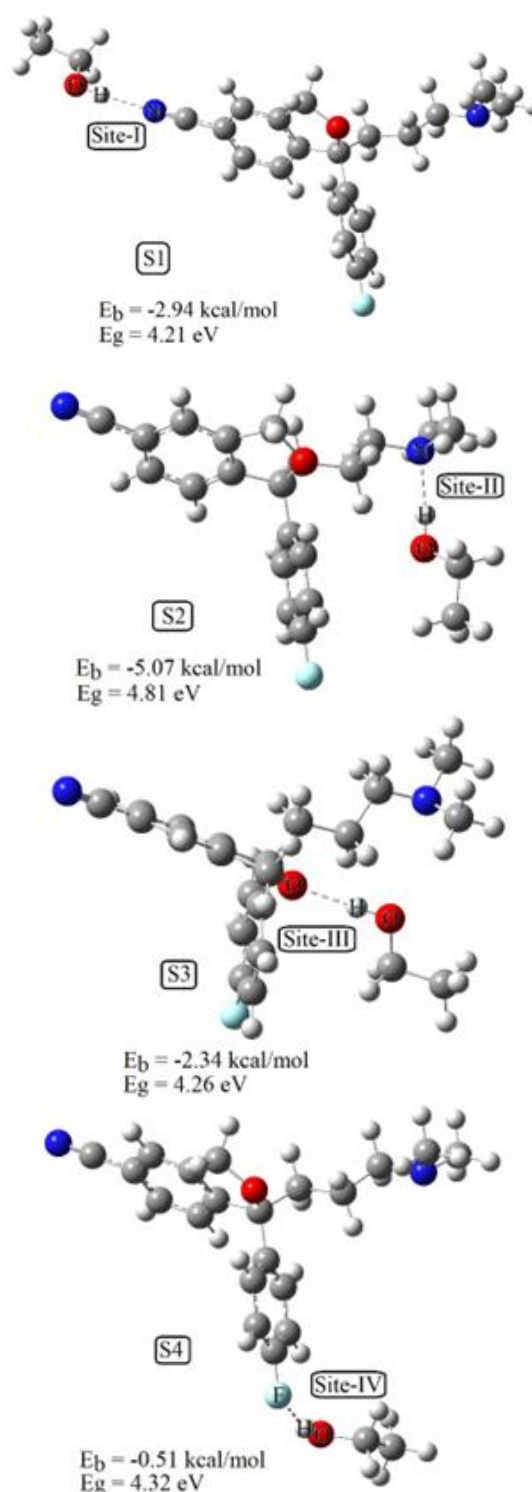


Figure 2. Optimized structures of the single EtOH interacted systems.

The HOMO-LUMO, E_g value of single isolated ESCI was calculated as 4.33 eV. The E_g value is considered as a measure of reactivity for a given molecular system [24]. Therefore, it can be concluded that as for Site-I, Site-III and Site-IV interactions reactivities of the interacted systems increase more or less but as for Site-II interacted system reactivity decreases compared to single isolated ESCI drug molecule (Fig. 2). It is seen that each interaction site tends to produce different reactivity conditions. At this point, it is worth noting that the comparison of the reactivity was carried out between single ESCI and ESCI interacted EtOH system rather than isolated single molecules.

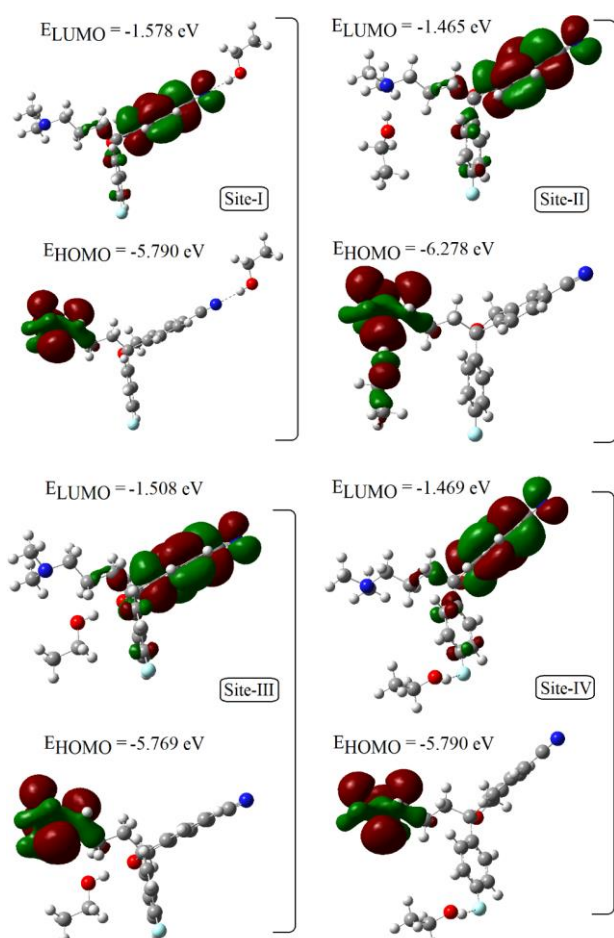


Figure 3. Frontier molecular orbital maps for 1xEtOH interacted systems.

The HOMO-LUMO maps for any molecular system can be considered as a tool to identify the regions where the probability of electron donation and acceptance are high [25]. Frontier molecular orbitals are given in Fig. 3. For Site-I-IV interactions LUMOs are distributed over ESCI drug molecule. No matter which site the interaction occurs, LUMOs are only located over ESCI. Therefore, it can be drawn that the probability of ESCI fragments of the interacting systems behaving as electron acceptors are higher when compared to EtOH. In addition to that, electron affinity (EA) is

known as $-E_{LUMO}$ [26] which means that EA values of the interacted systems mainly determined by the ESCI drug molecule. HOMOs like LUMOs are distributed mainly over ESCI only one exception which is Site-II interaction. For Site-II interaction HOMOs are located on EtOH and ESCI molecules at the same time. At this point, it is worth noting that HOMO-LUMO distributions indicate regions where electron transitions are most likely to occur. Therefore, EtOH can also donate electrons for Site-II type of interaction in addition to ESCI. Since ionization potential (IP) is known as $-E_{HOMO}$ [26], it is seen that IP and EA values show dependence at the interaction sites and as can be seen in Fig. 2 and Fig. 3. While S2 structure has the highest IP, S3 has the lowest IP. Further, while the S1 shows the highest EA, S2 has the lowest EA.

3.2. ESCI vs 2xEtOH, the multiple site-I and site-II interactions

In this part of the study, a situation in which Site-I and Site-II parts of ESCI interact with EtOH compounds simultaneously was examined. The optimized structure was shown in Fig. 4. The calculated O—H...N≡C and O—H...N interatomic distances were calculated as 1.990 and 1.869 Å, respectively. The OH stretching vibrations were computed as 3646 (Site-I) and 3290 cm^{-1} (Site-II) for the examined system. OH bending vibrations do not change compared to single EtOH interacted ESCI and they appeared at 1492 (Site-I) and 1530 cm^{-1} (Site-II). The BSSE uncorrected/corrected E_b energies were found as -4.22/-2.99 (Site-I) and -8.54/-5.02 kcal/mol (Site-II). It is seen that the strongest interaction occurs at still Site-II. Compared to single EtOH interacted systems, 2xEtOH interaction leads an increase for E_b energies in magnitude. EtOH molecules more strongly interacted for 2xEtOH system. Therefore, stability of system seems sensitive to the number of interacted EtOH molecules. E_g value of 2xEtOH interacted system was calculated as 4.70 eV. It is seen that reactivity of 2xEtOH interacted system is less than ESCI alone.

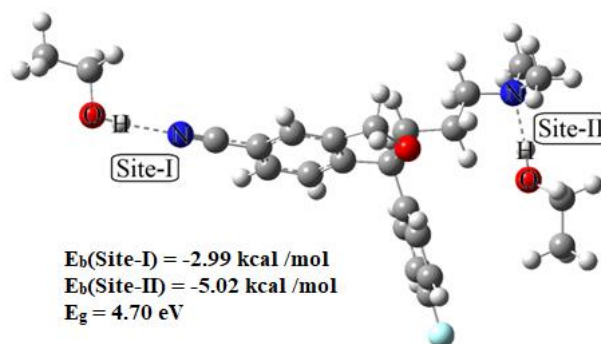


Figure 4. Optimized structures of the 2xEtOH interacted system.

Frontier molecular orbitals for 2xEtOH interacted system are given in Fig. 5. It is seen that LUMOs are

distributed over ESCI and HOMOs are distributed both ESCI and EtOH molecules. Therefore, for 2xEtOH interacted system while only ESCI shows a high probability as an electron acceptor, both ESCI and (Site-II) EtOH possess potentials as electron donors. The EA value of the 2xEtOH interacted system was found as 1.580 eV (Fig. 5) which is higher than the values obtained for the single EtOH interacted systems.

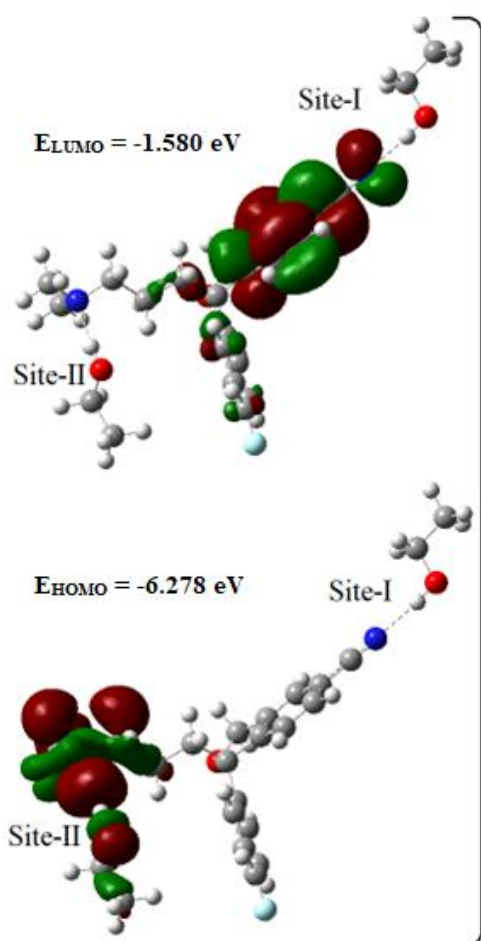


Figure 5. Frontier molecular orbital maps for 2xEtOH interacted ESCI system.

3.3. ESCI vs 3xEtOH, the multiple site-I, site-II and site-III Interactions

In this part of the work one EtOH molecule interacted with the Site-I, Site-II and Site-III simultaneously. The optimized structure was presented in Fig. 6. The calculated O—H...N≡C, O—H...N and O—H...O interatomic distances were calculated as 1.991, 1.869 and 1.901 Å, respectively. The OH stretching vibrations were computed as 3647 (Site-I), 3287 (Site-II) and 3611 cm⁻¹ (Site-III) for the investigated system. OH bending vibrations appeared at 1492 (Site-I), 1530 (Site-II) and 1489 cm⁻¹ (Site-III). The BSSE uncorrected/corrected E_b energies were calculated as -4.16/-2.95 (Site-I), -8.56/-4.98 (Site-II) and -6.24/

-2.31 kcal/mol (Site-III). In this configuration additional EtOH at the Site-III, compared to 2xEtOH system leads changes for E_b energies. The interaction strength at Site-I and Site-II decreases in magnitude slightly. E_g value of 3xEtOH interacted system was computed as 4.63 eV. It is seen that reactivity of 3xEtOH interacted system is still less than ESCI alone.

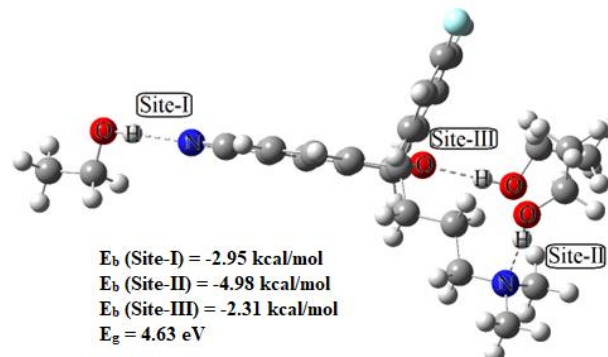


Figure 6. Optimized structures of the 3xEtOH interacted system.

Frontier molecular orbitals for 3xEtOH interacted system are given in Fig. 7. It is seen that LUMOs are distributed only over ESCI and HOMOs are distributed both ESCI and (Site-II) EtOH molecules. In here, unlike Site-II EtOH, Site-I and Site-III interacted EtOH molecules do not tend to accept or donate electrons. The EA value of the 3xEtOH interacted system was found as 1.626 eV (Fig. 7) which is higher than the values obtained for 1xEtOH and 2xEtOH interacted systems.

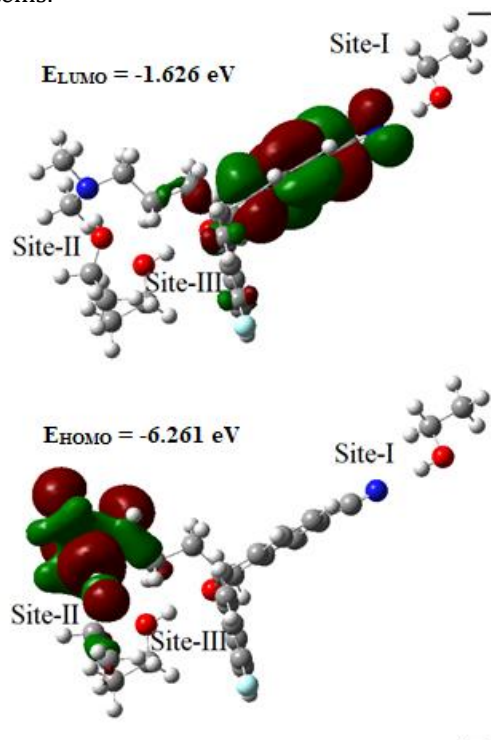


Figure 7. Frontier molecular orbital maps for 3xEtOH interacted ESCI system.

3.4. ESCI vs 4xEtOH, the multiple site-I, site-II, site-III and site-IV Interactions

In here one EtOH molecule interacted with the Site-I, Site-II, Site-III and Site-IV simultaneously. The optimized structure was given in Fig. 8. The calculated O—H...N≡C, O—H...N, O—H...O and O—H...F interatomic distances were found as 1.992, 1.868, 1.906 and 2.024 Å, respectively. The OH stretching vibrations were determined as 3647 (Site-I), 3286 (Site-II), 3610 (Site-III) and 3741 cm⁻¹ (Site-IV) for the investigated system. At this point it is seen that infrared vibrational bands at the interaction sites show changes around 2-4 cm⁻¹, when compared to single EtOH interactions with ESCI drug molecule which means that nearly similar diagnostic IR bands observed for 1xEtOH interacted ESCI and 4xEtOH interacted ESCI systems. OH bending vibrations appeared at 1492 (Site-I), 1530 (Site-II), 1490 (Site-III) and 1482 cm⁻¹ (Site-IV). It appears that OH bending vibrations are less effected compared to OH stretching vibrations upon interaction with ESCI drug molecule. The BSSE uncorrected/corrected E_b energies were calculated as -4.16/-2.95 (Site-I), -8.58/-4.91 (Site-II), -6.15/-2.21 (Site-III) and -4.10/-0.41 kcal/mol (Site-IV). E_g value of 4xEtOH interacted system was computed as 4.63 eV which is the same value with 3xEtOH interacted system and reactivity of 4xEtOH interacted system is still stays below than ESCI alone.

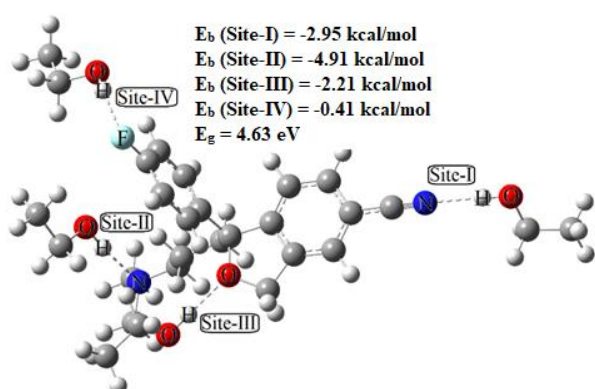


Figure 8. Optimized structures of the 4xEtOH interacted system.

In Fig. 9, IR spectra of selected regions of ESCI and ESCI interacted 4xEtOH molecule were given. It is clear that following the EtOH interaction with ESCI drug relative intensity of C≡N stretching vibration considerably decreases due to redistribution of charges at the interaction sites or changes of the polarity of C≡N bond. The OH stretching vibrations can also be followed in Fig. 9.

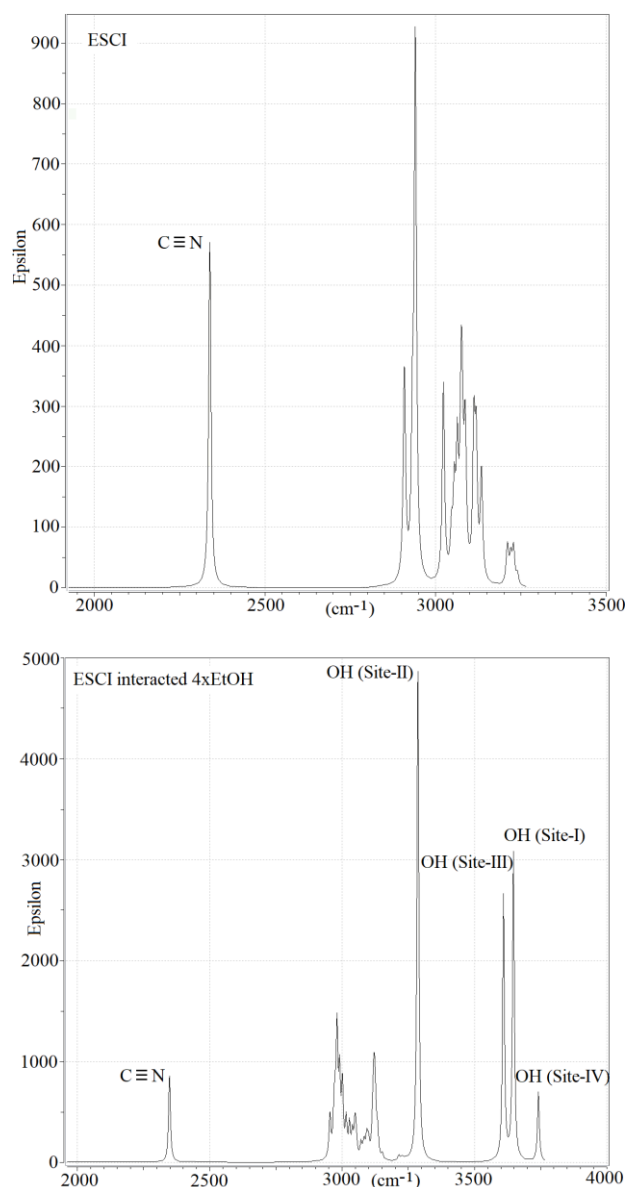


Figure 9. Selected region of calculated IR spectra of ESCI and ESCI interacted 4xEtOH

NBO charge distributions at the interaction sites were also calculated as given in Fig. 10. The NBO charges of oxygen and hydrogen atoms at the interaction site of single isolated EtOH were calculated as -0.732 and +0.486. It was observed that following the interaction with ESCI molecule some number of electrons move towards the oxygen atom of EtOH and as for site-II this flow is more apparent when compared to other sites of interaction resulting with more intense OH stretching band for site-II interaction (Fig. 9). It was seen that the strength of E_b interaction energy is correlated not only the partial NBO charges but also the distance between the interacting atoms.

Frontier molecular orbitals for 4xEtOH interacted system are given in Fig. 11. It is seen that LUMOs are distributed only over ESCI and HOMOs are distributed both ESCI and (Site-II and Site-III) partially EtOH

molecules. It is seen that particularly HOMO distributions of the interacted system having a close relation with electronic properties tend to change depending on the number of interacted EtOH molecule so the electronic properties. As the number of interacted EtOH molecule increases the distributions of electrons over the surface of ESCI molecule show alterations which refers that depending on the interaction site and the number of interacted EtOH molecules, the chemical properties of the examined system can be manipulated. The EA value of the 2xEtOH interacted system was found as 1.630 eV (Fig. 11) which is higher than the values obtained for the 1xEtOH, 2xEtOH and 3xEtOH interacted systems. In general, it was observed that as the number of interacted EtOH increases the EA values also increased. A summary of energetic parameters for comparison can be seen in Table 1.

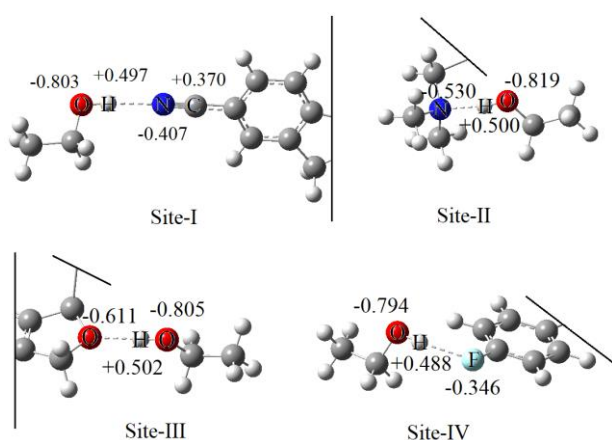


Figure 10. NBO charges at interaction sites

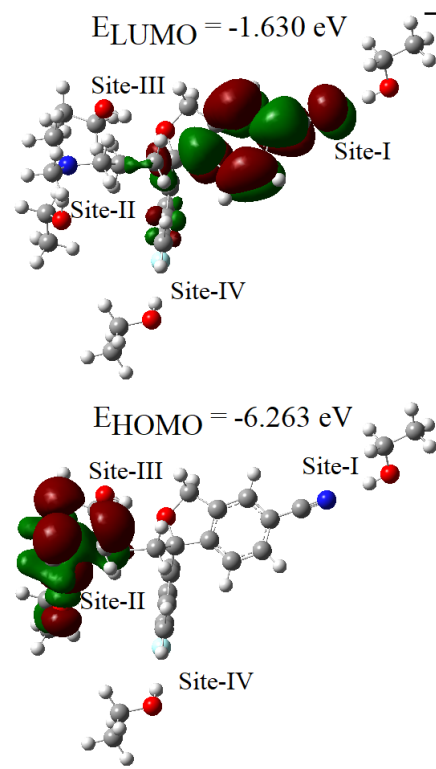


Figure 11. Frontier molecular orbital maps for 4xEtOH interacted ESCI system.

Table 1. A summary of energetic parameters for comparison

Examined systems	E_b (kcal/mol)	E_{HOMO}	E_{LUMO}	E_g
		(eV)		
1xEtOH (Site-I)	-2.94	-5.790	-1.578	4.21
1xEtOH (Site-II)	-5.07	-6.278	-1.465	4.81
1xEtOH (Site-III)	-2.34	-5.769	-1.508	4.26
1xEtOH (Site-IV)	-0.51	-5.790	-1.469	4.32
2xEtOH (Site-I)	-2.99	-6.278	-1.580	4.70
2xEtOH (Site-II)	-5.02			
3xEtOH (Site-I)	-2.95	-6.261	-1.626	4.63
3xEtOH (Site-II)	-4.98			
3xEtOH (Site-III)	-2.31			
4xEtOH (Site-I)	-2.95	-6.263	-1.630	4.63
4xEtOH (Site-II)	-4.91			
4xEtOH (Site-III)	-2.21			
4xEtOH (Site-IV)	-0.41			
ESCI	-	-5.788	-1.461	4.33

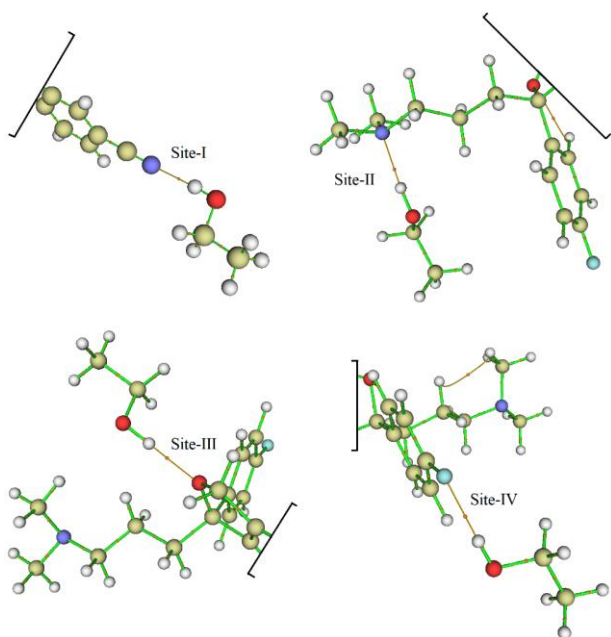


Figure 12. Molecular topographic maps at the interaction sites (the electron density at bond critical points is depicted as orange spheres).

At this point it seems useful to discuss the QAIM parameters to enlighten the nature of interaction (Table 2 and Fig. 12). For Site-I interaction, electron density ρ , Laplacian electron density $\nabla^2\rho$, and electronic energy density H in atomic units were calculated as 0.025, 0.080 and 0.240 ($\times 10^{-3}$) which refers an E_{HB} energy of -6.09 kcal/mol. Further, both positive $\nabla^2\rho$ and H values refer that the interaction is noncovalent in nature. As for Site-II interaction, ρ , $\nabla^2\rho$, and H values were calculated as 0.040, 0.096 and -3.47 ($\times 10^{-3}$) with an E_{HB} energy of -9.73 kcal/mol. Positive $\nabla^2\rho$ and negative H values imply that the interaction is partially covalent in nature. For Site-III interaction, ρ , $\nabla^2\rho$, and H values were found as 0.029, 0.088 and -1.23 ($\times 10^{-3}$) with an E_{HB} energy of -7.68 kcal/mol. Again, here like Site-II interaction positive $\nabla^2\rho$ and negative H values indicate that the interaction is partially covalent in nature for Site-III interacted system. Finally, as for Site-IV interaction ρ , $\nabla^2\rho$, and H values were found as 0.019, 0.068 and -0.74 ($\times 10^{-3}$) with an E_{HB} energy of -5.76 kcal/mol referring a partially covalent interaction.

Table 2. Some important QAIM parameters of 4xEtOH interacted ESCI system.

4xEtOH	$\rho(r)$ (a.u.)	$\nabla^2\rho(r)$ (a.u.)	$H(r)\times 10^{-3}$ (a.u.)	E_{HB} (kcal/mol)
Site-I	0.025	0.080	0.240	-6.09
Site-II	0.040	0.096	-3.47	-9.73
Site-III	0.029	0.088	-1.23	-7.68
Site-IV	0.019	0.068	-0.74	-5.76

4. Discussion and Conclusion

In the framework of this study, an extensive DFT investigation of ESCI interacted EtOH were carried out based on mainly DFT and QAIM approaches. Structural stabilities of the examined systems were evaluated particularly regarding the binding energies of the interacted systems. Further, electronic properties and some important diagnostic vibrational bands were discussed. In summary following results can be summed up:

I. Electron acceptance or donation properties referred also as HOMO-LUMOs of ESCI drug molecule show dependence in which site the interaction with EtOH occurs. Likewise, it was observed that the interaction energy or the strength of the interaction between ESCI and EtOH changes depend on the interaction site of ESCI molecule.

II. It was found that as the number of interacted EtOH increases, electron affinity of the system increases. Therefore, the number of available interaction site of ESCI plays an important role for determining chemical properties of the examined systems.

III. It was seen that E_g or reactivity characteristics of ESCI drug strongly depends on the interaction site and the number of interacted EtOH molecule which indicates that the chemistry or biological activity of ESCI is affected by the presence of EtOH.

IV. QAIM results indicate that partially covalent and noncovalent interactions are possible between EtOH and ESCI drug molecule.

Acknowledgment

Authors acknowledge FenCluster System of Ege University for the calculations. This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) BİDEB 2209-A Grant No 1919B012302888 and Eskişehir Technical University Scientific Research Projects Commission under grant no 24LÖP001.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Peacock A., Leung J., Larney S. 2018. Global Statistics on Alcohol, Tobacco and Illicit Drug Use: 2017 Status Report. *Addiction*, 113, 1905-1926.
- [2] Kaufman, E., 1976. The Abuse of Multiple Drugs. I. Definition, Classification, and Extend of Problem. *The American Journal of Drug and Alcohol Abuse*, 3, 279-292.
- [3] Singh, A. 2021. Interaction of Alcohol with Drugs of Abuse and Medicines. *Neurobiology of Alcohol and Brain*. Academic Press, 75-140.
- [4] Guerzoni, S., Pellesi, L., Pini, L.A., Captuo, F. 2018. Drug-drug interactions in the treatment for alcohol use disorders: A comprehensive review. *Pharmacological Research*, 133, 65-76.
- [5] Zheng, P., Wang, Y., Chen, L., Yang, D., Meng, H., Zhou, D., Zhong, J., Lei, Y., Melgiri N.D., Xie, P. 2013. Identification and Validation of Urinary Metabolite Biomarkers for Major Depressive Disorder. *Molecular & Cellular Proteomics*, 12 (1), 207-214.
- [6] Chirit, A.L., Gheorman, V., Bondari, D., Rogoveanu, I. 2015. Current Understanding of The Neurobiology of Major Mepressive Disorder. *Romanian Journal of Morphology and Embryology*, 56(2 Suppl), 651-658.
- [7] Owens, M.J., Knight, D.L., Nemeroff, C.B. 2001. Second-generation SSRIs: human monoamine transporter binding profile of escitalopram and R-fluoxetine. *Biological Psychiatry*, 50, 345-350.
- [8] Jonathan, R.T., Davidson, M.D., Bose A., Korotzer, A., Zheng, H. 2004. Escitalopram in the treatment of generalized anxiety disorder: double-blind, placebo controlled, flexible-dose study. *Depression and Anxiety*, 19, 234-240.
- [9] Dhillon, S., Scott, L.J., Plosker, G.L. 2006. Escitalopram A Review of its Use in the Management of Anxiety Disorders. *CNS Drugs*, 20, 763-790.
- [10] Omurtag Özgen P.S., Durmaz H., Parlak C., Alver Ö., Bağlayan Ö. 2020. Non-covalent functionalization of single walled carbon nanotubes with pyrene pendant polyester: A DFT supported study. *Journal of Molecular Structure*, 1209, 127943.
- [11] Parlak, C., Tepe, M., Bağlayan, Ö., Alver, Ö. 2020 Investigation of detection and adsorption properties of β -propiolactone with silicon and aluminum doped fullerene C₆₀ using density functional theory. *Journal of Molecular Structure*, 1217, 128346.
- [12] Parlak, C., Alver, Ö., Bağlayan, Ö. 2021. Quantum mechanical simulation of Molnupiravir drug interaction with Si-doped C₆₀ fullerene. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1202, 113336.
- [13] Afzal, Q.Q., Rafique, J., Jaffar, K., Perveen, M., Iqbal, J., Al-Buriahi, M.S., Alomairy, S., Alrowaili, Z.A., Somaily, H.H. 2022. DFT study of 2D graphitic carbon nitride based preferential targeted delivery of levosimendan, a cardiovascular drug. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1209, 113584.
- [14] Ramana, P. V., Sundius, T., Muthu, S., Mouli, K. C., Krishna, Y. R., Prasad, K. V., Devi, R. N., Irfan, A., Santhamma, C., 2022. Spectroscopic, quantum mechanical, electronic excitation properties (Ethanol solvent), DFT investigations and molecular docking analysis of an anti-cancer drug Bendamustine. *Journal of Molecular Structure*, 1253, 132211.
- [15] R.F.W. Bader. 1990. *Atoms in Molecules: A Quantum Theory*, Clarendon, New York.
- [16] Rozas, I., Alkorta, I., Elguero, J. 2000. Behavior of ylides containing N, O, and C atoms as hydrogen bond acceptors. *Journal of the American Chemical Society*, 122, 11154-11161.
- [17] Espinosa, E., Molins, E., Lecomte, C. 1998. Hydrogen bond strengths revealed by topological analyses of experimentally observed electron densities. *Chemical Physics Letters*, 285, 170-173.
- [18] Mata, I., Alkorta, I., Espinosa, E., Molins, E. 2011. Relationships between interaction energy, intermolecular distance and electron density properties in hydrogen bonded complexes under external electric fields. *Chemical Physics Letters*, 507, 185-189.
- [19] Parlak, C., Alver, Ö., Bağlayan, Ö., Ramasami, P. 2022. Theoretical insights of the drug-drug interaction between favipiravir and ibuprofen: a DFT, QAIM and drug-likeness investigation. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 41, 10, 4313-4320.
- [20] Gutowski, M., Chalasinski, G. 1993. Critical evaluation of some computational approaches

to the problem of basis set superposition error,
The Journal of Chemical Physics, 98, 5540–5554.

- [21] Frisch, M. J., Trucks, G. W., Schlegel, H. B. et al. 2016. Gaussian 16, Revision C.01, Gaussian Inc., Wallingford, CT.
- [22] Dennington, R.D., Keith, T.A., Millam, J.M., 2016. GaussView 6.0.16, Gaussian Inc.
- [23] Lu, T., Chen, F. 2012. Multiwfn: A multifunctional wavefunction analyser, Journal of Computational Chemistry, 33, 580–592.
- [24] Suliman, F. O., Al-Nafai, I., Al-Busafi, S. N. 2014. Synthesis, characterization and DFT calculation of 4-fluorophenyl substituted tris(8-hydroxyquinoline)aluminum(III) complexes. Spectrochimica acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 118, 66–72.
- [25] Frenking, G., Shaik, S. 2014. The chemical bond. Wiley-VCH, Weinheim, Germany.
- [26] Antony Danish, I., Jebasingh Kores, J., Sasitha, T., Winfred Jebaraj, J. 2021. DFT, NBO, HOMO-LUMO, NCI, stability, Fukui function and hole – Electron analyses of tolcapone. Computational and Theoretical Chemistry, 1202, 113296.

Türkiye'nin Üç Pilot İlinde Çığ Tehlike ve Risk Analizleri: Bitlis, Van ve Antalya Örnekleri

Engin YILDIZ¹, Zeliha SELEK²

^{1,2} Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

(Alınış / Received: 26.05.2024, Kabul / Accepted: 23.09.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Çığ,
Çığ Tehlike Haritası,
Çığ Risk Değerlendirmesi,
Doğa Kaynaklı Afet,
Çığ Afet Yönetimi,
Çığ Yönetimi

Öz: Çığ, orman örtüsünün olmadığı veya seyrek olduğu dağların eğimli yamaçlarında birikmiş kar tabakasının çeşitli nedenlerle bulunduğu konumdan yerçekimi etkisiyle harekete geçmesi olarak tanımlanmakta ve tahmin edilemeyen büyük can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Türkiye'nin topografik ve iklimsel özellikleri bakımından Bitlis, Van ve Antalya illerinde, yerleşim yerleri, karayolları, kayak merkezleri ve dağlık alanlarda planlanan tesisler için çığ ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu çalışmada, 3 pilot ilde arazi incelemeleri yapılmış ve çığ riski bulunan bölgeler hakkında yerel halktan bilgiler edinilmiştir. Daha sonra bu pilot bölgeler için çığ başlama bölgeleri, RAMMS (Hızlı Kütle Hareketi Simülasyonu) yazılımı ile 2 boyutlu çığ simülasyonları, çığ tehlike haritaları, risk analizleri ve çığ riskinin azaltılmasına yönelik önceliklendirmeler yapılmıştır. Önceliklendirmelere göre belirlenen riskli bölgelerde operasyonel ve yapısal çığ risk azaltma yöntemleri önerilmiştir. Bu çalışma, mevcut ve ileri dönemli yerleşim, karayolu, turizm tesisleri vb. yapıların planlamalarında çığ tehlike haritalarının kullanımının önemini vurgulamakta, kalitatif ve kantitatif risk analizleri gerçekleştirerek çığ afetinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Avalanche Hazard and Risk Analysis in Three Pilot Provinces of Türkiye: Case Studies from Bitlis, Van, and Antalya

Keywords

Avalanche,
Avalanche Hazard Map,
Avalanche Risk Assessment,
Natural Disaster,
Avalanche Disaster
Management,
Avalanche Management

Abstract: Avalanche is defined as the movement of the snow layer accumulated on the sloping slopes of mountains where there is no or sparse forest cover due to the effect of gravity from its position for various reasons and causes unpredictable great loss of life and property. Avalanches pose a serious threat to settlements, highways, ski resorts and facilities planned in mountainous areas in Bitlis, Van and Antalya provinces in terms of topographic and climatic characteristics of Turkey. In this study, field investigations were carried out in 3 pilot provinces and information was obtained from local people about the avalanche risk areas. Then, for these pilot regions, avalanche initiation zones, 2D avalanche simulations with RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation) software, avalanche hazard maps, risk analyses and prioritisations for avalanche risk reduction were made. Operational and structural avalanche risk mitigation methods were proposed in the risky areas determined according to the prioritisations. This study emphasises the importance of using avalanche hazard maps in the planning of existing and future settlements, highways, tourism facilities, etc., and contributes to a better understanding of avalanche disaster by performing qualitative and quantitative risk analyses.

*İlgili yazar: engin.yildiz1@gazi.edu.tr

1. Giriş

Globalleşme ile ulaşımın artan önemi, kış sporlarının ve kış turizminin yükselişi nedeniyle doğa kaynaklı afetlerin, özellikle de kar çığlarının önemi her geçen

gün artmaktadır. Doğa kaynaklı bu afetler, can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır. Avrupa genelinde ise, yıllık ortalama çığ kaynaklı ölüm sayısı yaklaşık 100 olarak kayıtlara geçmiştir. Örneğin, 2023/2024 kış sezonunda Avrupa'da çığlar nedeniyle 56 kişi

yaşamını yitirken, İsviçre'de 1937'den 2024'e kadar olan süreçte bu sayının toplam 2131 olduğu bildirilmiştir [1].

Türkiye'nin yüzölçümünün %78'ini kaplayan dağlık bölgeler, nüfusun %46,9'unun bu alanlarda ikamet etmesi sebebiyle çığ riskini önemli bir araştırma konusu haline getirmektedir. Her ne kadar yerleşim yerlerinin dışında gerçekleşen çığ olayları kayıt altına alınmasa da AFAD'ın 2020 yılında yayınladığı rapora göre, Türkiye'de her yıl ortalama 25 kişi çığ nedeniyle hayatını kaybetmekte, mal kaybı ise tam olarak bilinmemektedir [2]. Ayrıca ülkemizin coğrafi yapısından dolayı Bingöl, Bitlis, Tunceli, Malatya ve Hakkâri illeri çığ olaylarının en yoğun yaşandığı yöreler olarak öne çıkmaktadır [3]. Bu illerden Bingöl'de, 1950-2020 yılları arasında 274 çığ afeti meydana gelmiş, bu afetler sonucunda 1036 konut zarar görmüştür [4]. Bitlis'te ise meteorolojik ve coğrafi koşullar nedeniyle kış aylarında yüksek çığ riskinden dolayı yerleşim alanları ve ulaşım güzergâhları ciddi şekilde etkilenmektedir [5]. Hakkâri'de ise çeşitli bölgelerde can ve mal kaybına neden olan toplam 52 çığ olayı kaydedilmiştir [6].

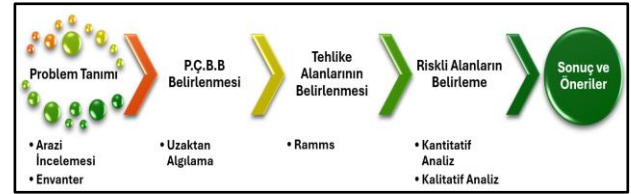
Çığ, orman örtüsünün olmadığı ya da seyrek olduğu dağların yüksek eğimli kısımlarında karın birikmesi ve çeşitli tetikleyiciler sonucu yerçekimi etkisi ile karın yamaç aşağı hareketi olarak tanımlanır. Bu doğa kaynaklı afet, insan hayatını tehdit etmenin yanı sıra ciddi maddi ve çevresel zararlara da yol açmaktadır [7]. Çığ olaylarının meydana gelmesi için, kar örtüsü, topografya ve meteorolojik koşullar gibi temel faktörler gerekmektedir. Kar örtüsünün duraysızlığı, kar tabakasındaki zayıf katmanlar, kar kristallerinin yapısı ve karın yoğunluğu gibi unsurlar tarafından etkilenir. Topografya faktörleri arasında eğim, yüzeyin pürüzlülüğü ve arazi yapısı yer alır. Özellikle eğim, çığların meydana gelme olasılığını büyük ölçüde artırır; 30-45 derece arasındaki eğimler çığ riski için kritik seviyelerdir. Yüzeyin pürüzlülüğü, karın birikme ve hareket etme şeklini etkiler. Meteorolojik koşullar ise kar yağışı miktarı ve hızı, sıcaklık değişimleri ve rüzgâr gibi etkenleri içerir. Aşırı kar yağışı, kısa sürede büyük miktarda kar birikmesine neden olarak kar tabakasında gerilim oluşturur ve çığ riskini artırır. Ayrıca, sıcaklık değişimleri karın erimesine veya katılaşmasına yol açarak kar tabakasının stabilitesini etkiler. Bununla birlikte, bu olayların gerçekleşmesine insan faaliyetleri, hayvanların hareketleri veya yoğun kar yağışı gibi çeşitli faktörler de etki etmektedir [8].

Çığ tehlikesinin azaltılmasının, özellikle dağlık alanlarda insan yaşamını, yerleşim yerlerini ve altyapıyı koruyacağı açıktır. Bu kapsamda çığ tehlikesini en aza indirmek ve insan hayatını korumak için alınması gereken önlemler aktif ve pasif olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Aktif önlemler çığların oluşumunu aktif olarak yönetmek ve kontrol etmek için kullanılırken, pasif önlemler ise çevreye müdahale etmeden çığ riskini azaltmayı amaçlar [9].

Bu çalışma da üç pilot alan (Bitlis, Van ve Antalya) seçilerek detaylı bir şekilde kantitatif ve kalitatif çığ risk analizi yapılmıştır. Her bir pilot alan farklı çığ problemlerini temsil etmektedir. Antalya ili Alanya ilçesi Akdağ mevkiinde planlanan kayak merkezi, kayak merkezlerindeki çığ riski ile dikkat çekerken; Van Bahçesaray Karayolu Karabet Geçidi Mevkii, karayolu çığ problemi ile öne çıkmakta; Bitlis ili Merkez ilçesi Gazi Bey Mahallesi ise, çığın yerleşim yerlerini tehdit etmesi problemi ile dikkat çekmektedir. Bu bölgelerde yapılan saha ve ofis çalışmaları çığ riskinin kapsamlı bir analizini sunmayı hedeflemiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma, ülkemizin üç farklı ilinde yer alan pilot alanlar (Bitlis, Van ve Antalya) (Şekil 2) üzerinden çığ risk değerlendirmesi bu bölgelerdeki çığ riskini anlamak, değerlendirmek ve gelecekteki olası zararları azaltma yönünde stratejiler geliştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Yapılan çalışmalar

2.1. Yapılan çalışmalar (Şekil 1)

2.1.1. Saha çalışmaları ve veri toplama

Seçilen pilot bölgelerde arazi incelemeleri yapıldıktan sonra, yerel halkla görüşmeler yapılarak geçmiş ve mevcut çığ durumu hakkında bilgiler toplanmıştır. Bu bilgiler, bölgenin çığ geçmişi ve potansiyel riskleri hakkında önemli veriler sağlamıştır.

2.1.2. Potansiyel çığ başlama bölgelerinin belirlenmesi

Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından sağlanan 5 x 5 m Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ve özel algoritmalar kullanılarak potansiyel çığ başlama bölgeleri belirlenmiş, belirlenen bu bölgelerde yerel halktan elde edilen bilgiler ile doğrulama yapılmıştır.

2.1.3. Meteorolojik durum

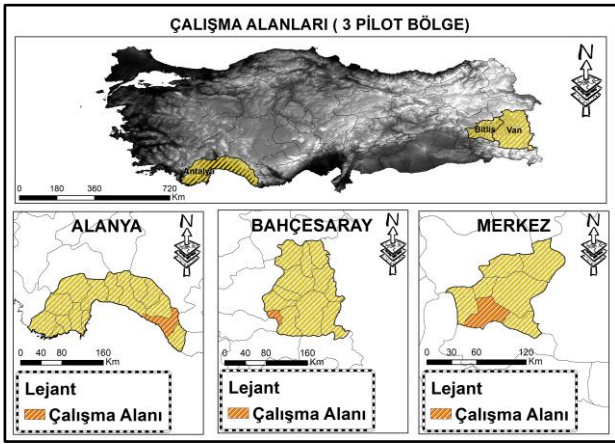
Pilot bölgelere yakın Meteoroloji Gözlem İstasyonlarından (MGİ) alınan 3 günlük yeni kar verisi kullanılarak çığ başlama bölgelerindeki kopma derinlikleri hesaplanmış ve elde edilen kopma derinlikleri kullanılarak 2 boyutlu çığ simülasyonu RAMMS programı ile yapılmıştır.

2.1.4. Tehlike haritası

RAMMS simülasyon programı ile çığın çarpma basıncı, akma hızı, akma yüksekliği ve durma/birikme bölgeleri belirlenmiştir. Bu analizler, 10/100 yıllık tekrarlanma sürelerine göre yapılmış ve çığ tehlike haritaları oluşturulmuştur.

2.1.5. Risk analizleri

Tehlike haritalarından elde edilen çığ tehlikesi bulunan alandaki nüfus, yapılaşma, yapı tipleri, araç sayıları ve geçiş sıklığı gibi çeşitli demografik, coğrafi bilgiler, arazi çalışmaları ve kamu kurumlarından (Karayolları ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü) toplanmış ve analiz edilmiştir. Bu bilgiler ışığında, seçilen pilot bölgelerde kantitatif ve kalitatif risk analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Yer bulduru haritası

2.2. Çalışma alanı ve çevresinin özellikleri

2.2.1. Bitlis – Merkez- Gazi Bey Mahallesi

Van Gölü'nün batısındaki Bitlis il merkezi, deniz seviyesinden yaklaşık 1550 metre yükseklikte yer almaktadır. İlin coğrafi sınırları incelendiğinde, yaklaşık %71'i dağlık alanlardan, %19'u platolardan ve %10'unun ovalardan oluştuğu görülmektedir [10].

Bitlis ili, jeomorfolojik yapısı ve iklimsel özellikleri nedeniyle sık sık doğal afetlerin yaşandığı bir bölgedir. Bir çalışmada Bitlis ilinde meydana gelen çığ gibi doğal afetlerin zamansal ve mekânsal analizleri yapılmış, risk değerleri hesaplanmıştır. Risk analizlerinde Fine-Kinney yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlara göre, çığ olaylarının eğimli ve bol yağış alan bölgelerde günlük hayatı tehdit ettiği belirlenmiştir. Merkez, Mutki ve Tatvan ilçelerinde çığ riski çok yüksek olduğu tespit edilmiştir [11]. Bir diğer çalışmada ise Bitlis Çayı Havzası'nda çığa duyarlı alanları Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile tespit etmek amaçlanmıştır. CBS tabanlı analizlerle havzanın %47'sinin orta, %34,1'inin düşük, %18,2'sinin yüksek çığ duyarlılığına sahip olduğu belirlenmiş ve yüksek duyarlılık Bitlis ilçe merkezi çevresindeyken, düşük duyarlılık Baykan ilçe merkezi ve güneyinde görülmüştür [12]. Bitlis ili Hizan ilçesi ve çevresindeki

çığa duyarlı alanları belirlemek için yapılan çalışmada da aynı şekilde Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknikleri kullanılmıştır. Yükselti, eğim, bakı, arazi kullanımı ve eğrisellik gibi coğrafi faktörler değerlendirilerek ağırlıklandırma yöntemi ile çığ duyarlılık haritası oluşturulmuştur. Sonuçlar, Petek Dağı, Panor Dağı ve Büyükdere'ye bağlanan yamaçların yüksek çığ riski taşıdığını göstermiştir [13]. Çalışma alanımız olan Bitlis Merkez'deki Gazi Bey Mahallesi'nin çevresi, tarihsel verilere dayanarak incelendiğinde, Afet İşleri Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan raporlar [14], [15] ve [16] yardımı ile mahalleyi tehdit eden çığ patikaları tespit edilmiştir. Bu patikaların her biri ortalama 400 metre uzunluğa sahiptir ve bölgeye giden ulaşım yolları ile 41 konut (Şekil 3) doğrudan çığ riski altındadır.



Şekil 3. Bitlis ili Gazibey mahallesi kuzey kesimi çığ tehlikesi altındaki konutlar

2.2.2. Van- Bahçesaray-Karabet Geçidi mevki

Van iline bağlı Bahçesaray ilçesi, Doğu Anadolu Bölgesi'nde dağlık ve engebeli bir arazi yapısına sahiptir. İlçe, Van merkeze yaklaşık 110 km uzaklıkta yer almakta ve coğrafi konumu itibarıyla Çatak, Gevaş, Bitlis'in Hizan ve Siirt'in Pervari ilçeleriyle komşudur. Bölgenin sert iklim koşulları ve aşırı kar yağışları, yüksek çığ potansiyeli oluşturmakta, bu durum da bölgeyi çığ afetleri açısından riskli bir hale getirmektedir. Bahçesaray ve Karabet Geçidi (Şekil 4), çığ olaylarının yoğunlukla yaşandığı alanlardır. Özellikle 04.02.2020 ve 05.02.2020 tarihlerinde meydana gelen çığ afetleri, Türkiye'deki en büyük çığ felaketlerinden biri olarak kayıtlara geçmiştir. Bu olayda, 11'i asker toplam 42 kişi hayatını kaybetmiştir [2].

Van ilinde Çatak ve Bahçesaray ilçeleri arasındaki karayolu üzerindeki yapılan bir çalışmada çığa duyarlı alanlar belirlenmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) teknikleri kullanılarak yapılan analizde, bölgenin çığ duyarlılık haritası oluşturulmuş ve yüksek riskli alanlar tespit edilmiştir. Özellikle Çatak-Bahçesaray yol ayrımından Bahçesaray ilçe merkezine kadar olan kısımda duyarlılık değerlerinin oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir [17]. Van Yüzcüncü Yıl Üniversitesi'nde yapılan çalışmada ise; Van ilinde meydana gelen doğal afet çeşitliliği Fine-Kinney Risk Değerlendirme Metodu (FK-RDM) kullanılarak analiz edilmiştir. Bu yöntem Van ili için ilk kez uygulanmış olup, çığ gibi afetlerin zamansal ve mekânsal analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma,

Van'ın güneybatı ve kuzeybatı bölgelerinin topoğrafik ve meteorolojik koşulları nedeniyle "çok yüksek risk" taşıdığını tespit etmiştir [18].



Şekil 4. Van Bahçesaray karayolu karabet geçidi mevki

2.2.3. Antalya-Alanya-Akdağ kayak merkezi

Akdağ, Antalya ili'nin Alanya İlçe merkezine karayolu ile yaklaşık 70 km uzaklıkta, kuş uçuşu ise 25 km mesafede bulunan, Batı Torosların doğu sınırında yer alan bir dağdır. Akdağ'ın zirvesi, 2450 metre yüksekliğe ulaşmakta olup, genellikle 2000 metre üzerindeki zirvelerin bitki örtüsünden yoksun olması ve litolojik olarak beyaz renkli kalkerli kayalardan oluştuğu için adına Akdağ ismi verilmiştir. Akdağ coğrafi konumu nedeniyle bölgesinde yağış miktarının en yüksek olduğu alanlardan biridir [19]. Akdağ, Alanya için planlanan bir kayak merkezinin (Şekil 5) potansiyel konumu olarak seçilmiştir ve bölgenin çığ potansiyeli, gelecekteki kayak merkezi için önemli bir güvenlik konusudur.



Şekil 5. Planlanan Akdağ kayak merkezinden kuzeye bakış

2.3. Pilot bölgelerin meteorolojik özellikleri

Yıllık ortalama sıcaklık, yağış ve nem gibi veriler sıklıkla genel çalışmalarda kullanılırken çığ simülasyonlarında ekstrem değerler önemlidir. Ayrıca, çığ simülasyonlarında tekerrür aralıklarına bağlı olarak kar kırılma derinliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kar kırılma derinlikleri çalışma alanını temsil eden en yakın istasyondaki son 72 saatte yağın taze kar miktarının Log-Pearson Tip-3, Gumbel, Log-Normal gibi dağılım yöntemleri kullanılarak 10/30/100/300 yıllık tekerrür ile bulunabilmektedir. Van Bahçesaray Karabet Geçidi ve Antalya Akdağ kayak merkezi için meteorolojik veriler MGM den temin edilmiştir. Ancak, verilerdeki eksiklikler nedeniyle bu veriler kullanılamamıştır. Sadece manuel olarak ölçüm yapılmış Bitlis Meteoroloji İstasyonundan temin edilen veriler analizlerde

kullanılmıştır. Bitlis İli merkez meteoroloji istasyonundan alınan verilere göre Log-Pearson Tip-3 dağılımı ile 10 yıllık kar kopma derinliği 147 cm ve 100 yıllık kar kopma derinliği 242 cm bulunmuştur. Analiz sonucuna göre tespit edilen potansiyel çığ başlama bölgelerinin üst kotunun 1880 m, alt kotunun 1690 m olduğu görülmüş ve ortalama kot 1785 m alınmıştır. Meteoroloji istasyonu verilerine göre ortalama kot arasında kot farkı 5 cm olarak ölçüldüğü için ek bir hesap yapılmamıştır. Potansiyel çığ başlama bölgelerinin olduğu alan da ortalama eğim 34 derece olarak bulunmuş, Avusturya da kullanılan metoda göre eğim bazında 0.74 azaltma faktörü kullanılmıştır. Çığlar genellikle 28-55 derece arasında eğime sahip alanlarda meydana gelir [7]. Çığların başlaması için minimum eğim 28 derece olduğundan kar derinlik değeri 28 derecelik eğime göre ayarlanmıştır. Bulunan değer 0.74 ile çarpılmış ve 100 yıllık kopma derinliği 158 cm bulunmuştur. Aynı şekilde 10 yıllık kopma derinliği içinde hesap yapılmış ve 96 cm olarak bulunmuştur.

2.4. Potansiyel çığ başlama bölgelerinin belirlenmesi

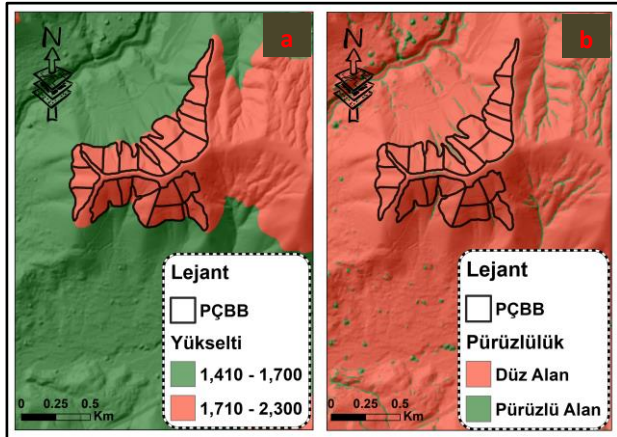
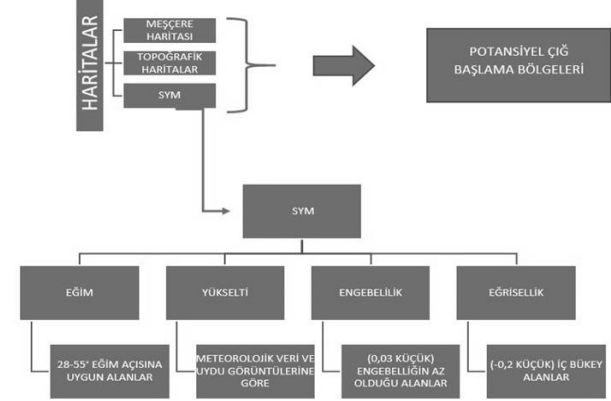
Potansiyel Çığ Başlama Bölgelerinin (PÇBB) belirlenmesinde kullanılan Algoritma Tablo 1 de yer almaktadır. Tabloya göre yamaç eğimi değeri 28 derece ile 55 derece arasında olmalıdır. Arazi ise içbükey bir arazi olmalıdır. CBS analizlerinde eğrisellik değerinin -0.2'den küçük olması durumunda bu alanlarda yüksek miktarda kar birikmesi meydana gelebilir ve bu alanlar çığ başlama bölgeleri için uygun alanlardır [20]. Yamaç pürüzlülüğünün değeri 0.03'ten küçük olan alanlar da pürüzlülük az olduğu için çığ başlama ihtimali yüksektir. Yükselti 1000 rakımdan büyük ve orman üst sınırı minimum yükseklik olarak seçilmelidir. Bitki örtüsü parametresi olarak kapalılığın 2 ve üstü olan alanlar potansiyel çığ başlama bölgelerinden çıkarılmalıdır. Çalışmada potansiyel çığ başlama bölgeleri belirlenirken yükselti 1000 m den aşağı olmamak kaydı ile 3 pilot alan için ayrı ayrı yükselti değerleri seçilmiştir. Yoğun orman alanlarında çığ meydana gelme olasılığı düşük olduğu için bu alanlar potansiyel çığ başlama bölgeleri belirlenirken dikkate alınmamıştır [20].

Şekil 6, 7, 8, 9, 10 ve 11 de 3 pilot bölgeye ait potansiyel çığ başlama bölgelerinin belirlenmesinde kullanılan katmanlar (eğim, yükselti, eğrisellik ve pürüzlülük) gösterilmiştir. Daha sonra bu katmanlarda kırmızı renkte gösterilen potansiyel çığ başlama bölgesi olabilecek alanlar birleştirilmiş, arazi incelemeleri, eski raporlar ve yerel halktan alınan bilgilere göre yapılan doğrulamalar neticesinde nihai Çığ Başlama Bölgeleri belirlenmiştir (Şekil 12).

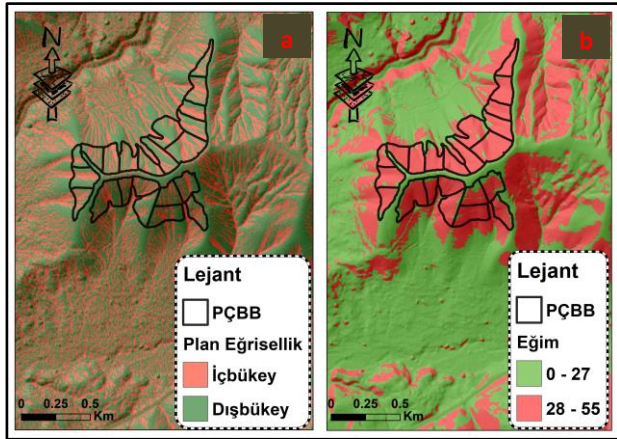
Çığ simülasyon modelleri tek boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) olmak üzere farklı boyutlarda tasarlanmıştır. 1D modeller, çığın merkezindeki hızları tahmin ederken, 2D modeller kar derinlikleri ve

yanal yayılma değerlerini hesaplar. 3D modeller ise çığ akışının hacimsel ilerlemesini analiz eder.

Tablo 1. Potansiyel Çığ Başlama Bölgelerinin belirlenmesinde kullanılan algoritma [20] ve [21]'den uyarlanmıştır.

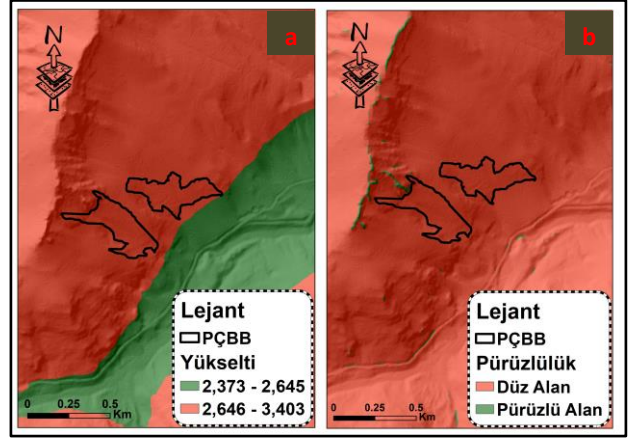


Şekil 6. Bitlis Gazi Bey M. yükselti(a), pürüzlülük(b) haritası

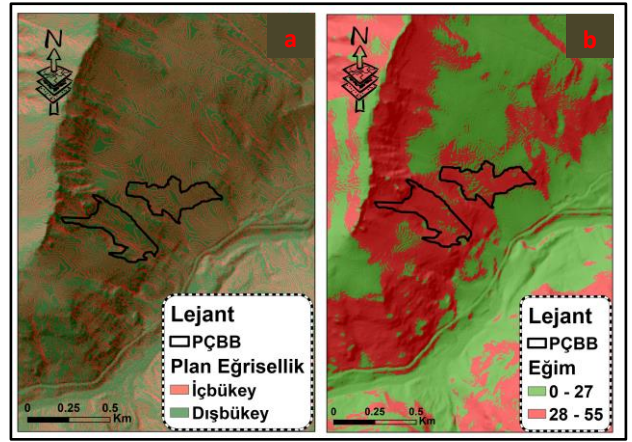


Şekil 7. Bitlis Gazi Bey M. eğrisellik (a) ve eğim(b) haritası

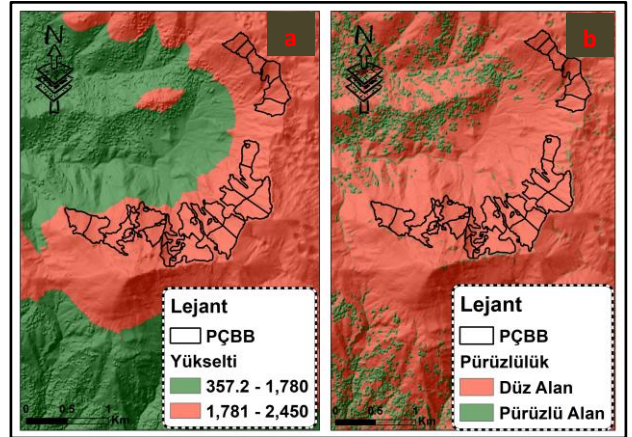
Bu modeller, çeşitli bilimsel yaklaşımlara (topografik/istatistiksel ve fiziksel/dinamik) dayanır ve özellikle Voellmy yasasını temel alan fiziksel bulunan WSL (İsviçre Federal Orman, Kar ve Peyzaj Araştırma Enstitüsü) tarafından geliştirilmiş 2 boyutlu çığ dinamiği simülasyon modelidir. Modelde kullanılan girdi parametreleri arasında kar yoğunluğu, kırılma derinliği, sürtünme parametreleri, topografik veriler ve çığ başlama bölgeleri yer alır [22].



Şekil 8. Bahçesaray Karabet Geçidi M. yükselti(a), pürüzlülük(b) haritası



Şekil 9. Bahçesaray Karabet Geçidi M. eğrisellik(a) ve eğim(b) haritası

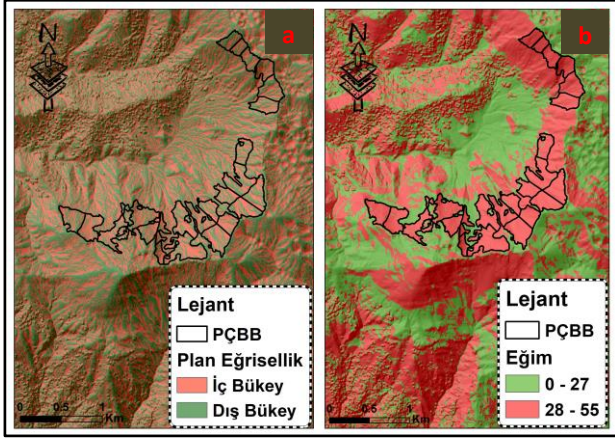


Şekil 10. Antalya Akdağ kayak merkezi yükselti(a), pürüzlülük(b) haritası

2.5. Çığ tehlike analizi

Tehlike haritaları, çığ güzergahlarını, kaçış bölgelerini ve tesis planlamalarında kullanılır. Ülkemizde çığ tehlike haritalama standardı olmadığından, bu çalışmada Avusturya standartlarına göre tehlike haritalaması yapılmıştır [23]. Avusturya Standardına (Tablo 2) göre, Kırmızı bölgelerde kalan alanlarda yeni yapılmaya izin verilmemekte ayrıca, mevcut yapılar korunmaktadır. Sarı bölgelerde ise çığ kontrol

yöntemleri ile bölgede çığ riski azaltıldıktan sonra yapılaşmaya izin verilmektedir (Şekil 13).



Şekil 11. Antalya Akdağ kayak merkezi eğrisellik(a) ve eğim(b) haritası

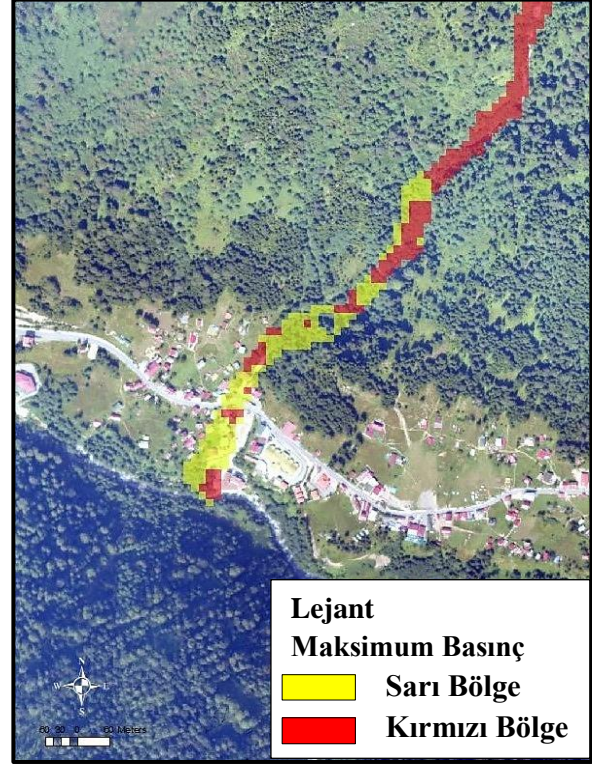
RAMMS programında 100 yıllık tekerrür aralığına sahip sonuçlar ile Avusturya Metodunda kullanılan 150 yıllık tekerrür aralığına sahip analizler benzer sonuçlar vermektedir. 100 yıllık tekerrür aralığına göre 3 pilot bölge için yapılan RAMMS analiz sonuçları da doğrudan Avusturya Metodunda kullanılmıştır.

Tablo 2. Avusturya standartları

Bölgeler	Tekerrür Periyodu	Basınç
Kırmızı Bölge	1 - 150 Yıl	$\geq 10 \text{ kN/m}^2$
Sarı Bölge	1 - 150 Yıl	1 - 10 kN/m^2

1 ve 10 kN/m^2 arasında çığ basıncının geldiği alanlar sarı olarak, 10 kN/m^2 ve daha büyük basınç gelen alanlar da kırmızı bölge olarak gösterilmektedir (Şekil 14). Uydu görüntüleri ve dron fotoğraflarından yapılan analizlerle çığ tehlike bölgelerine giren yapılar sarı ve kırmızı olarak işaretlenmiştir (Şekil 15). Bu bölgedeki yapılar sonrasında risk analizlerinde kullanılmıştır.

vb.) maruz kalacağı hasar düzeyine göre ortaya çıkabilecek potansiyel kayıplardır [24].

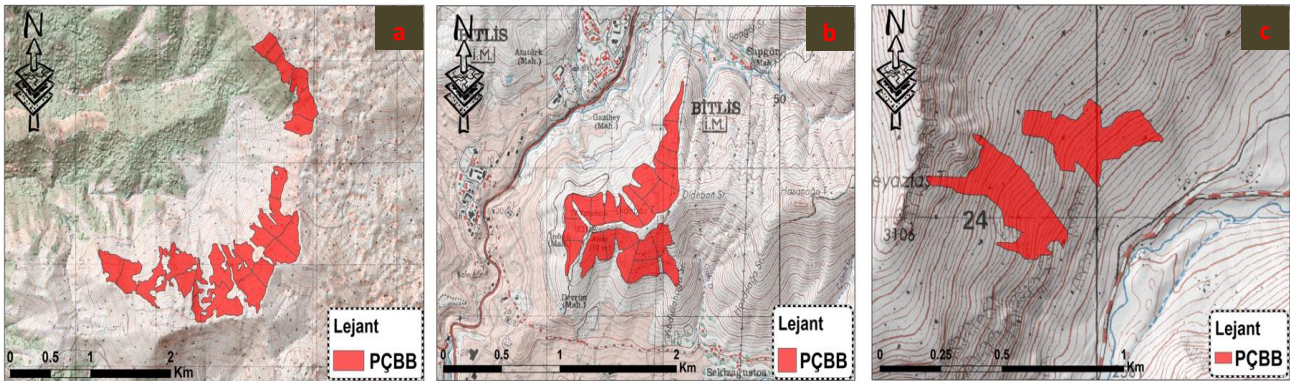


Şekil 13. Avusturya metoduna göre yapılmış çığ tehlike haritası [25]

Daha spesifik olarak, risk, doğa veya insan kaynaklı tehlikeler arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan zararlı sonuçların veya beklenen kaybın olasılığı olarak tanımlanır. Risk, geleneksel olarak;

$$\text{Risk} = \text{Tehlike} \times \text{Zarar Görebilirlik} \quad (1)$$

Formül 1 [26] deki gibi ifade edilir. Bir tehlike veya olayın risk veya kayıp olasılığını değerlendirebilmek için, öncelikle o tehlike veya olayın büyüklüğünün



Şekil 12. Nihai Çığ Başlama Bölgeleri a)Antalya b)Bitlis c)Van

2.6. Çığ risk analizi

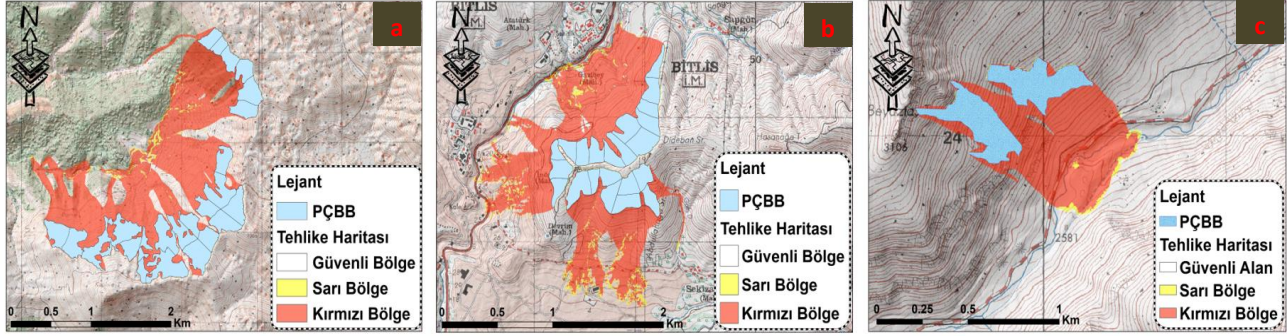
Risk, belirli bir zaman ve yerde bir tehlikenin gerçekleşmesi durumunda, tehdit altında bulunan unsurların (yerleşim yerleri, yerel halk, kritik tesisler

belirlenmesi, etkilenebilecek değerlerin varlığı ve bu

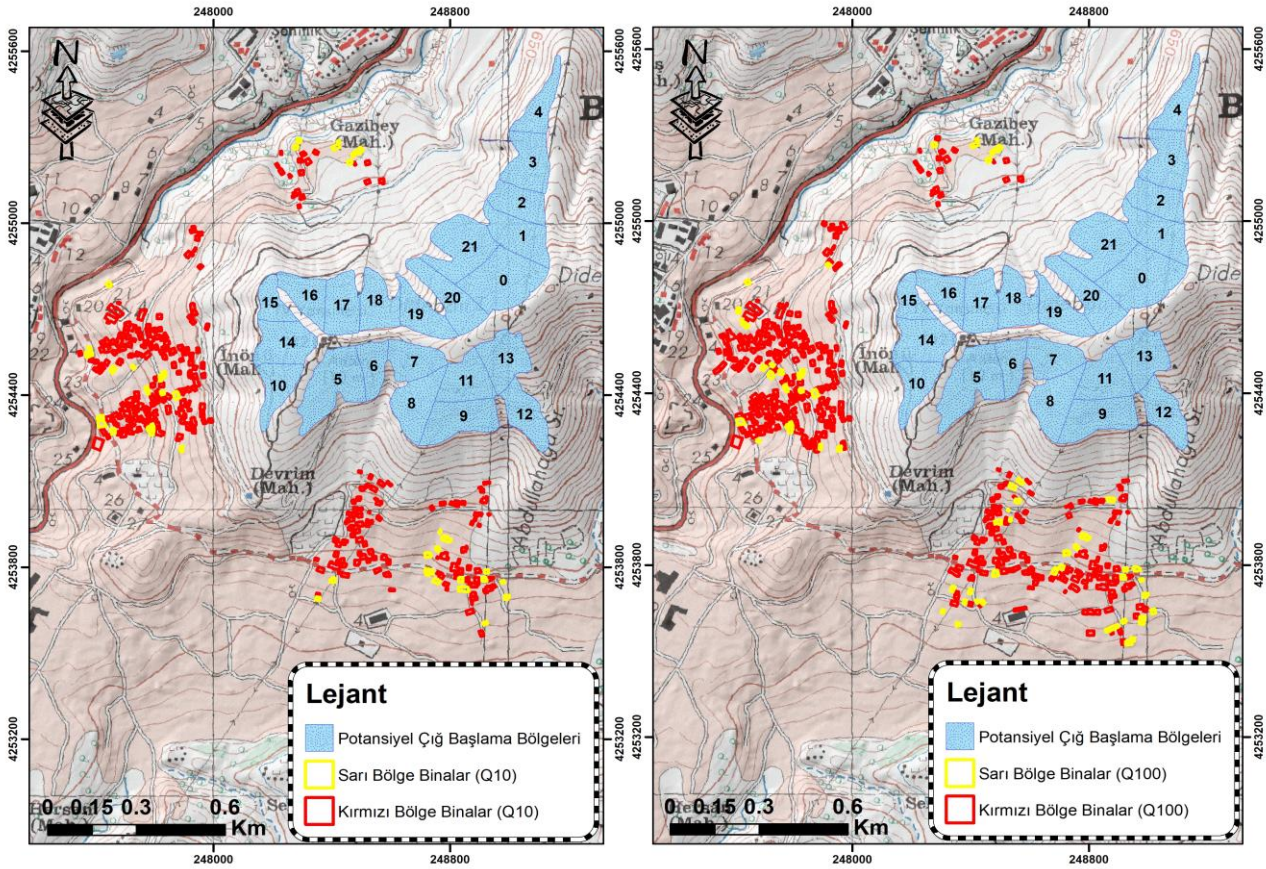
değerlerin tehlike veya olaydan ne ölçüde etkileneceğinin incelenmesi gerektiği bilgisi yer almaktadır. [27], [28] ve [29]'a göre, risk analizleri detay ve bilgi düzeyine bağlı olarak Kalitatif ve Kantitatif olmak üzere 2 kategoriye ayrılır. Kalitatif

risk analizlerinde, tehlike olasılığı ve etkisi gibi unsurlara sayısal olmayan değerler atanır ve bu değerler ile matematiksel ve mantıksal metotlar

[31]. Nicel/Kantitatif risk analizinde ise çığın oluşturduğu kantitatif değerler ile meydana gelme



Şekil 14. 3 pilot bölgeye ait çığ tehlike haritası



Şekil 15. Çığ tehlike haritasına göre sarı ve kırmızı bölgedeki yapılar

kullanılarak risk değeri hesaplanır. Öte yandan, kantitatif risk analizlerinde riskin hesaplanması için sayısal yöntemler tercih edilir. Kalitatif risk analizinde hem olumlu hem de olumsuz sonuçlar niteliksel olarak ifade edilir. Bir risk matrisi sonuçların niteliksel puanlamasının ve olasılığın kombinasyonundan oluşmaktadır [30].

Kalitatif risk analizleri genellikle tarım, orman ve yerleşim yerleri için uygulanmaktadır. Tehlikeli bölgeler tespit edildikten sonra, tehlike altındaki unsurların (ekonomik, çevresel, kültürel varlıklar, altyapı, orman ya da tarım alanları gibi) risk dereceleri yüksek, orta ya da düşük olarak hesaplanmaktadır

olasılıkları birleştirilir. Tehlike olayının daha fazla büyüklüğü ve sıklığı için olasılık dağılımları olabileceği gibi, bir dizi olası kayıp da olması durumunda böyle bir yaklaşımın her zaman basit bir cevap üretmediğine dikkat edilmelidir [31].

2.7. ALARP (makul düzeyde uygulanabilecek en düşük düzey)

ALARP ("as low as reasonably practicable") terimi, risk yönetiminde yaygın olarak kullanılan bir kavramdır. Bu ilke, riskleri mümkün olan en düşük seviyeye indirmeyi amaçlar, ancak bunu yaparken alınacak önlemlerin maliyeti ve uygulanabilirliği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bir riskin ALARP

ilkesine göre yönetilmesi, o riskin daha fazla azaltılma maliyetinin, riskin azaltılmasından elde edilecek faydayı aşacağı noktaya kadar risk azaltma önlemlerinin alınması gerektiği anlamına gelir (Şekil 16).

- $1 \cdot 10^{-4}$ den fazla [ölüm/yıl] - kabul edilemez risk, ölümler ve yapıların zarar görmesi kaçınılmazdır. Yerleşim yerleri ve tarımsal faaliyetler, arazi kullanımı ve yeni inşaat projeleri yasaktır.
- $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-4}$ [ölüm/yıl] - tolere edilebilir risk, çığ koruma yapıları, risk azaltma önlemleri ve altyapının geliştirilmesi ile mümkündür;
- $1 \cdot 10^{-6}$ dan az [ölüm/yıl] - kabul edilebilir risk, riski azaltmak için ek önlem gerekmez.

3. Bulgular

3.1. Bitlis çığ risk analizi

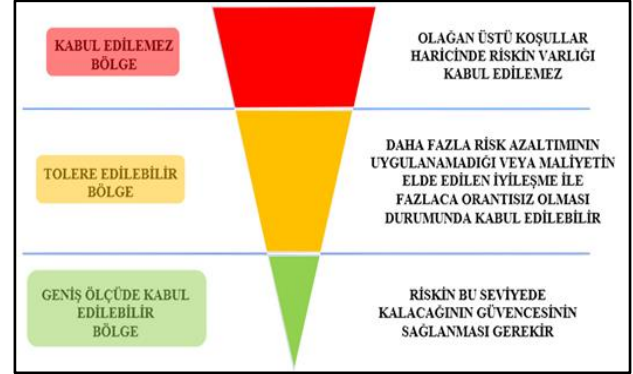
Bitlis ili Merkez ilçesi Gazi Bey Mahallesi için kalitatif metot kullanılarak çığ risk analizi yapılmıştır. Bu yöntem ile L tipi risk matrisi kullanılarak RAMMS çığ simülasyonunda tespit edilen çığ yollarının risk analizi gerçekleştirilmiştir. L tipi risk matrisinin (Şekil 17) sol köşesinde çığ olasılığı bölümü üst kısmında ise çığdan etkilenme şiddeti bölümü yer almakta ve risk bu iki katmanın birleşimini göstermektedir. Bu bölümde Yüksek, Orta ve Düşük Risk olmak üzere 3 risk değeri belirtilmektedir.

Tablo 3. Çığ olasılığı

Tanım	Frekans (Olaylar / Yıl)
Çok Yüksek	% $10 \leq F$
Yüksek	% $3.33 < F \leq 10$ (10 Yılda 1)
Orta	% $1 < F \leq 3.33$ (30 Yılda 1)
Düşük	% $0,33 < F \leq 1$ (100 Yılda 1)
Çok Düşük	$F \leq 0,33$ (300 Yılda 1)

Çığ olasılığı bölümünde Tablo 3 de görüldüğü üzere çığ olasılıkları yer almaktadır. 2 boyutlu RAMMS simülasyon programı kullanılarak yapılan çığ analizlerinde 10 ve 100 yıllık tekerrür periyodları kullanılmıştır. 10 yıllık tekerrür periyodu için "Yüksek

risk analizleri gerçekleştirilip toplanmıştır. Bu bölümde ise Tablo 4 de Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek ve Çok Yüksek olmak üzere 5 ayrı risk değeri belirtilmektedir. Bölgedeki gözlem ve yerel halk ile



Şekil 16. Risk değerlendirme ve risk azaltma için ALARP prensibi [31]

R = Çığ Olasılığı x Etkilenme Şiddeti	Çığdan Etkilenme Şiddeti	Çığdan Etkilenme Şiddeti					Risk Seviyesi	
		Çok Yüksek	Yüksek	Orta	Düşük	Çok Düşük		
Çığ Olasılığı	Çok Yüksek	5	25	20	15	10	5	Düşük Risk Orta Risk Yüksek Risk
	Yüksek	4	20	16	12	8	4	
	Orta	3	15	12	9	6	3	
	Düşük	2	10	8	6	4	2	
	Çok Düşük	1	5	4	3	2	1	

Şekil 17. L tipi risk matrisi

görüşmeler yoluyla elde edilen Konut, Nüfus ve Kritik Tesisler verileri için ayrı ayrı Q10 ve Q100 tekerrür aralığına göre risk analizleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre sonuçlar Tablo 5 de gösterilmektedir. Risk değerlendirme sonuçlarını içeren Tablo 5 "DÜŞÜK", "ORTA" ve "YÜKSEK" olmak üzere üç risk durumundan oluşmaktadır. Ayrıca "Çığ Yolu" çığ riski taşıyan çığ başlama bölgelerini, Q10 ve Q100 ise risk değerlendirmesinde her bir çığ yolunun aldığı puanı temsil etmektedir. Tabloya göre konut durumu için Q10 tekerrür periyodunda yapılan analizde 5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15 nolu çığ yolları Yüksek Riskli olduğu görülmektedir. Nüfus durumu için Q10 tekerrür periyodunda yapılan analizde ise 5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15 nolu çığ yolları yüksek riskli olarak bulunmuştur. Bölgede kritik tesislerin az

Sınıf	Çığdan Etkilenme Şiddeti				
	Çok Düşük (1)	Düşük (2)	Orta (3)	Yüksek (4)	Çok Yüksek (5)
Nüfus	Kişi Sayısı ≤ 3	$3 < \text{Kişi Sayısı} \leq 9$	$9 < \text{Kişi Sayısı} \leq 30$	$30 < \text{Kişi Sayısı} \leq 90$	Kişi Sayısı > 90
Konut	Yapı (Adet) ≤ 1	$1 < \text{Yapı (Adet)} \leq 3$	$3 < \text{Yapı (Adet)} \leq 10$	$10 < \text{Yapı (Adet)} \leq 30$	Yapı (Adet) > 30
Bazı Kritik Tesisler (Okul vb.)	Tesis (Adet) ≤ 1	$1 < \text{Tesis (Adet)} \leq 3$	$3 < \text{Tesis (Adet)} \leq 5$	$5 < \text{Tesis (Adet)} \leq 10$	Tesis (Adet) > 10

Tablo 4. Çığdan etkilenme şiddeti

Riskli" ve 100 yıllık tekerrür periyodu için ise "Düşük Riskli" olarak Tablo 3 de gösterilmektedir. L tipi risk matrisinde bulunan diğer parametre ise çığdan etkilenme Burada nüfus, konut ve diğer kritik tesisler olmak üzere 3 ayrı durum vardır. Bu durumlar için

Tablo 5. Konut, nüfus ve kritik tesisler risk durumu

Çığ Yolu	Konut (adet)	Çığ Olasılığı (Q10)	Çığ Olasılığı (Q100)	Nüfus (kişi)	Çığ Olasılığı (Q10)	Çığ Olasılığı (Q100)	K.Tesis (adet)	Çığ Olasılığı (Q10)	Çığ Olasılığı (Q100)
0	0	Düşük (4)	Düşük (2)	0	Düşük (4)	Düşük (6)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
1	0	Düşük (4)	Düşük (2)	0	Düşük (4)	Düşük (2)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
2	0	Düşük (4)	Düşük (2)	0	Düşük (4)	Düşük (2)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
3	0	Düşük (4)	Düşük (2)	0	Düşük (4)	Düşük (2)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
4	0	Düşük (4)	Düşük (2)	0	Düşük (4)	Düşük (2)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
5	50	Yüksek (20)	Orta (10)	150	Yüksek (20)	Orta (10)	6	Düşük (4)	Orta (8)
6	30	Yüksek (20)	Orta (10)	90	Yüksek (20)	Orta (10)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
7	34	Yüksek (20)	Orta (10)	132	Yüksek (20)	Orta (10)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
8	42	Yüksek (20)	Orta (10)	126	Yüksek (20)	Orta (10)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
9	55	Yüksek (20)	Orta (10)	165	Yüksek (20)	Orta (10)	1	Düşük (4)	Düşük (4)
10	65	Yüksek (20)	Orta (10)	195	Yüksek (20)	Orta (10)	7	Orta (8)	Orta (8)
11	42	Yüksek (20)	Orta (10)	126	Yüksek (20)	Orta (10)	9	Düşük (4)	Orta (8)
12	49	Yüksek (20)	Orta (10)	152	Yüksek (20)	Orta (10)	1	Düşük (4)	Düşük (4)
13	35	Yüksek (20)	Orta (10)	105	Yüksek (20)	Orta (10)	1	Düşük (4)	Düşük (4)
14	60	Yüksek (20)	Orta (10)	185	Yüksek (20)	Orta (10)	1	Düşük (4)	Düşük (4)
15	54	Yüksek (20)	Orta (10)	167	Yüksek (20)	Orta (10)	1	Düşük (4)	Düşük (4)
16	16	Orta (16)	Orta (8)	50	Orta (16)	Orta (8)	1	Düşük (4)	Düşük (4)
17	16	Orta (16)	Orta (8)	48	Orta (16)	Orta (8)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
18	14	Orta (16)	Orta (8)	50	Orta (16)	Orta (8)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
19	18	Orta (16)	Orta (8)	60	Orta (16)	Orta (8)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
20	19	Orta (16)	Orta (8)	38	Orta (16)	Orta (8)	0	Düşük (4)	Düşük (4)
21	8	Orta (12)	Düşük (6)	23	Orta (12)	Düşük (6)	0	Düşük (4)	Düşük (4)

olmasından dolayı risk değerleri genel olarak düşük çıkmıştır.

$$R = \frac{WDT \times \beta}{24h} \sum_{Ti \times Vi}^{gi + tcar} \lambda i \quad (3)$$

3.2. Karabet Geçidi mevkii çığ risk analizi

Bireysel risk (r), bir aracın belirli bir zamanda çığ riskine maruz kalma olasılığını, çığın genişliği (gi), aracın durma mesafesi (tcar), ortalama hızı (vi), ve bir gün içindeki geçiş sayısı (z) gibi parametrelerle hesaplanır (Formül 2). Toplam risk (R) ise, günlük trafik hacmi (WDT), doluluk derecesi (beta), ve ortalama ölüm oranı (λi) göz önünde bulundurularak, belirli bir karayolu için toplam riski ifade eder. Modele göre çığ tekrarlama periyodu (Ti) dikkate alınarak uzun vadede risk değerlendirilmesine de olanak tanır (Tablo 6).

Tablo 6. Karayollarında risk hesaplama formülasyonu

Çığ Patikası	Geçiş Sayısı	Çığın Genişliği (km)(g)	Ortalama Araç Hızı (km/sa)(v)	Doluluk Derecesi (β)	Ortalama Ölüm Oranı (λ)	Trafik Hacmi (WDT)	Tekerrür Periyodu (T)
1	2	0.37	90	1.61	0.18	84	100
2	2	0.31	90	1.61	0.18	84	100

Tablo 7. Karabet Geçidi mevkii risk analiz sonuçları

r	R	r (Bireysel Risk)
6.2E-07	4.2E-05	Kabul Edilebilir
5.2E-07	3.5E-05	Kabul Edilebilir

Karayollarında Bireysel ve Toplu Risk Formül 2 ve 3 ile hesaplanabilir [32].

$$r = \frac{z}{24h} \sum_{Ti=1}^n \frac{gi+tcar}{Ti \times Vi} \times \lambda i \quad (2)$$

Tablo 7 ye göre “r” sütunu bireysel riski, “R” sütunu ise toplu riski ifade etmektedir. Tablo 7 de belirtilen bireysel risk için “Kabul Edilebilir” etiketi, değerlendirme kriterlerine göre riskin düşük düzeyde olduğunu göstermektedir. Riskin kabul edilebilir çıkmasının asıl sebebi ise Karayolları Genel Müdürlüğünden Van-Bahçesaray Karayolu için alınan İl Yolları Trafik Hacmi [33] verisinin güncel olmaması ve hacmin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

3.3. Akdağ kayak merkezi çığ risk analizi

Karayolları ve kayak merkezlerinde bireysel veya toplu ölüm risklerinin hesaplanması, alınabilecek

önlemlerin niteliği ve önceliği konusunda önemli bir yol gösterici olmaktadır. Kayak merkezleri için düşünüldüğünde hem zamansal zarar görebilirlik (Zz) hem de mekansal zarar görebilirlik (Zm) hesaplanmalıdır. Zamansal zarar görebilirlik bir çığ tekerrür periyodu boyunca (kayak sezonu içinde çığ meydana gelme ihtimali olan gün sayısı) turistlerin ve kayakçıların alanda bulunma süresini (gün sayısı) ifade eder. Ayrıca bir gün içerisinde turistlerin ve kayakçıların kaç saat çığ tehlikesi olan alanda bulunduğu (Td) ve günün kaç saati çığ meydana gelme

Tablo 8. Akdağ kayak merkezi için risk değerlendirilmesi

Pist No	Td (sa)	Ty (g)	Tda (sa)	Tya(g)	Vt	Vs	d	dg	K	P	Zs	Zg
1	8	120	24	120	0.33	0.9	1000	2000	0.66	0.01	150.000	600.000
2	8	120	24	120	0.33	0.9	1000	2000	0.66	0.01	150.000	600.000
3	8	120	24	120	0.33	0.9	1000	2000	0.66	0.01	150.000	600.000

ihtimali olduğu (Tda) bilgilerine ihtiyaç vardır. Bu bağlamda kayakçılar genellikle kayak merkezlerine gelip tüm zamanını burada geçireceklerinden dolayı Td 8 saat, çığ ise günün 24 saatinin herhangi bir anında meydana gelebileceği için Tda 24 saat olarak alınmıştır. Ayrıca yılın kaç günü turistlerin ve kayakçıların çığ tehlikesi bulunan alana geldiği (Ty) ve bu günler içerisinde kaç gün çığ tehlikesi olabileceği (Tya) bilgisine ihtiyaç vardır. Bu bağlamda Ty tesisin açık olduğu günler olarak belirlenebilirken Tya kayıtlardan veya benzer kayak merkezlerinden bilgi alınarak sezon içerisinde çığın ilk ve son görüldüğü günler arasındaki süre olarak belirlenebilir.

Tablo 9. Akdağ kayak merkezi için risk analiz sonuçları

Rn (kişi/yıl)	r	Rn(g)(kişi/yıl)	R(g)	r (şu anki bireysel risk)	r(g)(gelecekteki bireysel risk)
1.98	0.000013	0.0000066	0.0000066	Tolere Edilebilir	Tolere Edilebilir
1.98	0.000013	0.0000066	0.0000066	Tolere Edilebilir	Tolere Edilebilir
1.98	0.000013	0.0000066	0.0000066	Tolere Edilebilir	Tolere Edilebilir

Zamansal Zarar Görebilirlik Formül 4'e göre hesaplanabilir;

$$Zz = (Td / Tda) * (Tya / Ty) \quad (4)$$

Mekânsal zarar görebilirlik (Zm) ise bu çalışmada RAMMS ile hesaplanan (100 yıl tekrarlı aralığı, yani %1 ihtimal için) çığ bölgelerinin, pistlerin ne kadarını kapladığı tespit edilerek ortaya konulmuştur. Buna göre kayak yapılan pist veya pistlerin çığ altında kaldığı alanın (Aa) toplam pist alanına (Ap) oranı mekânsal zarar görebilirliği verecektir (5).

$$Zm = (Aa / Ap) \quad (5)$$

Kayak tesislerinde toplu risk (Rt) Formül 6 ile hesaplanabilir;

$$Rt = P \times d \times Vt \times Vs \times K \quad (6)$$

Formülde K indeksi, çığlarda ölüm oranını temsil eder ve çığlarda ölümlerle sonuçlanan uzun vadeli istatistikleri yansıtır. Bu katsayı için sabit değer olarak 0.66'yı kullanırız. Bu değer, tamamen çığa gömüldükten sonra kişinin sağ kurtulma olasılığını ifade eder [34]. Bunun yanında "d" değeri ise çığ tehlikesi olan pistte aynı anda kaç kişinin bulunabileceği (kişi/m²) indeks değerini ifade eder.

"P" ise ilgili tekerrür aralığıdır. Bu aşamadan sonra kayak tesisi "i" senaryosuna göre kullanacak her bir şahsın ölüm riski hesaplanabilir. Bu risk varsa tesisin master planına göre gelecek projeksiyonlar içinde yapılabilir. Bireysel ölüm riski, toplu ölüm riskinin sezon içinde çığ tehlikesi olan pistleri kullanacak kişi sayısına "N" oranlanarak hesaplanabilir. Yapılan 2 boyutlu RAMMS çığ simülasyonları ve arazi inceleme sonuçları birleştirilerek kayak merkezi risk analizi tamamlanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan semboller ve açıklamaları aşağıdaki gibidir;

- Td(s): Kayakçıların ortalama bir gün içerisindeki pisti kullanma süresi (saat).

- Ty(g): Pist yıl içerisinde hizmete açık olduğu günler (gün).
- Tda(g): Çığın gün içerisinde meydana gelme olasılığı süresi (saat).
- Tya(g): Çığın yıl içerisinde görülme periyodu (gün).
- Vt(%): Zamansal zarar görebilirlik.
- Vs(%): Mekânsal zarar görebilirlik.
- D(kişi/km²): Pistte bulunabilecek en fazla kayakçı sayısı.
- K(%): Ölüm katsayısı.
- P(%): Bir çığın yılda bir meydana gelme ihtimali.
- Rt(kişi/yıl): Toplu risk.
- r: Bireysel risk.
- Aa (ha): 100 yıl tekrar aralıklı çığın meydana gelmesi durumunda çığın kapladığı alan (ha).
- Ap (ha): Pist alanı (ha).
- N: Sezon içinde pistleri kullanacak kişi sayısı.

Antalya ili Alanya ilçesi Akdağ kayak merkezi için Risk değerlendirilmesinde hesaplanan toplu ve bireysel ölüm riski şu anki durum ve gelecekteki risk durumunun hesaplanması Tablo 8 de belirtilmektedir. Tablo 9 da görüldüğü üzere şu anki durumda bireysel ölüm riski 0.000013 ve gelecekteki projeksiyon için 0.0000066 dır. Bu durumda hem şimdiki durum hem

de gelecekteki durum için risk durumu “Tolere Edilebilir” olarak belirlenmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Ülkemizin topografik ve iklimsel özelliklerinden dolayı her yıl çığ felaketleri sonucunda can ve mal kaybı yaşanmaktadır. Özellikle Doğu Anadolu ve Doğu Karadeniz de çığ olaylarının yoğunlaştığı görülmektedir. Bu doğrultuda seçilen 3 pilot bölgede öncelikle Çığ Başlama Bölgeleri arazi incelemeleri, yerel halktan alınan bilgiler ve çeşitli algoritmalar kullanılarak belirlenmiştir.

Sonrasında RAMMS programı ile pilot alanlarda 2 Boyutlu çığ simülasyonları yapılarak çığ hız, basınç ve yükseklik sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen çığ basınçları Avusturya Metodu kullanarak Çığ tehlike haritaları oluşturulmuş ve bu bölgeler yüksek risk taşıyan alanlar kırmızı, düşük çığ tehlikesi olan alanlar sarı bölge olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Kırmızı bölgelerde yerleşim alanları var ise mevcut yapıların korunması, yeni yapılaşmanın engellenmesi, kayak merkezi ve karayollarında ise gerekli önlemlerin acilen uygulanıp bu alanların kullanıma açılması, sarı bölgelerde ise tüm alanlarda (yerleşim, karayolları ve kayak merkezi) yapısal önlemler alındıktan sonra yeniden kullanıma açılması sağlanmalıdır.

Risk analizi sonuçlarına göre Bitlis Merkez Gazi Bey Mahallesi'nde bulunan 21 adet çığ yolunda orta ve yüksek risk durumu olduğundan acilen bu bölgede önlem alınması gerekmektedir. Çalışma sonucunda, Bitlis Merkezde bulunan pilot alandaki çığ yollarının büyük çoğunluğunda orta ve yüksek olarak belirlenmiş ve bu sonuç, literatürdeki diğer çalışmalarla uyumlu çıkmıştır. Özellikle Bitlis ilinin jeomorfolojik ve iklimsel özellikleri, çığ riskinin yüksek olmasına neden olmaktadır. Bitlis Merkez'de yapılan çığ duyarlılık ve çığ risk çalışmaları, bölgedeki çığ tehlikesinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Fine-Kinney yöntemiyle yapılan risk analizinde, Bitlis Merkez'in çok yüksek riskli olduğu görülmektedir [11]. Diğer bir çalışmada ise, Bitlis Merkez'deki alanların önemli bir kısmının benzer bir şekilde yüksek çığ duyarlılığına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak, sadece duyarlılık analizleri yeterli olmayıp, bu çalışmadaki gibi iki boyutlu simülasyonlarla desteklenip tehlike ve risk haritalarının hazırlanması gerekmektedir [12]. Bitlis ili Hizan ilçesi ve çevresindeki bölgede yapılan çalışmaya göre Bitlis Merkez Gazi Bey Mahallesi ile Hizan ve çevresinin benzer coğrafi özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Özellikle eğimin yüksek ve orman örtüsünün zayıf olduğu alanlarda her iki bölgede de benzer şekilde çığ riski yüksektir [13].

Van Bahçesaray Karabet Geçidi örneğinde ise bireysel risk Kabul Edilebilir olarak bulunmuştur. Bu durum bu karayolunun çok kullanılmadığından ve trafik hacim verilerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Van Bahçesaray'da yapılan çığ çalışmalarında [17] ve [18], bölgedeki çığ riskinin yüksek olduğunu görülmektedir. Pilot alan olarak seçilen Van Bahçesaray, araç trafik hacminin az olması nedeniyle kabul edilebilir risk seviyesinde çıkmasına rağmen, çığ tehlike haritasına göre yolun büyük bir kısmının kırmızı bölgede olduğu tespit edilmiştir.

Antalya ili Alanya ilçesi Akdağ kayak merkezinde hem şimdiki bireysel risk durumu hem de gelecekteki bireysel risk durumu tolere edilebilir olarak bulunmuştur. Kayak merkezi açılmadan önce gerekli çığ kontrol önlemlerinin alınması gerekmektedir.

Çığ başlama, akma ve birikme alanlarında öncelikle her türlü yapılaşma ve aktiviteden kaçınılmalıdır. Bu bölgelerde bina, tesis veya spor merkezi gibi yapılara karar verilirken çığ tehlike ve risk haritaları dikkate alınmalıdır. Çığ riski bulunan alanlarda öncelikle çığ tünelleri, kar köprüleri, kar çitleri, yakalama ve saptırma duvarları ve rüzgâr perdeleri gibi yapısal önlemler tercih edilmelidir. Alternatif olarak kayak merkezleri ve karayollarında, çığ kontrolü için yapısal önlemlerin dışında geçici patlayıcı kullanımı, yol kapatma ve tahliye gibi önlemler uygulanabilir. Bu amaçla, kayak merkezleri ve bazı karayolları geçiş noktalarında, bir mühendis liderliğinde sürekli görev yapan çığ uzmanları bulundurulmalıdır. Bu uzmanlar, şiddetli rüzgâr ve yoğun kar yağışı durumlarında kayak pistlerinin açılıp açılmayacağına, yapay çığ oluşturulup oluşturulmayacağına, yolların kapatılıp güvenlik önlemlerinin alınmasına, kar temizleme ve sıkıştırma işlemleri yapılmasına karar verebilirler. Çığ yolları ile çakışan yollar kullanılmamalı veya gerekli önlemler alınmalıdır. Güvenlik önlemleri alınmayan çığ alanlarına giriş ve çıkış yasaklanmalıdır.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] European Avalanche Warning Services, 2024. <https://www.avalanches.org/fatalities/fatalities-statistics/> (Erişim Tarihi: 12.03.2024).
- [2] AFAD, 2020. Afet Yönetimi Kapsamında 2019 Yılına Bakış ve Doğa Kaynaklı Olay İstatistikleri. https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/e_Kutuphane/Kurumsal_Raporlar/Afet_Istatistikleri_2020_web.pdf (Erişim Tarihi: 01.04.2024).
- [3] AFAD, 2018. Türkiye’de Afet Yönetimi. https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/35429/xfiles/Turkiye_de_Afetler.pdf (Erişim Tarihi: 10.05.2024).

- [4] AFAD, 2021. Bingöl İl Afet Risk Azaltma Planı. https://www.afad.gov.tr/bingol_irap.pdf (Erişim Tarihi: 20.09.2024).
- [5] AFAD, 2021. Bitlis İl Afet Risk Azaltma Planı. https://www.afad.gov.tr/bitlis_irap.pdf (Erişim Tarihi: 21.09.2024).
- [6] AFAD, 2021. Hakkâri İl Afet Risk Azaltma Planı. https://www.afad.gov.tr/hakkari_irap.pdf (Erişim Tarihi: 20.09.2024).
- [7] Rudolf-Miklau, F., Sauer Moser, S., Mears, A. I., Boensch, M. M. 2015. The Technical Avalanche Protection Handbook. Berlin: Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. 430s.
- [8] Fredston, J., Fesler, D. 1994. Snow Sense: A Guide to Evaluating Snow Avalanche Hazard. Alaska Mountain Safety Center, 116s.
- [9] McClung, D., Schaerer, P. A. 2006. The Avalanche Handbook. The Mountaineers Books, Seattle, 288s.
- [10] Gür, H., Sönmez, F. Y., Ay, M. 2012. Bitlis İli Çevre Durum Raporu. T.C. Bitlis Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü.
- [11] İkinci, R., Büyüksaraç, A., İkinci, Y. L., Işık, E. 2020. Bitlis İlinin Doğal Afet Çeşitliliğinin Değerlendirilmesi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi 6(1), 1-11.
- [12] İrcan, M. R., Duman, N. 2024. Bitlis Çayı Havzası'nda Çığ Oluşumuna Duyarlı Alanların Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Tespit Edilmesi. Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi / Journal of Geomorphological Researches 2024(12), 37-53.
- [13] Matpay, B., Doğu, A.F., Seyitoğulları, M.A. 2023. Hizan ve Çevresinde (Bitlis) Çığ Oluşumuna Duyarlı Alanların Belirlenmesi. Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi, 2023(10), 110-132.
- [14] Yazıcı, Z., Demir, S. 2006. Çığ Etüd Raporu. Bitlis: T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Afet Etüd ve Hasar Tespit Dairesi Başkanlığı, Çığ Araştırma-Geliştirme Etüd ve Önlem Şube Müdürlüğü.
- [15] Yazıcı, Z., Arslan, G., Demir, S. 2006. Çığ Etüd Raporu. Bitlis: T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Geçici İskân Dairesi, Çığ Araştırma-Geliştirme, Etüd ve Önlem Şube Müdürlüğü.
- [16] Yazıcı, Z., Arslan, G., Ayhan, A. 2004. Çığ Etüd Raporu. Bitlis: T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Geçici İskân Dairesi, Çığ Araştırma-Geliştirme, Etüd ve Önlem Şube Müdürlüğü.
- [17] Avşin, N., Çakı, D. T. 2021. Çatak - Bahçesaray (Van) Karayolu Üzerindeki Çığa Duyarlı Alanların Belirlenmesi. Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi, 2021(7), 30-47.
- [18] Matpay, B., Mutlu, S. 2023. Van İlinin Doğa Kaynaklı Afet Çeşitliliğinin Fine-Kinney Risk Değerlendirme Metodu (FK-RDM) ile Ortaya Konulması. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 9(2), 324-340.
- [19] Sarı, C., 2008. Antalya'nın alternatif turizm kaynakları, planlama yaklaşımları ve öneriler. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 16(1), 12-19.
- [20] Bühler, Y., Rickenbach, D., Stoffel, A., Margreth, S., Stoffel, L., & Christen, M. (2018). Automated snow avalanche release area delineation-validation of existing algorithms and proposition of a new object-based approach for large scale hazard indication mapping. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 18(2), 365-387.
- [21] Yıldız, E., Akkuş, H. 2022. Karayolu Üzerindeki Çığ Tehlikesinin Değerlendirilmesi: Van-Bahçesaray Örneği 2020. Afet Sempozyumu, 20-22 Nisan 2022, Ankara, 819-831.
- [22] Christen, M., Buehler, Y., Bartelt, P., Schumacher, L. 2010. Ramms user manual v1.01. http://ramms.slf.ch/ramms/index.php?option=com_content&view=article&id=53&Itemid=7 (Erişim Tarihi: 20.01.2024).
- [23] Holub, M., Fuchs, S. 2009. Mitigating mountain hazards in Austria – legislation, risk transfer, and awareness building. Nat Hazards Earth Syst Sci 9(2), 523-537.
- [24] Kadioğlu, M. 2015. Afet ve Acil Durum Yönetimine Giriş. Atatürk Üniversitesi, ATA-AÖF. <http://bit.ly/afetyonetimi> (Erişim Tarihi: 20.01.2024).
- [25] Yıldız, E., 2018. Avalanche Mitigation Measures in Turkey Case Study of Ayder. Yüksek Lisans Tezi, BOKU - Universität für Bodenkultur Wien, 123s, Avusturya.
- [26] AFAD, 2014. Açıklamalı Afet Terimleri Sözlüğü, Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, Ankara, 216s.
- [27] Van Westen, C. J., Castellanos, E., Kuriakose, S. L. 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard and vulnerability assessment, An overview, Engineering Geology, 102, 112-132.
- [28] BUWAL, 1999. Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. Bern. <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00131/index.html?lang=de> (Erişim Tarihi: 10.05.2024).
- [29] Blanchard, W. 2008. Guide to Emergency Management and Related Terms, Definitions, Concepts, Acronyms, Organizations, Programs, Guidance, Executive Orders & Legislation: A Tutorial on Emergency Management, Broadly

Defined, Past and Present. Carl Von Clausewitz
On War, Princeton University Press, 1976, 132s.

- [30] Lee, E. M., Jones, D. K. C. 2004. Landslide Risk Assessment. Thomas Telford Publishing, London, 528s.
- [31] CSA. 1997. Risk Management: Guideline for Decision Makers. CSA Group, Kanada, 66s.
- [32] Wilhelm, C. 1997. Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Mtt. Eidgenössisches Institut für Schnee und Lawinenforschung, Davos, 309s.
- [33] Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). 2019. İl Yolları Trafik Hacmi verisi. <http://bit.ly/kgmtrafik> (Erişim Tarihi: 23.05.2024).
- [34] Brugger, H., Etter, H. J., Zweifel, B. 2007. The impact of avalanche rescue devices on survival. Resuscitation, 75(3), 476-483.

Yapı Zemin Etkileşiminin Yığma Bir Minarenin Sismik Davranışına Etkisi

Elifnur ŞAKALAK^{1*}, Ali Ekber SEVER², Pınar USTA EVCİ³

^{1,2,3}Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32000, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 28.05.2024, Kabul / Accepted: 16.09.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Deprem,
Minare,
Yapı zemin etkileşimi,
Yığma

Öz: Zemin ile üst yapının geometrik, mekanik ve dinamik özellikleri birbirlerine aktarıldığı için tasarımları bağımsız düşünülmemelidir. Yapı zemin etkileşimi göz önüne alınarak gerçekleştirilen analizlerde yapı periyodu ve periyoda bağlı olarak etki eden yatay kuvvetler zemin özelliklerine göre değişiklik gösterir. Bu çalışmada yapı-zemin etkileşiminin yığma bir minarenin sismik davranışına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Türkiye'nin Isparta ilinde inşa edildiği düşünülen tipik bir yığma minare SAP2000 V23.1.0 programında modellenmiştir. Yapı zemin etkileşiminin minarenin sismik davranışına etkilerini görmek için minarenin, zemine ankastre mesnetli ve yapı zemin etkileşimli iki ayrı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. İki model üzerinde, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine uygun modal analiz, tepki spektrumu analizi ve zaman tanım alanında analiz gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında analiz için son dönemde meydana gelen Türkiye'de asrın felaketi olarak adlandırılan Pazarcık Depremi, Elbistan Depremi ve Hatay Depremi'nin ivme kayıtları kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler ile yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modellerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Modal analiz sonucunda yapı zemin etkileşimli modelin periyot değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda, yapının tepe noktasındaki en büyük yatay yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığı zaman yapı zemin etkileşimli modelde daha büyük yer değiştirmelerin olduğu tespit edilmiştir. En büyük asal gerilmeler karşılaştırıldığında yapı zemin etkileşimli modelde ankastre mesnetli modele nazaran daha yüksek asal gerilmelerin oluştuğu tespit edilmiştir.

The Effect of Structure Soil Interaction on the Seismic Behavior of a Masonry Minaret

Keywords

Earthquake,
Masonry,
Minaret,
Structure soil interaction

Abstract: Since the geometric, mechanical and dynamic properties of the soil and the superstructure are transferred to each other, their designs should not be considered independent. In the analyzes carried out considering the structure-soil interaction, the structure period and the horizontal forces acting depending on the period vary according to the soil properties. In this study, the effect of the structure-soil interaction on the seismic behavior of a masonry minaret was investigated. For this purpose, a typical masonry minaret, which is thought to have been built in the Isparta province of Turkey, was modeled in the SAP2000 V23.1.0 program. In order to see the effects of structure soil interaction on the seismic behavior of the minaret, two separate finite element models of the minaret were created with fixed support (FS) and structure soil interactive (SSI). On two models, modal analysis, response spectrum analysis and time history analysis in accordance with the 2018 Turkish Structure Earthquake Regulation were performed. For the time history analysis, the acceleration records of the Pazarcık Earthquake, Elbistan Earthquake and Hatay Earthquake, which are called the disaster of the century in Turkey, which occurred recently, were used. The data obtained as a result of the analyzes were compared with the results of the models with structure soil interaction and fixed support. As a result of the modal analysis, it was determined that the period value of the SSI model

was higher. As a result of the analyzes made in the time history, it was found that there were larger displacements in the SSI model when the largest horizontal displacement values at the top of the structure were compared. When the largest principal stresses were compared, it was found that higher stresses occurred in the SSI model than in the FS model.

1. Giriş

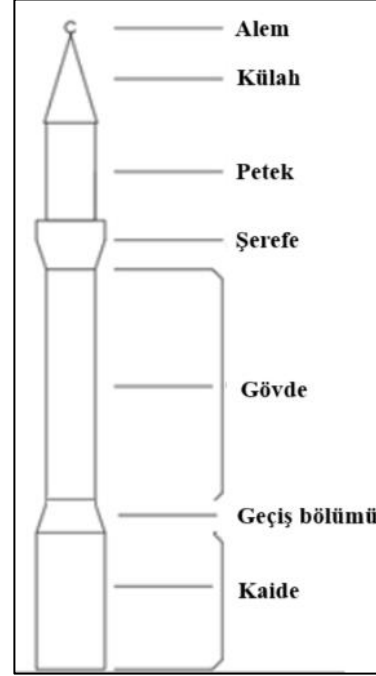
Depremler, Türkiye'de en önemli doğal tehditler arasında yer almaktadır. Türkiye, dünyanın sismik olarak en aktif bölgelerinden birinde yer aldığından, tarihi mirasın korunması sorununa büyük önem verilmesi oldukça anlaşılır bir durumdur. Yapı mühendisleri, özellikle bu yapıları oluşturan malzemelerin oldukça karmaşık davranışlarından dolayı, bu tür yapıların analizini ve tasarımını her zaman oldukça zor bulmuştur. Analize dinamik davranış dahil edildiğinde sorun daha da karmaşık hale gelir.

Kule tipi yığma yapılar yapısal formları gereği oldukça hassas ve narindirler. Bu özellikleri sebebiyle deprem ve rüzgâr gibi dinamik yüklere maruz kaldıklarında daha savunmasızdırlar. Birçok kule tipi yığma yapı, büyük depremler, şiddetli rüzgarlar veya herhangi bir belirti olmaksızın aniden tamamen veya kısmen yıkılmıştır. Örneğin İzmir'deki Selahattin Oğlu Minaresi ve Kilis'teki Şih Ahmet Minaresi depremlerde hasar gören yapılardan bazılarıdır (Şekil 1).



a) Şih Ahmet Minaresi [1] b) Selahattin Oğlu Minaresi [2]
Şekil 1. Depremde hasar gören minareler.

Kule tipi yapılardan olan yığma tarzda inşa edilmiş minareler Türkiye'de oldukça fazladır. Minareler genel olarak kaide, geçiş bölümü, gövde, şerefe, petek, külah ve alem olmak üzere 7 bölümden oluşur (Şekil 2). Yığma minarelerde gerilmeler genel olarak geçiş bölgesinde ve silindirik bölgede yoğunlaşır [3-7]. Dolayısıyla yığma minareler genellikle bu bölgelerden geçer. İnce ve yüksek yapılar olan tarihi yığma minareler, sıklıkla harç, taş veya tuğla kullanılarak inşa edilir.



Şekil 2. Minare bölümleri [8]

Tarihi yapıların deprem davranışları, yapılarında yerel malzeme ve yerel yapım yöntemleri kullanıldığı için birbirine benzememektedir. Literatürde yığma minarelerin deprem yükü altındaki dinamik analizleri ile ilgili yapılan çalışmalar oldukça fazladır. Ancak yapılan çalışmaların çoğunda yapı zemin etkileşimi göz ardı edilerek yapı zemine ankastre olarak mesnetlendirilmiştir. Bu tarz yapılan çalışmalar aşağıda anlatılmıştır.

Işık vd. [9] çalışmalarında Türkiye'de Bitlis'te bulunan tarihi Ulu Cami minaresini incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri yapısal analizlerde farklı aşılma olasılıkları ile bölgede daha önce meydana gelmiş olan depremlerin ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Analiz sonuçlarında aşılma olasılıkları arttıkça gerilmeler, taban kesme kuvvetleri ile yer değiştirme değerlerinin azaldığını görmüşlerdir. Maraş vd. [10] tarihi bir camiyi minaresi ile birlikte modelleyip analiz etmişlerdir. Zaman tanım alanında analiz ile yapının sismik davranışını elde etmişlerdir. Analizlerde bölgede meydana gelen bir depremin de ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Dinamik analiz sonrası modelde elde edilen olası çatlak bölgeleri ile deprem sonrası yapıda oluşan hasar bölgelerinin benzerlik gösterdiği sonucuna varmışlardır. Trešnjo vd. [11] tarihi bir minarenin yapısal davranışını değerlendirmek için analizler yapmışlardır. Yapı yerinde incelemeler yapılarak ilk doğal frekansı elde etmişler ve modal analizden elde ettikleri ile kıyaslayıp uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır.

Türker vd. [12] iki eğik yığma minare için uzak ve yakın fay hareketi kayıtlarının bu minarelerdeki sismik davranışa etkilerini incelemişlerdir. Işık vd. [13] minarelerde kullanılan malzemelerin karakteristik özelliklerinin yapının dinamik davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 9 farklı minare modeli üzerinde 13 farklı malzeme türünü değişken olarak kullanmışlardır. Malzeme özelliklerinin, minarelerin dinamik davranışına önemli derecede etki ettiği sonucuna ulaşmışlardır. Şentürk vd. [14] çalışmalarında tarihi bir camiyi ve minaresini modellemişlerdir. Yapının dinamik analizi için önceden meydana gelmiş depremlerin ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Yapılan analiz sonucunda yapıda güçlendirme yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. 5 farklı teknikle güçlendirilmiş modelde tekrar analiz gerçekleştirilmiştir. Güçlendirme tekniklerinin yapının sismik davranışını arttırıcı etkisi olduğu sonucuna varmışlardır. Yapılan güçlendirme tekniklerinden 2 tanesinin kritik yerde oluşabilecek hasar riskini ortadan kaldırdığını görmüşlerdir. Işık vd. [15] çalışmalarında Türkiye’de bulunan Bitlis’teki Beş Minarenin yapısal analizini gerçekleştirmişlerdir. Tahribatsız yöntemlerle malzeme özelliklerini elde etmiş ve makro modelleme yöntemi ile minareleri modelleyip analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda minarelerin geçiş bölgelerinde gerilmelerin maksimum olduğunu tespit etmişlerdir.

Genç vd. [16] tarihi bir cami ve minaresini deneysel yöntemlerle ve bilgisayar programında modelleyerek incelemişlerdir. Deneysel veriler yardımı ile sonlu eleman modellerini güncellemişlerdir. Sonuçta hem cami hem de minare modellerinde en etkili güncelleştirilmiş parametrenin elastisite modülü olduğunu bulmuşlardır. Alemi vd. [17] Keşan’da bulunan tarihi bir minareyi araştırmışlardır. Sonlu elemanlar programı kullanarak minarenin sismik analizini gerçekleştirmişlerdir. Minarenin yapısal formunu ve inşasındaki mimari düzenlemeleri yapının depremlere karşı ciddi bir hasar almama nedeni olarak yorumlamışlardır. Yurdakul vd. [3] çalışmalarında tarihi yığma bir minarenin deprem davranışını araştırmışlardır. Analiz için önceden meydana gelmiş 3 adet depremin ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Analizler sonucunda deprem yükleri nedeniyle oluşan çekme gerilmelerinin sınır gerilmelerini aştığını belirtmişlerdir.

Hökelekli vd. [4] çalışmalarında tarihi bir yığma minarenin sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlardır. Model üzerinde önceden meydana gelmiş deprem ivme kayıtlarını kullanarak doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında doğrusal olmayan analizden elde edilen gerilme değerlerinin daha gerçekçi olduğu sonucuna varmışlardır. Adam vd. [18] çalışmalarında tarihi yığma bir minareyi sonlu elemanlar modeli ile modellemişlerdir. Yapının kendi ağırlığı altında statik analizi ile rüzgâr ve deprem

yükleri altında dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Analizleri doğrusal ve doğrusal olmayan analizler olarak uygulamışlardır. Statik ve dinamik analizler ile doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Hoseynzadeh ve Mortezaei [19] çalışmalarında tarihi bir minareyi sonlu elemanlar programında modelleyip itme analizini, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizini ve modal analizini gerçekleştirmişlerdir. Sismik analizler sonucu 3 farklı güçlendirme yöntemi (FRP sheets, Ferro-cement and fiber reinforced cementitious matrix (FRCM)) uygulamışlardır. Güçlendirme yöntemlerini kıyasladıklarında en etkili yöntemin Ferro-cement olduğu sonucuna varmışlardır.

Kılıç vd. [20] çalışmalarında Hızırbey Cami minaresinin lineer dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında 2007 ve 2018 Türkiye deprem yönetmeliklerini karşılaştırmışlardır. Ayrıca minare yapısını hem çubuk elemanlarla hem de kabuk elemanlarla modelleyerek sonuçları karşılaştırmışlardır.

Yukarıda verilen çalışmalarda ankastre mesnet tanımlaması yapıldığı için yapının sert bir zemin üzerine inşa edildiği düşünülmüştür. Eğer yapının oturacağı zemin elastik özellikte sert bir kaya ise bu yaklaşımın doğru olduğu kabul edilebilir [21]. Ancak zemin tam olarak rijit bir malzeme olmadığı gibi her bölgede zemin cinsi kaya olarak kabul edilemez. Yumuşak zeminlerde bu kabul yapıp ankastre mesnet tanımlamasına göre analiz yapıldığında gerçeği yansıtan sonuçlar elde edilemeyebilir. Dolayısıyla yapı ile zemin beraber analiz edilerek yapı zemin etkileşimi dikkate alınmalıdır.

Üst yapı taşıyıcı sisteminde yapı yüklerinin zemine aktarılması gerekir. Ancak deprem anında zeminde bir yer hareketi meydana geldiği için zemin bu hareketi üst yapıya ileterek yapıda deprem yükleri oluşturur. Üst yapıda oluşan deprem kuvvetleri (atalet kuvvetleri) tekrar zemine aktarılır [22]. Deprem meydana geldiği sırada zeminin yapıyı etkilemesi ile yapı hareketini ve yapı tepkisinin de zemin hareketini etkilediği bu olay yapı-zemin etkileşimi olarak adlandırılır. Analizlerde yapı zemin etkileşimli tam model göz ardı edilmemelidir. Literatürde yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak yapılan çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Korkmaz ve Demir [23] çalışmalarında doğrusal olmayan analizler yaparak yapının davranışının zemin türünden ve özelliklerinden nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. 4 farklı rijitliğe sahip zemini ele alarak yapıyı hem ankastre hem de yaylarla modellemişlerdir. Zemin şartlarının iyi olmadığı durumlarda periyodun değiştiğini görmüşlerdir. Girgin vd. [24] yapısal tasarımı yapı zemin etkileşiminin tasarıma etkisini ortaya koymayı amaçlamışlardır. Bunun için değişken yatak katsayısı, sabit yatak katsayısı ve rijit yapı zemin yöntemlerini

kullanarak bir yapı modelleyip analizini gerçekleştirmişlerdir. Rijit yapı zemin modeline göre diğer modellerde periyotlarda artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Baş [25] çalışmasında betonarme bir yapıyı sonlu elemanlar modeli ile modelleyip yapı zemin etkileşimi ile rijit temel modellerini karşılaştırmıştır. Deprem yüklemelerini hem yatay hem de yatay+düsey şeklinde yüklemiştir. Yapılan yüklemeler sonucu taban kesme kuvvetlerinde değişiklik olmadığını görmüştür. Yapı zemin etkileşimli model ile rijit temel modelden elde edilen sonuçların daha yüksek olduğunu görmüştür. Lazizi ve Tahghighi [26] çalışmalarında tarihi bir yapının deprem hasarı ile yıkılma mekanizmasını incelemek amacıyla yapının sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Modelleme yapılırken, üst yapıyı hem temele mesnet ile bağlayıp hem de yapı zemin etkileşimi ile gerçekleştirmişlerdir. Model üzerinde doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler (zaman tanım alanında analiz) uygulamışlardır. Yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak yapılan model analizinden elde edilen periyot değerlerini ankastre mesnetli modelden elde edilen değerlerden daha büyük bulmuşlardır. Zaman tanım alanında gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarında yapı zemin etkileşimi modelinde daha büyük yer değiştirme değerleri elde etmişlerdir.

Hökeleki ve Al-Helwani [27] tarihi yığma bir minareyi ankastre mesnetli ve yapı zemin etkileşimli olarak modellemişlerdir. Bu modeller üzerinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları analizlerde yapı zemin etkileşiminin yapısal davranış üzerinde önemli bir etkisi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Fathi vd. [28] çalışmalarında İran'da bulunan tarihi bir yapının ankastre mesnetli modelini ve yapı zemin etkileşimini dikkate alarak tam modelini oluşturmuşlardır. Modeller üzerinde statik analiz, modal analiz ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirmişlerdir. Ankastre mesnetli modelde yapının deprem yüklemelerine karşı tatmin edici davranış sergilediğini görmüşlerdir. Yapı zemin etkileşimini ele alan modelde ise yapı, deprem kaydının y bileşeninde yetersiz kalmıştır. Karki vd. [29] çalışmalarında bir yapıyı sabit ve esnek tabanlı olarak modellemişlerdir. Model üzerinde doğrusal statik analiz ile doğrusal olmayan statik analiz gerçekleştirmişlerdir. Sabit temelde daha yüksek yük taşıma kapasitesi elde etmişlerdir.

Yıldız ve Doğan [30] çalışmalarında baraj yapımı nedeniyle başka bir bölgede tekrar yapılan tarihi bir yapının yapı zemin etkileşimini dikkate alarak sismik analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapının analizi için SAP2000 programını kullanmışlardır. Dinamik analiz için Sivrice ve Kocaeli deprem kayıtlarını kullanmışlardır. Analizlerden yanal yer değiştirme,

davranış spektrumu ve iletilen ivme sonuçlarını elde etmişlerdir.

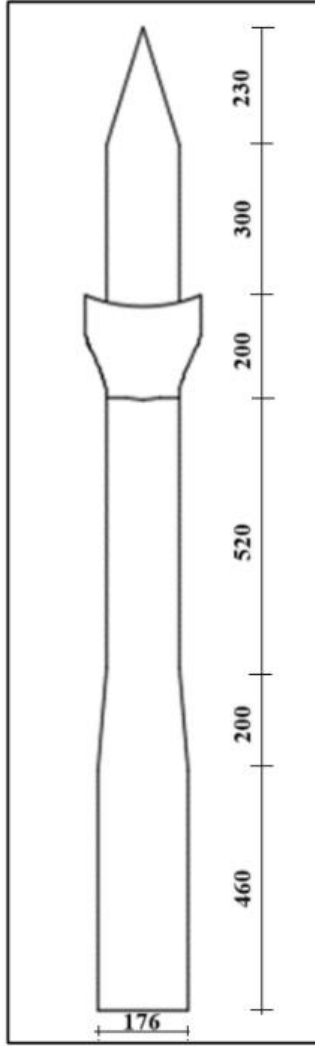
Caccliola vd. [31], İtalya'da bulunan yığma bir çan kulesinin doğrusal olmayan sismik performansını yapı zemin etkileşimini dikkate alarak incelemişlerdir. Çalışmanın sonunda yapı zemin etkileşiminin, çan kulesinin sismik performansında kritik bir rol oynadığını ve deprem sırasındaki gerilme ile yer değiştirmeler üzerinde önemli etkilerinin olduğu tespit etmişlerdir. Shabani ve Kioumarsi [32], yığma bir kulenin dinamik davranışını yapı zemin etkileşimini dikkate alarak araştırmışlardır. Bu amaçla öncelikle operasyonel modal analiz yöntemiyle kulenin mod şekilleri ve periyot değerlerini elde etmişlerdir. Elde ettikleri bu bilgileri kullanarak bir bilgisayar programında kulenin sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlardır. Yaptıkları analizler sonucunda yapı zemin etkileşiminin, kulenin sismik performansı üzerinde önemli bir role sahip olduğunu söylemişlerdir.

Literatürde, yığma yapılar genellikle sadece üst yapı dinamikleri dikkate alınarak analiz edilmektedir. Zemin özelliklerinin yapının dinamik davranışına etkisi yeterince araştırılmamıştır. Bu eksiklik, yığma yapıların deprem karşısındaki performansının daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini olumsuz etkilemektedir. Özellikle, minare gibi yüksek ve ince yığma yapıların zemin ile olan etkileşimlerinin, sismik performansları açısından kritik öneme sahip olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma yapı zemin etkileşiminin; deprem etkileri altındaki yığma bir minarenin periyot, yer değiştirme ve gerilmelerine olan etkilerini inceleyerek literatüre katkı sağlamakta ve yığma minarelerin daha güvenli tasarımı için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Bu çalışmada Türkiye'nin Isparta ilinde inşa edildiği düşünülen tipik bir yığma binanın SAP2000 V23.1.0 [33] programında zemine ankastre mesnetli ve yapı zemin etkileşimli iki ayrı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Türkiye'de asrın felaketi olarak adlandırılan, ülkeyi derinden sarsan Pazarcık, Elbistan ile Hatay depremlerinin ivme kayıtları kullanılarak modeller üzerinde modal analiz, tepki spektrumu analizi ve zaman tanım alanında analiz yapılmıştır.

2. Minare Hakkında Bilgi ve Minarenin Modellenmesi

Tipik bir yığma minarenin SAP2000 V23.1.0 programında zemine ankastre mesnetli modeli ile yapı zemin etkileşimi dikkatle alınarak tam modeli oluşturulmuştur. Minarenin kaide (kürsü) bölümü kare planlı taş malzeme olup 80 cm kalınlığında olduğu düşünülmüştür. Gövde bölümü çokgen ve geçiş bölgesi (pabuç) prizmatik kesitli taş malzeme olup 20 cm kalınlığında olduğu düşünülmüştür. Yerden yüksekliği 19.10 m olan minarenin geometrik görünümü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Minarenin geometrik görünümü (cm)

Yığma türündeki minarede taş malzeme kullanıldığı düşünülmüştür. Malzeme özellikleri, literatürde yığma minarelerle ilgili yapılan çalışmalarda kullanılan malzeme özelliklerinden alınmıştır [34]. Tablo 1'de minareyi oluşturan malzeme özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri [34]

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Poisson Oranı
Taş	5000	24	0.2

Yapı zemin etkileşimi modeli için gevşek, orta ve sert kum olmak üzere üç katmandan oluşan zemin modellemesi yapılmıştır. Zemin malzeme özellikleri, literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan malzeme özelliklerinden alınmıştır [35]. Tablo 2'de zemin malzemelerinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Zemin özellikleri [35]

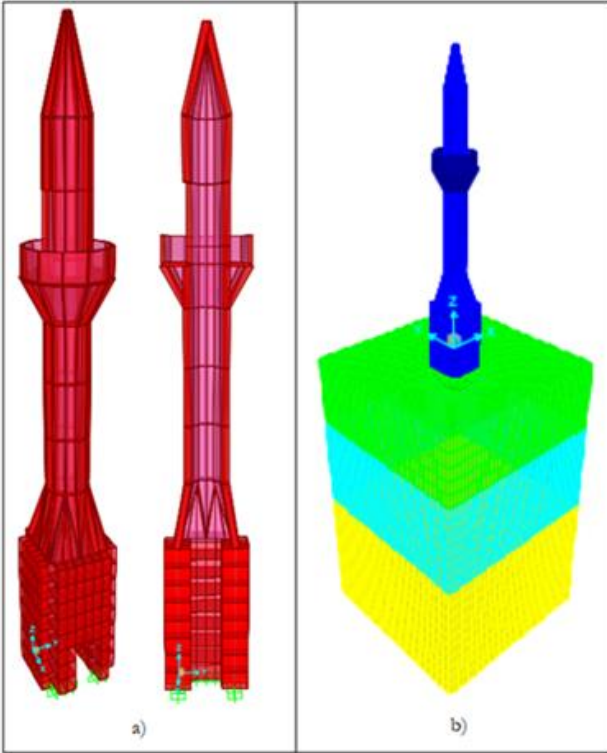
Zemin

	Gevşek	Orta Sıkı	Sıkı
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	14.6	15.8	17
Elastisite Modülü (kN/m ²)	15600	30160	40300
Kayma Modülü (kN/m ²)	6000	11600	15500
Poisson Oranı	0.3	0.3	0.3
İçsel Sürtünme Açısı (°)	28	38	42

Yapının, SAP2000 V23.1.0 programında hem zemine ankastre olarak mesnetlenmesi hem de yapı zemin etkileşimi göz önünde bulundurularak üst yapı ile zeminin birlikte modellenmesi olmak üzere iki ayrı modeli oluşturulmuştur. Şekil 4a'da verilen ankastre mesnetli modelde yapı shell eleman olarak modellenmiştir. Yapı modelinde 347 adet shell eleman kullanılmıştır.

Yapı zemin etkileşimli modelde sonlu bir bölge oluşturacak şekilde modellenen sonsuz boyuttaki zemin içerisinde yayılan sismik dalgalar sonlu bölgenin sınırlarına çarpar ve zemin içerisinde hareket halinde olurlar [36]. Çalışmada sonsuz boyuttaki zemin sonlu bir bölge oluşturacak şekilde modellenmiştir. Zemin gevşek, orta sıkı ve sıkı olmak üzere 3 tabakadan oluşmaktadır. Zeminin sınır koşullarında, yan yüzeylerinde x ve y yönünde hareket edemeyen ancak z yönünde hareket edebilen, tabanında ise üç yönde de (x, y, z) hareket edemeyen mesnetleme yapılmıştır. Zemin tabakaları programda solid eleman olarak modellenmiştir. Yapı zemin etkileşimli model Şekil 4b'de verilmiştir. Yapı modelinde zemini oluşturan 12672 adet solid eleman kullanılmıştır.

Mesh adeti belirlenirken analiz süresini kısaltmak ve sonuçların doğruluğunu korumak amacıyla optimum sayıda mesh kullanılmıştır. Bunun için bir yakınsama çalışması yapılmış ve sonuçların önemli ölçüde değişmediği mesh adedinde karar kılınmıştır.



Şekil 4. a) Ankastre mesnetli model b) Yapı zemin etkileşimli model.

2.1. Deprem parametrelerinin belirlenmesi

Minarenin inşa edildiği düşünülen bölgenin deprem parametreleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de (TBDY 2018) [37], tanımlanan DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için <https://tdth.afad.gov.tr> adresinden alınmıştır [38]. Tablo 3'te ilgili parametreler verilmiştir.

Tablo 3. Deprem parametreleri [38]

Parametre	Değer
Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (S_s)	0.738
1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (S_1)	0.170
Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS})	0.889
1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (S_{D1})	0.255

Zaman tanım alanında analizlerin gerçekleştirilmesi için gerçek deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Asrın felaketi olarak adlandırılan Türkiye'de meydana gelen 3 depremin ivme kayıtları kullanılmıştır. 6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye'nin güneydoğusunda merkez üssü Kahramanmaraş Pazarcık olan 8.6 km derinlikte saat 04:17'de 7.7 büyüklüğünde birinci deprem ve merkez üssü Kahramanmaraş Elbistan olan 7 km derinlikte saat 13:24'te 7.6 büyüklüğünde ikinci deprem meydana gelmiştir. 20 Şubat 2023 tarihinde ise merkez üssü Hatay Defne'de 16.7 km derinlikte saat 20:04'te 6.4 büyüklüğünde bir deprem daha meydana gelmiştir. Depremler 11 ilde büyük yıkıma neden olmuştur. 51000'e yaklaşan can kaybı ve 107000' i

aşan yaralı sayısı ile deprem "asrın felaketi" olarak adlandırılmıştır. Literatürde depremlerin tarihi yapılar üzerindeki etkilerini inceleyen birçok araştırma yer almıştır.

Erkek ve Yetkin [39], 6 Şubat 2023 depremlerinde ağır hasar gören tarihi Envar ül Hamit Camii'nin sismik performansını incelemişlerdir. Yapının sismik analizini incelemek için 6 Şubat 2023'te meydana gelen ilk depremin her iki yatay bileşenini yapıya uygulamışlardır. Analizlerden en büyük yer değiştirme, taban kesme kuvveti, asal gerilmeler ve plastik deformasyon parametrelerini elde ederek değerlendirmişlerdir. Analiz sonuçlarını tarihi yapının uğradığı gerçek hasarla karşılaştırmışlardır. En büyük asal gerilmelerin tarihi minarenin geçiş bölgesinde elde edildiğini bulmuşlardır. Uyguladıkları doğrusal olmayan analizde tarihi minarenin üst geçiş bölümünden çöktüğünü görmüşlerdir.

Nasery [40], çalışmasında, 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş'ta meydana gelen depremler sonrasında büyük hasar gören Harran Ulu Camii (Ulu Cami) minaresinin deprem sonrası durumunu incelemiştir. Ersoy [41], yaptığı çalışmada, iki yıkıcı deprem olan Kahramanmaraş depremlerinin Antakya Kurtuluş Caddesi civarında bulunan tarihi yapılar üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla bir saha çalışması yapmıştır. Çalışması sonucunda en sık görülen hasar türlerinden birinin duvarların düzlem dışı hareketi olduğunu görmüştür.

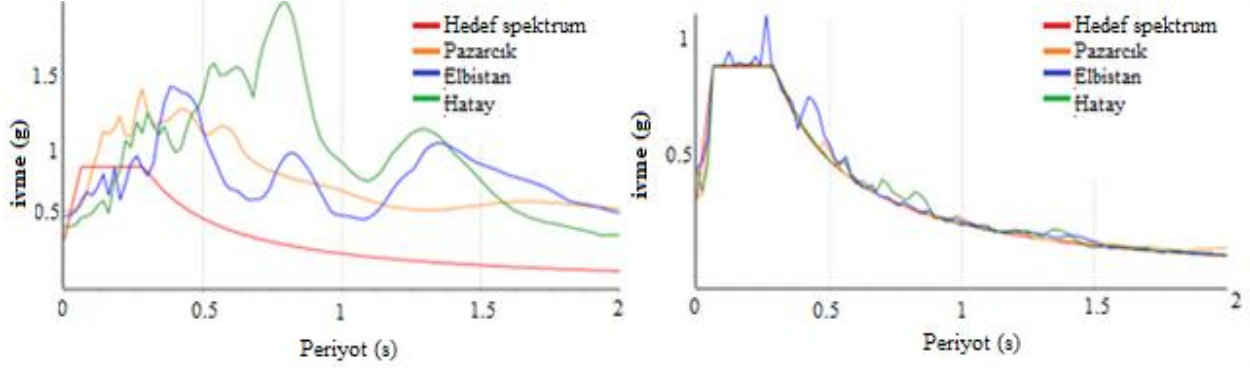
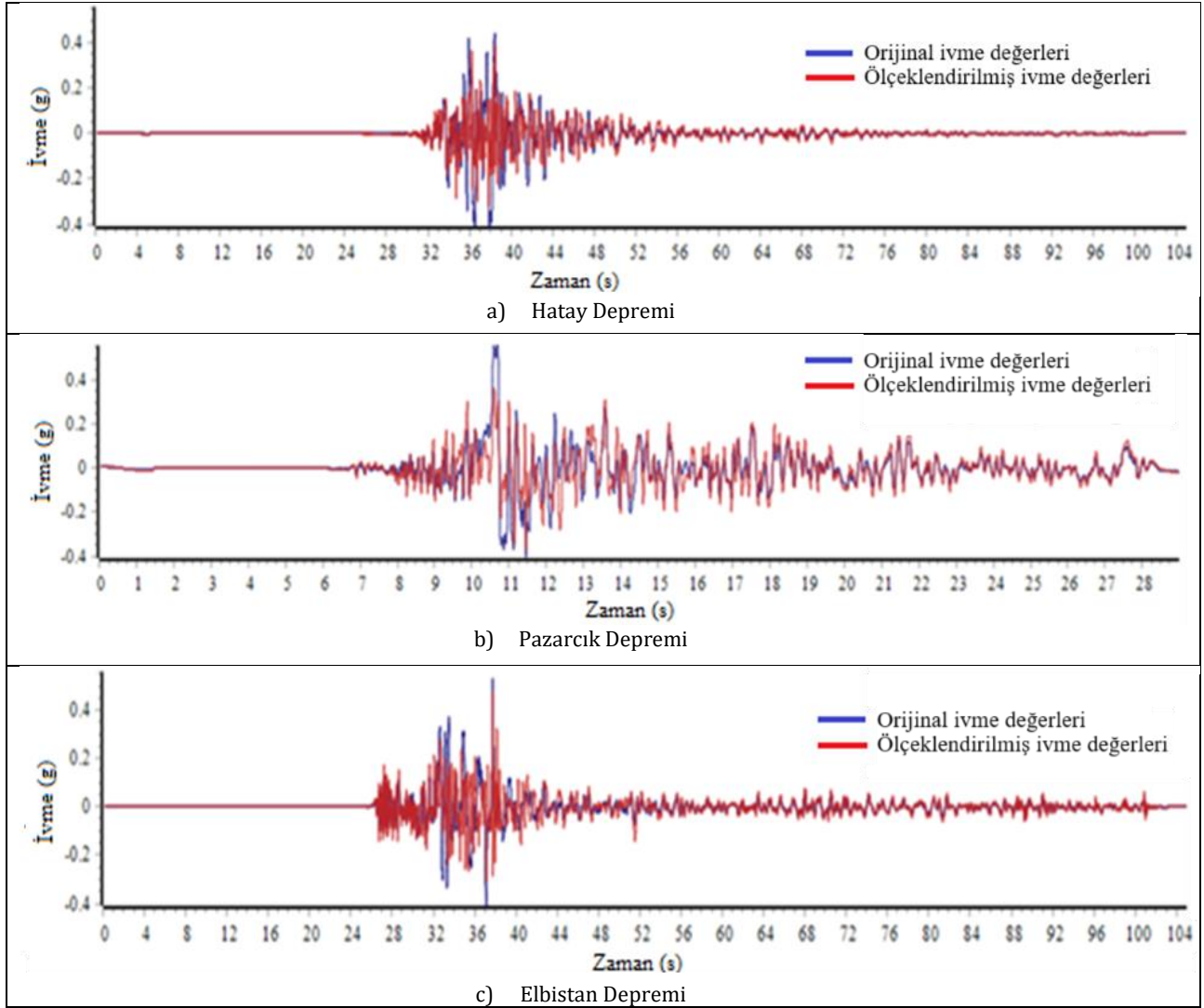
Onat vd. [42], 6 Şubat 2023 depremlerinden etkilenen tarihi Yusuf Paşa Camii'nin sismik davranışını incelemişlerdir. Yapı modeli üzerinde doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi gerçekleştirilerek yapıda bulunan çatlakların analiz sonuçlarıyla uyuştuğunu görmüşlerdir. Nasery [43], çalışmasında 6 Şubat 2023 depreminde hasar gören Harran Ulu Camii giriş kapısındaki yapısal hasarın nedenlerini araştırmıştır. Yapının sonlu eleman modelini oluşturarak statik ve doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda depremin giriş kemerlerine düzlem dışından çarparak çökmeye neden olduğu yorumunu yapmıştır. Demir vd. [44], çalışmalarının bir bölümünde Kahramanmaraş depreminde hasar gören yığma yapıları incelemişler; harç kalitesinin düşük olması, yapı elemanı zayıflıkları, zayıf çekme bağlantıları, zayıf zemin diyaframları ve uyumsuzluk nedeniyle hasarların kesme kırıkları, düzlem dışı hareketler ve devrilme şeklinde meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Depremlerin ivme kayıtlarına Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sisteminden (TADAS) ulaşılmıştır [45]. Analiz için kullanılan depremler hakkında bilgi Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Deprem bilgileri

Deprem	İstasyon	Büyüklik
6 Şubat 2023 Pazarcık	Pazarcık	7.7 (Mw)
6 Şubat 2023 Elbistan	Nurhak	7.6 (Mw)
20 Şubat 2023 Hatay	Yayladağı	6.4 (Mw)

Seismomatch [46] programı ile depremlerin ivme zaman grafiği minarenin bulunduğu bölgenin depremselliğine göre ölçeklendirilmiştir. Yatay elastik tasarım spektrumlarının orijinal halleri ile ölçeklendirilmiş durumları Şekil 5'te verilmiştir. Depremlerin orijinal ve ölçeklendirilmiş ivme zaman grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Tüm deprem yüklemeleri için Doğu-Batı bileşeni alınmıştır.

**Şekil 5.** Orijinal ve ölçeklendirilmiş yatay elastik tasarım spektrumu [46]**Şekil 6.** Depremlerin orijinal ve ölçeklendirilmiş ivme zaman grafikleri [46]

Tablo 5'te Pazarcık, Elbistan ve Hatay depremlerinin orijinal ve ölçeklendirilmiş ivme değerleri verilmiştir.

Tablo 5. Depremlerin orijinal ve ölçeklendirilmiş ivme değerleri [46]

	Pazarcık	Elbistan	Hatay
Orijinal ivme değerleri (g)	0.5672	0.5307	0.1708
Ölçeklendirilmiş ivme değerleri (g)	0.3699	0.4806	0.3748

Tablo 5 incelendiğinde ivme kayıtları üzerinde ölçeklendirme işlemi yapıldıktan sonra Pazarcık ve Elbistan depremlerinin PGA değerlerinde azalma, Hatay depreminin PGA değerinde ise önemli bir artış olduğu görülmektedir. Örneğin Pazarcık ve Elbistan depreminin Doğu-Batı bileşeninin PGA değeri ölçeklendirme işlemi yapıldıktan sonra sırasıyla %34.8 ve %9.44 oranında azalmıştır. Hatay depreminin PGA değeri ise %119.44 oranında artmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Türkiye'nin Isparta ilinde inşa edildiği düşünülen yığma bir minarenin SAP2000 V23.1.0 programında TBDY 2018 tasarım depremi dikkate alınmış ve minare yapısının modal analizi, tepki spektrumu analizi ve zaman tanım alanında doğrusal dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar yapı zemin etkileşimli tam model ve ankastre mesnetli model durumları için karşılaştırılmıştır. Yapı x ve y yönünde simetrik modellendiği için deprem yüklemeleri x yönü için yapılmıştır.

3.1. Modal analiz

SAP2000 V23.1.0 programında oluşturulan yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modeller üzerinde yapılan modal analiz sonucunda kütle ve rijitlik matrisleri ile minarenin periyotları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Modların süperpozisyonunu gerçekleştirmek için Karelerin Toplamının Karekökü (SRSS) yöntemi kullanılmıştır. Tablo 6'da etkin

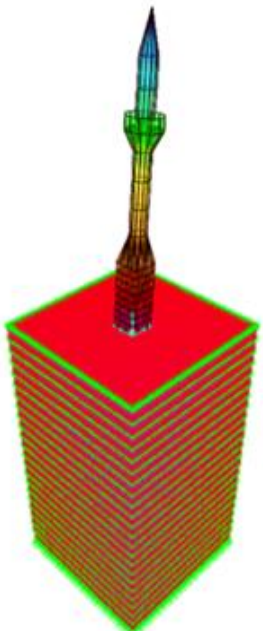
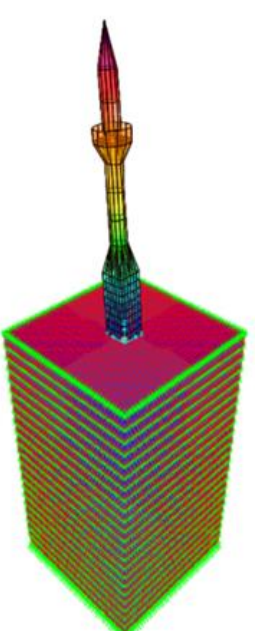
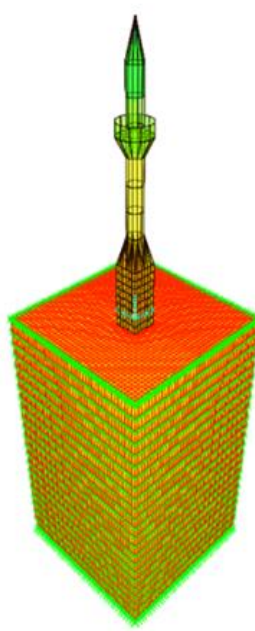
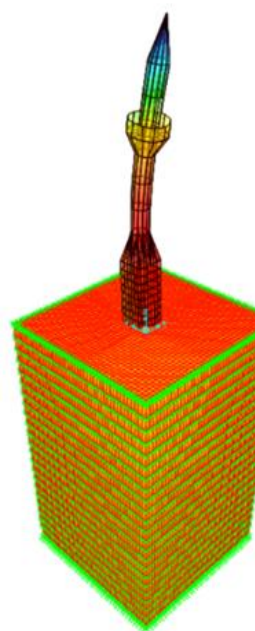

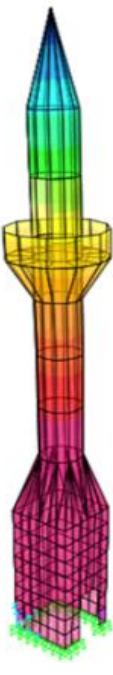
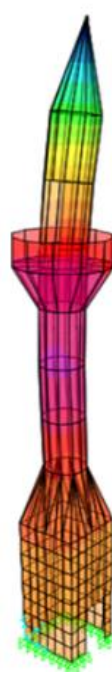

kütelerin toplamının bina toplam kütesine oranı verilmiştir. TBDY 2018'e göre, etkin kütlelerin toplamı, binanın toplam kütesinin %95'inden az olmamalıdır. Elde edilen 40 adet mod incelendiğinde 40. modda yapı zemin etkileşimli modelde etkin kütlelerin toplamının bina toplam kütesine oranı her iki yön için (x ve y) yaklaşık %52 gelmiştir. Ankastre mesnetli modelde ise bu değer 40. modda her iki yön için de yaklaşık %93 bulunmuştur. TBDY 2018 için yapı zemin etkileşimli model 40. Modda yetersiz kalırken ankastre mesnetli model %95 değerine çok yaklaşmıştır.

Tablo 6. Etkin kütlelerin toplamının bina toplam kütesine oranı

Yapı Zemin Etkileşimli Model			Ankastre Mesnetli Model		
Mod	Top.UX	Top.UY	Mod	Top.UX	Top.UY
40	0.524	0.523	40	0.931	0.929

Modal analiz sonucunda yapı zemin etkileşimli modelin 1. modunun periyodu 2.18 s iken ankastre mesnetli modelde periyot 0.54 s olarak elde edilmiştir. Yapı zemin etkileşimli modele göre ankastre mesnetli modelde periyot değerinin yaklaşık %75.3 azaldığı görülmüştür. Ankastre mesnetli modelde minare, zemine ankastre mesnetlendiği için zeminin tam rijit olduğu düşünülmüştür. Rijitlik ile periyot arasında ters orantı olduğu bilinmektedir. Yapı zemin etkileşimli modele göre ankastre mesnetli modelde rijitlik arttığı için periyot değeri azalmıştır. Daha önceki çalışmalarda benzer sonuçlara ulaşılmıştır [26] – [28]. Tablo 6'da her iki modelin de ilk 4 periyodu (s) ve mod şekilleri verilmiştir. Tablo 7'de görüldüğü üzere modellerin modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri karşılaştırıldığında ilk 2 mod şeklinin benzer olduğu görülmektedir. 3. ve 4. modlar karşılaştırıldığında farklı yönlerdeki eğilme modlarının hâkim olduğu görülmektedir. Ankastre modelde burulma modu 5. modda ortaya çıkarken yapı zemin etkileşimli modelde 7. modda burulma modu ortaya çıkmıştır.

Tablo 7. Yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modelin ilk 4 modunun periyot değerleri ile mod şekilleri

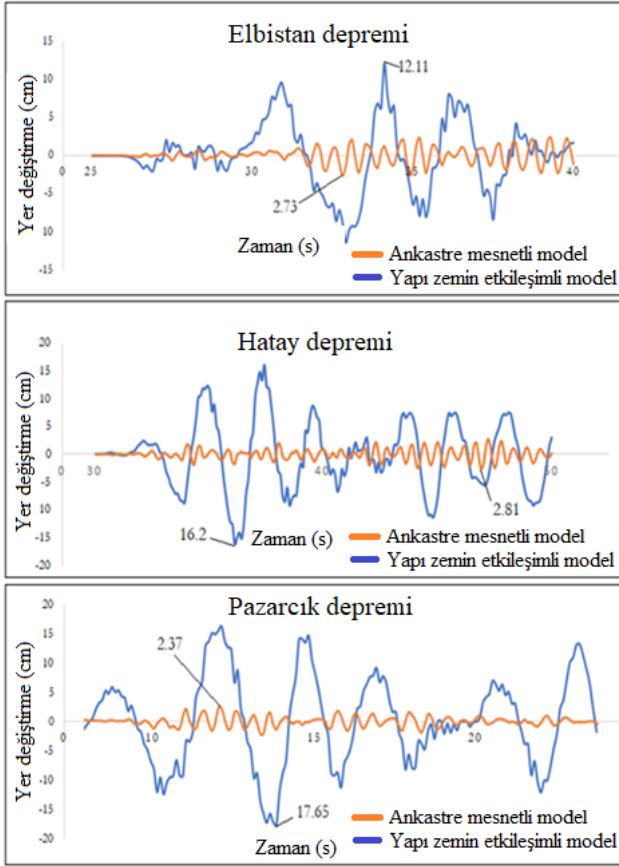
			
1. Mod T: 2.18 s	2. Mod T: 2.16 s	3. Mod T: 0.51 s	4. Mod T: 0.32 s
a) Yapı zemin etkileşimli model			
			
1. Mod T: 0.54 s	2. Mod T: 0.53 s	3. Mod T: 0.12 s	4. Mod T: 0.11 s
b) Ankastre mesnetli model			

3.2. Sismik analiz

3.2.1. En büyük rölatif yer değıştirme sonuçları

Modeller üzerinde yapılan zaman tanım alanında doğrusal analizler incelendiğinde en büyük rölatif yer değıştirme değeri her iki model için de minarenin tepe noktasında ve x yönünde oluştuğu görülmüştür. Sismik yükler sonucu yapının tepe

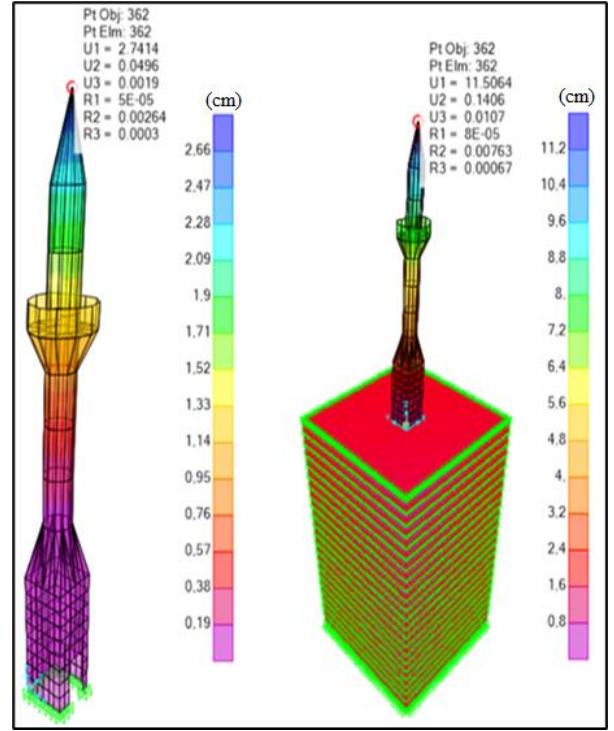
noktasında oluşan maksimum yer değıştirme değeri her iki model için de Şekil 7'de yer değıştirme zaman grafiği olarak verilmiştir. Ankastre mesnetli modelden elde edilen yer değıştirme değeri yapı zemin etkileşimli modelden elde edilen değeriyle karşılaştırıldığında Elbistan, Hatay ve Pazarcık depremleri için sırasıyla %77.46, %82.65 ve %86.57 oranında azalma meydana gelmiştir.



Şekil 7. Minarenin tepe noktasında elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği

Şekil 7 incelendiğinde her üç deprem yüklemesi için de yapı zemin etkileşimli modelde, ankastre mesnetli modele nazaran çok daha yüksek yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Bunun sebebi ankastre mesnetli minare modelinin, yapı zemin etkileşimini göz önünde bulunduran modele göre eğilme rijitliğinin çok daha yüksek olmasıdır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir [36].

Zaman tanım alanında yapılan analizlere benzer sonuçlar tepki spektrumu analizinden de elde edilmiştir. Yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modeller için tepki spektrumu analizinden elde edilen minarenin tepe noktasındaki maksimum yer değiştirme sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yapı zemin etkileşimli modelde 11.51 cm, ankastre mesnetli modelde 2.74 cm maksimum yer değiştirme meydana gelmiştir. Yapı zemin etkileşimli modele göre ankastre mesnetli modelde yaklaşık %76 oranında azalma meydana gelmiştir.

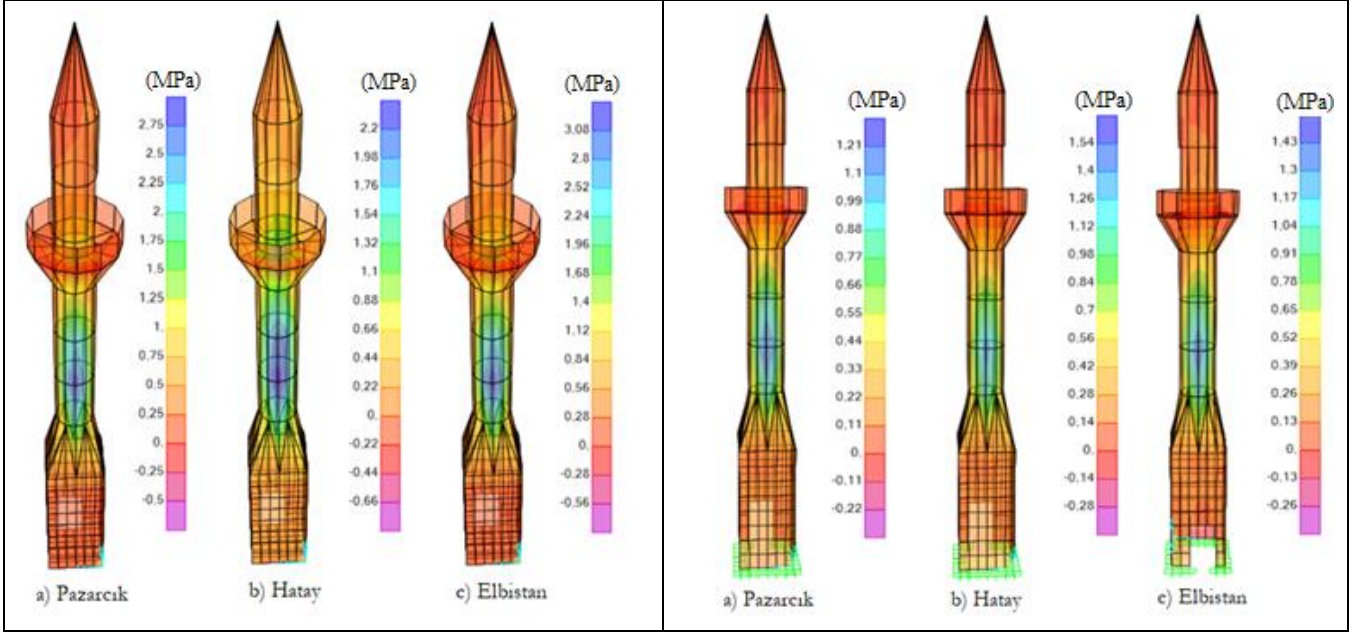


Şekil 8. Sırasıyla ankastre mesnetli ve yapı zemin etkileşimli modellerde minarenin tepesindeki maksimum yer değiştirme değerleri (tepki spektrum analizi)

3.2.2. Gerilme sonuçları

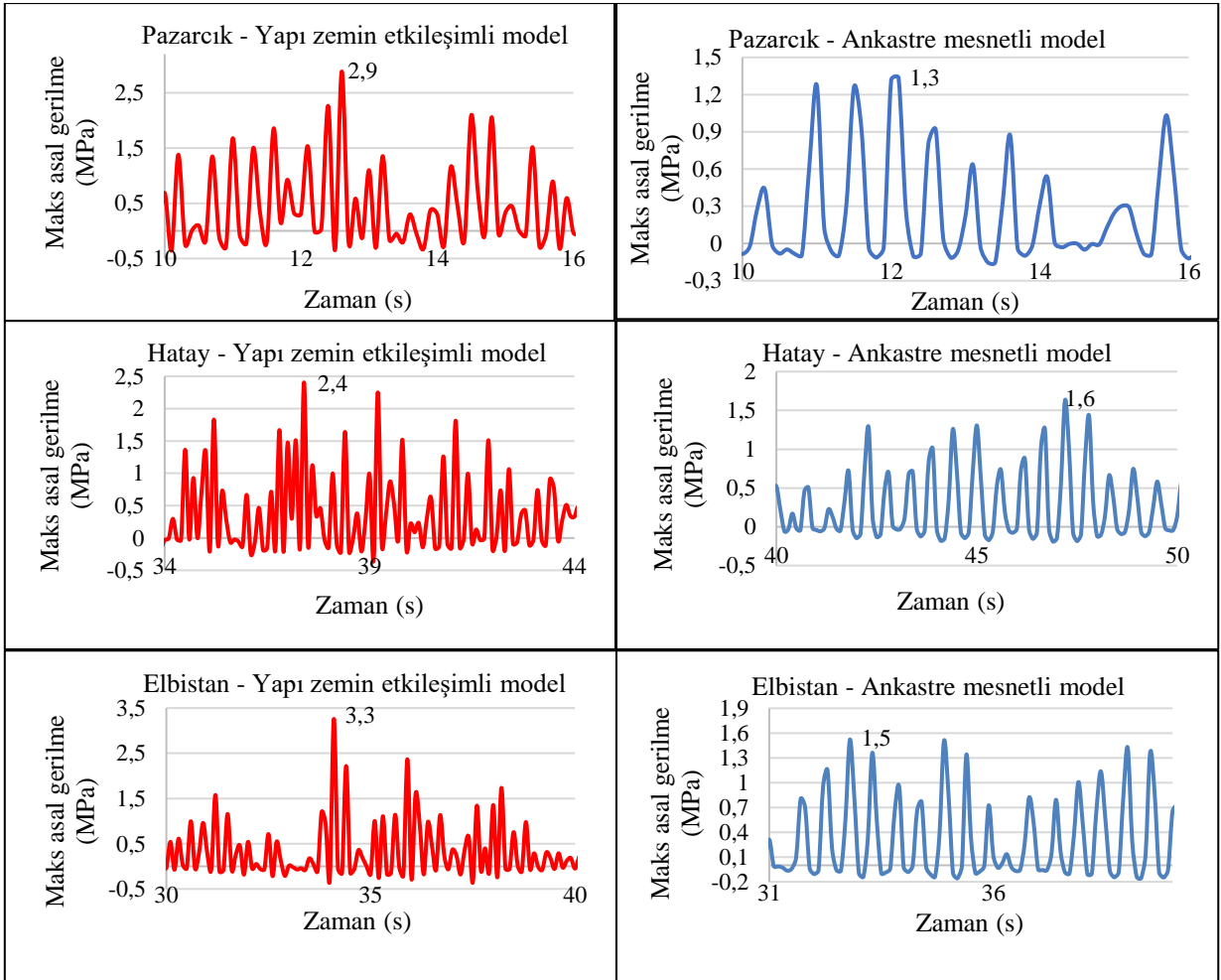
Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda her üç deprem için yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modellerin maksimum asal gerilme diyagramı Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde tüm depremler için yapı zemin etkileşimli modelde daha yüksek asal gerilmelerin olduğu görülmektedir. Analizler neticesinde, maksimum ve minimum asal gerilmeler her iki modelde de tüm depremler için, geçiş bölgesi ve minarenin orta bölgesinde yoğunlaşmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda benzer sonuçlara ulaşılmıştır [4, 6, 36 ve 47].

Şekil 10'da zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda tüm deprem yüklemeleri için yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modellere ait asal gerilme - zaman grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde sadece asal gerilmelerin en şiddetli olduğu zaman dilimleri ele alınmıştır. Ankastre mesnetli model yerine yapı zemin etkileşimli modele geçildiğinde Pazarcık, Hatay ve Elbistan depremleri için asal gerilmenin en büyük değeri sırasıyla 2.2, 1.5 ve 2.2 katına çıkmıştır.



a) Yapı zemin etkileşimli model b) Ankastre mesnetli model

Şekil 9. Maksimum asal gerilme diyagramı (MPa)



Şekil 10. Asal gerilme - zaman grafikleri

4. Sonuçlar

Çalışmada TBDY 2018' e uygun olarak Türkiye'nin Isparta ilinde inşa edildiği düşünülen tipik yığma bir minarenin modal analizi ile sismik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapının sonlu eleman modeli SAP2000 V23.1.0 programında yapılmıştır. Çalışmada yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli olmak üzere iki farklı model oluşturulmuştur. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar kısaca aşağıda verilmiştir.

- Modal analiz sonucunda yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modellemelerde ayrı ayrı 40 adet mod elde edilmiştir. Binanın etkin kütle toplamının bina toplam kütlelerine oranı yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modeller için her iki yönde de (x and y) sırasıyla yaklaşık %52 ve %93 gelmiştir.
- İlk modun periyot değerleri yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modeller için sırasıyla 2.18 ve 0.54 s bulunmuştur. Bu değerler karşılaştırıldığında yapı zemin etkileşimli modelden elde edilen periyot değeri 4.04 katına çıkmıştır.
- Sismik analizler sonucunda her iki modelde de en büyük rölatif yer değiştirme minarenin tepe noktasında meydana gelmiştir. Elbistan, Hatay ve Pazarcık depremleri için yapı zemin etkileşimli modele göre ankastre mesnetli modelden elde edilen yer değiştirme değerlerinde sırasıyla %77.46, %82.65 ve %86.57 azalma meydana gelmiştir.
- Yapı zemin etkileşimli model için en büyük rölatif yer değiştirme 17.65 cm ile Pazarcık depreminde, ankastre mesnetli model için 2.81 cm ile Hatay depreminde meydana gelmiştir.
- Tepki spektrumu analizinden elde edilen sonuçlarda yapı zemin etkileşimli modelde 11.51 cm, ankastre mesnetli modelde 2.74 cm maksimum yer değiştirme meydana gelmiştir.
- Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda yapı zemin etkileşimli modelde daha yüksek asal gerilme elde edilmiştir.
- Maksimum ve minimum asal gerilmeler minarenin geçiş bölgesinde ve orta bölgesinde yoğunlaştığı için olası bir depremde bu bölgelerde hasarın meydana gelmesi beklenmektedir. Bu sebeple bu bölgelerin güçlendirilmesi önerilmektedir.

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşiminin yığma bir minarenin sismik davranışına etkisi incelenmiş ve önemli bulgular elde edilmiştir. Ancak, gelecekteki çalışmalarda bu bulguların daha geniş kapsamlı ve farklı parametrelerle test edilmesi yararlı olacaktır. Özellikle, daha fazla sayıda yığma yapının farklı

zemin tipleri ve dinamik özellikler göz önüne alınarak modellenmesi, yapı zemin etkileşiminin yapısal davranışa etkisinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, doğrusal olmayan analiz yöntemleri ve farklı zemin koşulları kullanılarak daha karmaşık senaryoların araştırılması, bu tür yapıların sismik performansının daha hassas bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyabilir. Son olarak, deneysel çalışmaların sayısal analizlerle birleştirilmesi, bu tür yapıların gerçek davranışını daha doğru şekilde yansıtabilir.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Kilis Postası. 2023. Deprem Sonrası Şih Ahmet Camii Minaresi Yıkıldı. <https://www.kilispostasi.com/deprem-sonrasi-sih-ahmet-camii-minaresi-yikildi/1222421/> (Erişim Tarihi: 01.04.2023).
- [2] Yeni Asır. 2022. İzmir'de depremde yıkılan minare havadan görüntüledi. <https://www.yeniasir.com.tr/izmir/2022/11/04/izmirde-depremde-yikilan-minare-havadan-goruntulendi> (Erişim Tarihi: 01.04.2023).
- [3] Yurdakul, M., Yılmaz, F., Artar, M., Can, Ö., Öner, E., Daloğlu, A. T. 2021. Investigation Of Time-History Response Of A Historical Masonry Minaret Under Seismic Load. Structures, 30, 265-276.
- [4] Hökelekli, E., Demir, A., Ercan, E., Nohutçu, H., Karabulut, A. 2020. Seismic Assessment in A Historical Masonry Minaret by Linear and Non-Linear Seismic Analyses. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 64(2), 438-448.
- [5] Atmaca, B., Ertürk Atmaca, E., Roudane, B., Güleş, O., Demirkaya, E., Aykanat, B., Altunişik, A. C., Günaydin, M., Arslan, M. E., Kahya, V., Tatar, T. Aslan, B., Sezdirmez, T., Sunca, F., Okur, F. Y., Adanur, S., Saribiyik, A., Aydın, F., Genç, A. F., Kirtel, O., Demir, A., Öztürk, H., Dok, G., Emiroğlu, M., Akgül, T. 2024. Field Observations and Numerical Investigations on Seismic Damage Assessment of RC and Masonry Minarets During the February 6th, 2023, Kahramanmaraş (Mw 7.7 Pazarcık and Mw 7.6 Elbistan) Earthquakes in Türkiye. International Journal of Architectural Heritage, 1-26.

- [6] Nohutcu, H. 2019. Seismic Failure Pattern Prediction in a Historical Masonry Minaret Under Different Earthquakes. *Advances in Civil Engineering*, 1-16.
- [7] Yetkin, M., Dedeoğlu, İ. Ö., & Calayır, Y. 2021. Ocak 2020 Sivrice Depremi Sonrasında Elazığ İlinde Bulunan Minarelerde Meydana Gelen Hasarların Araştırılması ve Değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33 (2), 379-389.
- [8] Eronat, Ş. S. (2022). Yığma Minarelerin Dinamik Analizi (Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [9] Işık, E., Avcil, F., Harirchian, E., Arkan, E., Bilgin, H., Özmen, H. B. 2022. Architectural Characteristics and Seismic Vulnerability Assessment of a Historical Masonry Minaret under Different Seismic Risks and Probabilities of Exceedance. *Buildings*, 12(8), 1200.
- [10] Maraş, M. M., Özmen, A., Sayın, E., Ayaz, Y. 2022. Seismic Assessment of The Historical Sütlu Minaret Mosque". *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(2), 445-459.
- [11] Trešnjo, F., Humo, M., Casarin, F., Ademović, N. 2023. Experimental Investigations and Seismic Assessment of a Historical Stone Minaret in Mostar. *Buildings*, 13(2), 536.
- [12] Türker, T., Demirtaş, B., Ural, A., Kömür, M. A. 2022. Seismic Behavior of Historical Inclined Minarets under Near and Far Fault Ground Motions. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(11), 5866-5880.
- [13] Işık, E., Ademović, N., Harirchian, E., Avcil, F., Büyüksaraç, A., Hadzima-Nyarko, M., Bülbül, M. F., Işık, F. M., Antep, B. 2023. Determination of Natural Fundamental Period of Minarets by Using Artificial Neural Network and Assess the Impact of Different Materials on Their Seismic Vulnerability. *Applied Sciences*, 13(2), 809.
- [14] Şentürk, İ., Ergün, M., Artar, M. 2022. Seismic Behavior Assessment of Historical Alaeddin Bey Mosque and Strengthening Suggestions by CFRP Fabric and Steel Plate. *Engineering Failure Analysis*, 137, 106242.
- [15] Işık, E., Harirchian, E., Arkan, E., Avcil, F., Günay, M. 2022. Structural Analysis of Five Historical Minarets in Bitlis (Turkey). *Buildings*, 12(2), 159.
- [16] Genç A. F., Altunışık, A. C., Günaydın, M., Okur, F. Y. 2022. Finite Element Model Updating of İskenderpaşa Mosque and Minaret Based on Experimental Measurements. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 5(4), 264-276.
- [17] Alemi, B., Kamali Zarchi, S., Assadi Chimeh, N. 2022. The Earliest Architectural Remains of the Islamic Era in Kashan: Form, Structure, and Construction Technique of the Minaret of the Jameâ Mosque. *Journal of Iranian Architecture Studies*, 8(15), 5-25.
- [18] Adam, M. A., El-Salakawy, T. S., Salama, M. A., Mohamed, A. A. 2020. Assessment of Structural Condition of a Historic Masonry Minaret in Egypt. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00409.
- [19] Hoseynzadeh, H., Mortezaei, A. 2021. Seismic Vulnerability and Rehabilitation of One of The World's Oldest Masonry Minaret under The Different Earthquake Frequency Contents. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 9(4), 12-36.
- [20] Kılıç, İ., Bozdoğan, K. B., Aydın, S., Gök, S. G., vd. (2020). Kule Tipi Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii Minaresi. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 19-26.
- [21] Casolo, S., Uva, G. 2013. Non-linear dynamic analysis of masonry towers under natural accelerograms accounting for soil-structure interaction. *ECCOMAS Thematic Conference-COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Proceedings- An IACM Special Interest Conference*, 12-14 June, Greece, 4488-4506.
- [22] Sanal Şantiye. 2017. Yapı zemin etkileşimi. <https://www.sanalsantiye.com/yapi-zemin-etkileşimi/> (Erişim Tarihi: 01.04.2023).
- [23] Korkmaz, K. A., Demir, F. 2012. Yapı-Zemin Etkileşiminin Yapıların Deprem Davranışına Etkileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 12-17.
- [24] Girgin, S. C., Mısır, S., Özden, G., Kahraman, S. 2008. Yapı-Zemin Etkileşiminin Yapısal Tasarımdaki Rolü. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 10(1), 27-37.

- [25] Baş, S. 2019. Estimation of Seismic Response of R/C Frame Structures to Vertical Earthquake Motion Considering Fixed Support and Soil-Structure-Interaction (SSI). *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 7-17.
- [26] Lazizi, A. H., Tahghighi, H. 2023. Influence of Soil-Structure Interaction on Seismic Demands of Historic Masonry Structure of Kashan Grand Bazaar. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(1), 151-176.
- [27] Hökelekli, E., Al-Helwani, A. 2020. Effect of Soil Properties on the Seismic Damage Assessment of Historical Masonry Minaret-Soil Interaction Systems. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 29(2), e1694.
- [28] Fathi, A., Sadeghi, A., Emami Azadi, M. R., Hoveidae, N. 2020. Assessing the Soil-Structure Interaction Effects by Direct Method on the out-of-plane Behavior of Masonry Structures (Case Study: Arge-Tabriz). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 6429-6443.
- [29] Karki, P., Pyakurel, S., Utkarsh, K. 2023. Seismic Performance Evaluation of Masonry Infill RC Frame Considering Soil-Structure Interaction. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1), 5.
- [30] Yıldız, Ö., Doğan, E. 2022. Soil-Structure Interaction Analysis of Çelebiağa Mosque, Pertek-Türkiye. *Journal of Construction*, 21(3), 749-766.
- [31] Cacciola, P., Caliò, I., Fiorini, N., Occhipinti, G., Spina, D., & Tombari, A. (2022). Seismic response of nonlinear soil-structure interaction systems through the Preisach formalism: the Messina Bell Tower case study. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-30.
- [32] Shabani, A., Feyzabadi, M., & Kioumars, M. (2022). Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: The role of soil-structure interaction. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00957.
- [33] SAP2000 V23.1.0 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual.
- [34] Işık, E., Antep, B. 2018. Ahlat İlçesinde Yer Alan Tarihi Yığma Minarenin Yapısal Analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 46-56.
- [35] Mutman, U. 2001. Seçilen bir arazide dinamik kompaksiyon uygulaması ve SAP90 programı ile modellenmesi. *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi*, 180s, Kocaeli.
- [36] Hökelekli, E. 2020. Yapı-Zemin Etkileşiminin Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Davranışına Etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(2), 825-838.
- [37] TBDY 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı-Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [38] AFAD. 2023. Turkey Earthquake Hazard Maps Interactive Web Application. <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml> (Erişim Tarihi: 02.03.2023).
- [39] Erkek, H., & Yetkin, M. (2023, December). Assessment of the performance of a historic minaret during the Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). *Structures*, 58, 105620, Elsevier.
- [40] Nasery, M. M. (2023). Post-earthquake damage assessment of inaccessible areas in the Harran grand mosque (Ulu Mosque) minaret using digital twin modelling. *Proceedings of 3rd International Civil Engineering and Architecture Congress (ICEARC'23)*
- [41] Ersoy, S. (2023). Evaluation of the cultural heritage buildings in an ancient district of Antakya after the Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6).
- [42] Onat, O., Deniz, F., Özmen, A., Özdemir, E., & Sayın, E. (2023, December). Performance Evaluation and Damage Assessment of Historical Yusuf Ziya Pasha Mosque After February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes. *Structures (Vol. 58, p. 105415)*. Elsevier.
- [43] Nasery, M. M. (2023). Investigating of the Reasons for the Collapse on the Entrance Arches of the Harran Grand Mosque (Ulu Cami) During the Kahramanmaraş Earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). *Civil Engineering Beyond Limits*
- [44] Demir, A., Celebi, E., Ozturk, H., Ozcan, Z., Ozocak, A., Bol, E., Sert, S., Sahin, F., Z., Arslan, E., Yaman, Z., D., Utkucu, M., & Mert, N. (2024). Destructive impact of successive high magnitude earthquakes occurred in Türkiye's Kahramanmaraş on February 6, 2023. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-27.

- [45] AFAD. 2023. Earthquake. <https://tadas.afad.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 02.03.2023).
- [46] Seismomatch. 2019. Seismosoft Earthquake Engineering Software Solutions, Eshop Designed & Developed by Pontemedia.
- [47] Altıok, T., Demir, A. 2021. Collapse Mechanism Estimation of a Historical Masonry Minaret Considered Soil-Structure Interaction. *Earthquakes and Structures*, 21(2), 161-72.

Potansiyometrik Tiyosiyanat Tayini için Hazırlanan Yeni Bir Katı-Temaslı Nanokompozit Elektrot

Ummahan AKTAŞ¹, Ayça DEMİREL ÖZEL², Sezen İrem ASLANER³, Serap TİRETİR DURAN⁴

^{1,4}İnönü Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 44280, Malatya
^{2,3}Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, 06100, Ankara

(Alınış / Received: 28.05.2024, Kabul / Accepted: 16.09.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Anyon-seçici elektrot,
Tiyosiyanat,
Katı-temaslı elektrot,
Metal oksit nanopartikülleri,
Potansiyometri,
Karbon pasta elektrot

Öz: Bu çalışmada, iyonofor olan diklorobis(metildifenilfosfin)paladyum(II) kompleksinin kullanıldığı yeni bir tiyosiyanat-seçici katı-temaslı nanokompozit elektrot hazırlandı. Bazı metal oksit nanopartiküllerinin karbon pasta bileşimine eklenmesiyle hazırlanan bu elektrodun en iyi performans özelliklerinin sergilendiği optimum bileşim % 11,6 grafit tozu, % 34,8 iyonofor, % 13,0 *o*-nitrofenil oktiler (*o*-NPOE), % 31,9 tetraheptilamonyum tetrafenilborat (THATFB) ve % 8,7 kobalt oksit nanopartikülleri (Co₃O₄ NP) olarak bulundu. Nanokompozit elektrodun çalışma aralığı, eğimi, kullanım ömrü, alt tayin sınırı ve cevap süresi sırasıyla $1,0 \times 10^{-1}$ - $1,0 \times 10^{-6}$ moldm⁻³, 59,7±0,6 mV/pSCN, en az 2 ay, $1,4 \times 10^{-8}$ moldm⁻³, 5 s'dir. Ayrıca, farklı anyonların varlığında pH 4,0'da ayrı çözelti yöntemiyle hesaplanan seçicilik katsayılarının sırası karbonat> salisilat> perklorat> iyodür> klorür> nitrat> nitrit> sülfid> bromür> asetat> florür olarak bulundu. Tiyosiyanat tayini için iyi çalışan bir indikatör elektrot olduğu bir veteriner ilaç numunesinde gösterildi.

A Novel Solid-Contact Nanocomposite Electrode Prepared For Potentiometric Determination Of Thiocyanate

Keywords

Anion-selective electrode,
Thiocyanate,
Solid-contact electrode,
Metal oxide nanoparticles
Potentiometry
Carbon paste electrode

Abstract: In this study, a new thiocyanate-selective solid-contact nanocomposite electrode was prepared by using dichlorobis(methyldiphenylphosphine) palladium(II) complex as ionophore. The optimum composition exhibiting the best performance characteristics of this electrode, constructed by adding some metal oxide nanoparticles to the carbon paste composition, was found as 11.6 % graphite powder, 34.8 % ionophore, 13.0 % *o*-nitrophenyl octylether (*o*-NPOE), 31.9 % tetraheptylammonium tetraphenylborate (THATFB) and 8.7 % cobalt oxide nanoparticles (Co₃O₄ NP). The linear range, the slope, the lifetime, the detection limit, and the response time of the nanocomposite electrode are 1.0×10^{-1} - 1.0×10^{-6} moldm⁻³, 59.7±0.6 mV/pSCN, at least 2 months, 1.4×10^{-8} moldm⁻³ and 5 s, respectively. Furthermore, the order of the selectivity coefficients calculated by the separate solution method in the presence of other anions at pH 4.0 was found as carbonate> salicylate> perchlorate> iodide> chloride> nitrate> nitrite> sulfite> bromide> acetate> fluoride. It was shown to be a well-functioning indicator electrode for the quantification of thiocyanate in a veterinary drug sample.

1. Giriş

Bir analitin matriks ortamında tayini için kullanılan analitik yöntemlerin çoğu karmaşık ve pahalıdır. Ayrıca, bu yöntemler uygulanması zor numune hazırlama adımları ve uzmanlık gerektirirler. Ancak, potansiyometrik iyon-seçici elektrotlar (İSE'ler),

basitlik, düşük maliyet, hızlı yanıt, geniş bir aralıkta yüksek hassasiyet, tekrarlanabilirlik ve dayanıklılık sağladıkları için çok daha faydalıdır. Herhangi bir hedef iyonun aktivitesinin, elektrik potansiyeli sinyaline dönüştürülerek, yüksek doğrulukla ölçülebilmesi büyük önem taşıdığından, elektrokimyasal iyon sensörleri olarak da bilinen,

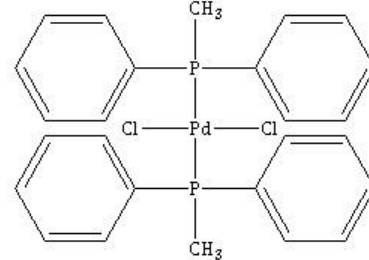
çeşitli İSE'lerin geliştirilmesi ve bunların hem kationların hem de anyonların klinik, kimyasal, tarımsal, tıbbi ilaç ve çevresel analizlerde kantitatif tayini üzerine çalışmalar 1960'ların sonunda başlamıştır [1]. Farklı anyonların tayini için, iyon kromatografisi [2,3], spektrofotometrik yöntemler [4,5,6], elektrokimyasal analiz [7-9] ve gaz kromatografisi [10, 11] gibi çeşitli enstrümantal teknikler kullanılmaktadır. Ancak, literatürde potansiyometrik anyon-seçici elektrotlarla ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır [12]. İSE'lerde en önemli faktör duyarlılığı sağlayan elektrot yüzeyinin geliştirilmesidir. Bu nedenle farklı yüzey bileşenlerine sahip, yeni potansiyometrik anyon-seçici elektrotların yapımı büyük ilgi görmüştür [13-15]. PVC membran elektrotlarda iç dolgu çözeltisinin buharlaşması ve membranın yırtılması kullanım ömrünün kısalmasına neden olduğundan, kaplanmış tel elektrotlar, PVC membran kaplı substrat esaslı elektrotlar ve karbon pasta elektrotlar (KPE) gibi iç dolgu çözeltisi içermeyen elektrotların geliştirilmesi önem kazanmıştır [16]. Bunlar arasında KPE'ler hazırlama kolaylığı, düşük ohmik direnç, düşük maliyet, tekrarlanabilirlik ve yenilenebilir yüzey nedeniyle daha avantajlıdır [17-19]. KPE'ler temelde grafit tozu, iyonofor, lipofilik katkı maddesi, bağlayıcı olarak parafin yağı ve/veya plastikleştiricileri içerirler [20, 21]. Son yıllarda yüksek reaksiyon ve katalitik aktiviteleri, üstün yüzey-hacim oranı ve yüksek adsorpsiyon kapasitesi özelliklerinden dolayı, çok duvarlı karbon tüpler (MWCNT'ler) [22-25], metal oksit nanopartiküller (MONP'ler) [26-30], nanoçubuklar ve nanoteller [31-33] gibi nanomalzemelerle modifiye edilmiş KPE'lerin üretilmesine büyük önem verilmiştir. Bununla birlikte, kation-seçici olanlara kıyasla nanomateryal bazlı anyon-seçici KPE'ler hakkında çok daha az çalışma mevcuttur.

Tiyosiyanat, boyama, madencilik, elektrokaplama ve tiyoüre, akrilik elyaf ve pestisit üretimi gibi bir dizi endüstriyel işlemden ve ayrıca insanlarda tiroid bozukluklarının tedavisindeki ilaçların üretiminde kullanılır. Ancak vücut sıvılarında tiyosiyanatın yüksek derişimi hipotiroidizm, gastrointestinal irritasyon, ülserasyon, akut böbrek yetmezliği, hemolitik anemi ve konjenital guatr gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açar [34, 35]. Sigara içenleri sigara içmeyenlerden ayırmak için tükürükte bir belirteç görevi gören tiyosiyanat [36, 37], insan sağlığı için geliştirilen ilaçların yanısıra, özellikle tavuk ve hindi gibi kümes hayvanlarının, bazı hastalıklarının tedavi edilmesi ve önlenmesi için geliştirilen bazı veteriner ilaçlarında da kullanılır [38-42]. Bu nedenlerle, tiyosiyanatın basit ve hızlı bir yöntemle belirlenmesi önemlidir [43].

İSE'lerin geliştirilmesinde iyonik tanımadan sorumlu olan iyonoforlar, kation veya anyon seçici elektrotlar için en temel yüzey bileşenleridir [44]. İyonoforların, çözeltideki diğer iyonlarla daha zayıf etkileşime girerken, analit iyonlarıyla güçlü bir

şekilde etkileşim yeteneğine sahip olmaları gerekir [45, 46].

Tiyosiyanatın potansiyometrik tayini için geliştirilen KPE ve PVC membran elektrotlarda, iyonofor olarak, çeşitli metal kompleksleri [45, 47-53], imidopiridin türevi [54], taç eter- setil trimetil amonyum tiyosiyanat iyon çifti [55], kaliks[4]aren türevi [56] ve Schiff bazı kompleksleri [57] kullanılmıştır. Konuyla ilgili literatür incelendiğinde, bildiğimiz kadarıyla potansiyometrik olarak tiyosiyanat-seçici KPE'ye neredeyse hiç rastlanmamakla birlikte diğer anyonlar için seçici elektrot tiplerinin ve PVC membranlı tiyosiyanat-seçici elektrotların daha fazla olduğu görülmektedir [47-60]. Daha önceki çalışmamızda belirtildiği gibi, karbon pasta bileşimine nanomateryaller katılarak hazırlanan potansiyometrik anyon-seçici elektrotlar da halen çok az olup tiyosiyanat duyarlı olana rastlanmaması araştırma konusu olarak ilgi çekmektedir [20]. İyonofor olarak paladyum (II) kompleksinin (Şekil 1) anyon-seçici elektrot yapımında ilk kez kullanılıyor olması ve en duyarlı olduğu türün tiyosiyanat olması çalışmaya özgün değer katmaktadır. Bu nedenlerle, nanomateryaller ile modifiye edilmiş yeni tiyosiyanat-seçici nanokompozit elektrot geliştirilmesiyle ilgili bu çalışmanın literatüre değerli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 1. Bu çalışmada kullanılan iyonoforun kimyasal yapısı

2. Materyal ve Metot

2.1.1. Kullanılan cihazlar ve donanım

Potansiyel ölçümlerinde Thermo Orion 720 A Model pH-iyon metre, çift temaslı Ag/AgCl referans elektrot ve indikatör elektrot olarak da önerilen tiyosiyanat-seçici katı-temaslı nanokompozit elektrottan yararlanıldı. pH ölçümleri için Thermo Orion 812600 model kombine cam elektrodu kullanıldı. KPE gövdesi Bioanalytical Systems, Inc.'den (BASi MF-2010) temin edildi. Tüm çözeltiler ELGA Purelab Classic Ultra Saf Su (İngiltere) cihazından 18,2 MΩ iletkenliğe sahip deiyonize saf su ile hazırlandı. Empedans ve kronopotansiyometrik ölçümler, CHi 660D Analiz sistemi ile birleştirilmiş BASi C3 hücre standı kullanılarak gerçekleştirildi. Bu ölçümlerde; referans elektrot (Ag/AgCl, 0,1 moldm⁻³ NaCl), karşıt elektrot (Pt tel BASi MW-1032) ve nanomateryalle modifiye

edilmiş tiyosiyanat-seçici karbon pasta indikatör elektrodundan oluşan üçlü elektrot sistemi kullanıldı. Potansiyometrik titrasyonlarda Orion 940 model otomatik titratörden yararlanıldı.

2.2. Kullanılan kimyasallar ve çözeltilerin hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan diklorobis(metildifenilfosfin) palladium(II) kompleksi, selektör safılıkta olan plastikleştiriciler; bis(2-etilhekzil) sebakat, (BEHS), bis(2-etilhekzil) adipat (BEHA), bis(2-etilhekzil) ftalat (BEHF), 2-nitrofenil oktiler(o-NPOE), lipofilik katkı maddeleri olan tetrafenilfosfonyum tetrafenilborat (TFFTFB), tetrabutilamonyum tetrafenilborat (TBATFB), tetraheptilamonyum tetrafenilborat (THATFB), metaloksit nanopartikülleri ve çözeltilerin hazırlanmasında kullanılan tüm kimyasallar Sigma-Aldrich'ten temin edildi. Anyon çözeltilerinin pH'ları asetik asit/asetat, MES (4-morfolinetansülfonik asit) ve TRİS (tris(hidroksimetil) aminometan) tampon çözeltileri ile ayarlandı. Ayrıca, elektrot cevabının pH'dan etkilenmediği aralığın belirlenmesi için bir litrelik Britton-Robinson (BR) tamponundan yararlanıldı. 2,30 mL asetik asit, 2,70 mL fosforik asit ve 2,47 g borik asidin deiyonize suda çözülmesiyle hazırlanan pH'sı yaklaşık 2,0 olan bu tampon çözeltisinden alınan uygun miktarlara seyreltik NaOH ilavesiyle pH'ları 2-11 aralığında değişen bir seri çözelti hazırlandı.

2.3. Nanomateryalle modifiye edilmiş tiyosiyanat-seçici elektrot hazırlanması

Bu çalışmada nanomateryalle modifiye edilmiş katı-temaslı tiyosiyanat-seçici nanokompozit elektrotları hazırlamak için KPE gövdesi kullanıldı. Optimizasyonu yapılmış farklı oranlarda iyonofor, plastikleştirici, grafit tozu, lipofilik katkı maddesine ilave olarak üç farklı miktarda (1,0; 3,0 ve 5,0 mg) nanopartikül eklenmesiyle oluşan karışım bir spatül yardımıyla 30-40 dakika karıştırılarak ve üzerine belli miktarda THF ilave edilerek homojen bir pasta hazırlandı. Oluşan kompozit karışım, katı-temaslı KPE gövdesinin boşluğuna dolduruldu. Elektrot yüzeyinin, yağlı bir kâğıt üzerinde dairesel hareketler yapılarak pürüzsüz olması sağlandı.

2.4. Çalışma koşullarının belirlenmesi

Tüm analizler, 22,0±2.0 °C'de Ag/AgCl Referans Elektrot || analit çözeltisi | KPE hücre düzeneğiyle gerçekleştirildi.

Hazırlanan tiyosiyanat-seçici karbon pasta elektroda şartlandırma koşullarının etkisi, saf su, 1,0×10⁻³, 1,0×10⁻⁴ ve 1,0×10⁻⁵ moldm⁻³ NaSCN çözeltilerinde bir saat bekletildikten sonra yapılan potansiyel ölçümleriyle incelendi. Şartlandırma süresinin etkisini incelemek için elektrotlar, farklı sürelerle (30, 45 ve 60 dakika) 1,0×10⁻⁴ moldm⁻³ NaSCN çözeltisi

içerisinde tutuldu. Elde edilen eğim, doğrusal çalışma aralığı (DÇA) ve R² değerlerine bakılarak en uygun şartlandırma süresi ve çözeltisi belirlendi.

2.5. Yüzey morfolojisinin incelenmesi ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi

Analit ile KPE yüzey arasındaki etkileşimi desteklemek için, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) kullanıldı. İyonoforun tiyosiyanat duyarlılığı ve nanopartikül varlığının elektrot performansı üzerindeki etkisi; 0,1 moldm⁻³ NaCl lü, pH' ları 4 olan derişimleri farklı tiyosiyanat içerikli (1,0×10⁻¹; 1,0×10⁻²; 1,0×10⁻³; 1,0×10⁻⁴; 1,0×10⁻⁵ moldm⁻³) çözeltilerden elde edilen Nyquist grafikleri incelenerek değerlendirildi. Bu grafikler 1,0×10⁻¹-1,0×10⁻⁶ Hz frekans aralığında 0,005 V genlikli 0,2 V açık devre potansiyeli kullanılarak elde edildi.

Yüzey görüntüleme çalışmaları için taramalı elektron mikroskopisi ve enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi (EDX), LEO-EVO 40 SEM marka ve model cihazıyla 10⁻⁵ mb vakum, 20kV hızlandırma voltajında taramalı elektron dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.6. Hazırlanan elektrodun performans özelliklerinin belirlenmesi

Nanopartikülle modifiye edilmiş optimum karbon pasta elektrodun DÇA, eğimi ve gözlenebilme sınırı, hazırlanan 1,0×10⁻⁸-1,0×10⁻¹ moldm⁻³ derişim aralığındaki analit çözeltilerinde pH-iyon metreden ölçülen potansiyel değerlerinin (*E*, mV) -log*C*_{SCN⁻}' ye karşı grafiğe geçirilmesiyle belirlendi.

Elektrodun cevap süresi kronopotansiyometrik yöntemle belirlenirken *E*-*t* grafikleri çizilemek için 0,1 moldm⁻³ NaCl'lü ortamda pH 4,0 tampon çözeltisine analit derişiminde on katlık değişim sağlayan ilaveler yapıldı. Nanokompozit elektrotlar bu çözeltilere düşük derişimden yüksek derişim doğru daldırılarak kararlı potansiyel değerleri kaydedildi. Bu değerlere ulaşma sürelerinin ortalamaları cevap süresi kabul edildi. Elektrodun ömrünü belirlemek amacıyla, kalibrasyon eğrileri günde en az 3 kez potansiyel değerler ölçülerek çizildi. Günlük kalibrasyon eğrilerinden elde edilen ortalama eğimlerin zamana karşı grafiği çizildi. Hazırlanan katı-temaslı nanokompozit elektrodun ömrü, eğiminde belirgin bir değişiklik gözlenene kadar geçen süre olarak kaydedildi.

Referans elektrot ve hazırlanan elektrot ile oluşan hücrede, her seferinde farklı anyonlara ait kalibrasyon serisine daldırılarak kaydedilen potansiyel değerleri, önceki çalışmalarımızda belirtildiği gibi ayrı çözelti yöntemiyle seçicilik katsayılarının hesaplanmasında kullanıldı [15, 21].

Tekrarlanabilirlik için hazırlanan elektrodun beşer kez art arda kalibrasyon eğrileri çizilip eğimleri belirlendi. Optimum bileşimde hazırlanan beş adet nanokompozit elektrodun her biri için de beşer kez art arda kalibrasyon eğrileri çizilerek eğimleri yeniden üretilebilirlik için kaydedildi. Her iki durum için de eğimlerdeki bağıl standart sapmanın < %5 olduğu kontrol edildi.

2.7. Numune hazırlama ve analitik uygulama

Analitik numune uygulaması için bir veteriner ilacından eritromisin tiyosiyanat içeren stok çözelti hazırlandı. İlacın 1,0 gramında 350 mg eritromisin baza eşdeğer eritromisin tiyosiyanat olduğu beyan edilmektedir. Bu amaçla, tartılan 1,0 g ilacın 50,0 mL etil alkolde yaklaşık üç saat ultrasonik banyoda bekletilerek tamamen çözünmesi sağlandı. Balon jode deiyonize su ilave edilerek toplam hacmi 100,0 mL'ye tamamlandı ve tekrar bir saat karıştırıldı. Bu stok çözeltiden uygun miktarlarda alınarak pH' ları 4,0'e ayarlandı ve analiz çözeltileri olarak kullanıldı.

Elektrodun analitik uygulaması indikatör elektrot olarak kullanıldığı iki farklı titrasyon ile gösterildi. Bu titrasyonların ilkinde, $2,0 \times 10^{-2}$ moldm⁻³ standart AgNO₃ çözeltisi ile $1,0 \times 10^{-3}$ moldm⁻³ 50,0 mL' lik NaSCN çözeltileri titre edilerek dönüm noktalarından sarfedilen AgNO₃ hacmine karşılık gelen eşdeğer tiyosiyanat miktarları bulundu. Beş tekrar sonucunda hesaplanan tiyosiyanat değerlerinin %95 güven seviyesinde (GS) ortalaması alındı. İkinci titrasyon için hazırlanan veteriner ilacı stok çözeltisinden alınan 25,0 mL' lik kısımlar 50,0 mL'e seyreltilerek standart AgNO₃ çözeltisi ile titre edildi. Dönüm noktasındaki harcanan AgNO₃ hacminden hesaplanan 1,0 g ilacın içerisindeki tiyosiyanat miktarı, ilaçta beyan edilen değerle hesaplanan tiyosiyanat miktarıyla (28,5 mg SCN⁻/1,0 g ilaç) karşılaştırıldı. Bu işlem altı kez tekrarlandı ve sonuçlar %95 GS'de *t* testi uygulanarak verildi.

3. Bulgular

İyonofor olarak ilk kez kullanılan paladyum (II) kompleksine dayalı yeni bir tiyosiyanat-seçici nanokompozit elektrot yapımı, çalışma koşullarının elektrodun performansına etkisi ve analitik olarak uygulanabilirliğinin gösterilmesiyle ilgili bulgular aşağıda verilmektedir. Ayrıca, daha düşük ohmik dirençlere ulaşabilmek için karbon pasta bileşenlerinin yüzeyin direnci üzerindeki etkisi de araştırıldı.

3.1. Karbon pasta bileşiminin optimizasyonu

3.1.1. İyonofor miktarının etkisi

İSE'lerin potansiyometrik cevabını etkileyen en önemli faktör, elektroaktif yüzeydeki iyonofor miktarıdır. Bu nedenle, karbon pasta bileşiminde

iyonoforun etkisini incelemek için, %0-40 aralığında değişen miktarlarda iyonofor ilave edilerek KPE0-KPE4 nolu elektrotların DÇA ve regresyon katsayıları incelendi. İyonofor içermeyen KPE0 elektrodunun çalışma aralığı $1,0 \times 10^{-4}$ - $1,0 \times 10^{-1}$ moldm⁻³ iken, %10-40 iyonofor ilavesi ile bu aralığın $1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$ moldm⁻³'e genişlediği gözlemlendi. Tablo 1'de görüldüğü gibi, aynı çalışma aralığında iyonofor miktarı arttıkça elektrot eğimi giderek artarken %40 iyonofor içeren karbon pasta elektrodun, daha yüksek bir *R*² değeriyle Nernst eğimine sahip bir cevap gösterdiği gözlemlendi. Bu nedenle, daha fazla iyonofor kullanılmasına gerek görülmedi.

Elektrot cevabındaki iyileşmenin, iyonofor miktarı arttıkça pasta bileşimindeki iyonoforun tiyosiyanatla etkileşim merkezlerinin artmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca, daha düşük iyonofor içeren pastalarla hazırlanan elektrotların cevabındaki nispeten düşük olan eğim ve *R*² değerlerinin grafit miktarı fazla olduğu için iyonoforun tiyosiyanatla etkileşen aktif uçlarının kapanmasına neden olduğu düşünülebilir. %40 oranında iyonofor kullanıldığında grafit miktarı daha az olduğu için bu engelin ortadan kalkmasının bir sonucu olarak daha yüksek *R*² değeriyle Nernst eğimine sahip olduğu söylenebilir. Bu nedenle, sonraki basamaklar için iyonofor oranı %40 olarak sabit tutuldu.

3.1.2. Plastikleştirici türünün etkisi

Plastikleştiriciler, eklendikleri malzemenin esnekliğini veya akışkanlığını artıran ve iyonoforlara hareketlilik sağlayan katkı malzemeleridir. Karbon pastanın kıvamı için bağlayıcı sıvı türü olarak literatürde parafin yağı, olefin yağı, Nujol kullanılmakta olsa da bu çalışmada bağlayıcı sıvı türü olarak Tablo 1'de görülebileceği gibi, *o*-NPOE (KPE1) dışında BEHA (KPE6), BEHS (KPE7), BEHF (KPE8) olmak üzere üç farklı plastikleştiricinin kullanılması, DÇA'yı değiştirmezken Nernstian'a en yakın eğimi veren plastikleştiricinin *o*-NPOE olduğu görüldü. Bu nedenle, geliştirilen tiyosiyanat-seçici elektrodun pasta bileşiminde de karar verilen uygun bağlayıcı sıvının *o*-NPOE olması çalışmanın, KPE'lerin üretiminde plastikleştirici kullanımıyla ilgili başka bir örnek olarak literatüre katkı sağlayabileceği söylenebilir [20,21,57].

3.1.3. İletkenlik artırıcı türü ve miktarının etkisi

Elektrodun yüzey bileşenlerine lipofilik katkı maddelerinin dahil edilmesinin ohmik direnci azalttığı, analit çözeltisi-elektrot arayüzünde iyon değişim kinetiğini katalize ettiği ve diğer iyonların girişimini azaltarak elektrodun Nernstian cevabını iyileştirdiği belirtilmiştir [60]. %40 iyonofor ve yeterince *o*-NPOE içeren KPE4'ün eğimi $1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$ moldm⁻³ derişim aralığında Nernstian'a yakın bulunduğundan, iyonofor miktarı sabit tutularak literatürdeki çalışmalarda belirtilen iyonoforun mol

sayısının %60'ı oranında lipofilik katkı maddesinin karbon pasta bileşimine eklenmesine karar verildi [46,61]. Elektrot KPE4'ün hem Nernst eğimi hem de DÇA dikkate alınarak performansı, üç farklı lipofilik katkı maddesiyle hazırlanan, THATFB'li (KPE8), TBATFB'li (KPE9) ve TFFTFB'li (KPE10) yeni elektrotlarla karşılaştırıldı. Bu elektrotlardan KPE9 ve KPE10 için aynı DÇA'da eğimler daha düşük bulunurken KPE8'in on kat daha geniş ($1,0 \times 10^{-6}$ - $1,0 \times 10^{-1}$ M) derişim aralığında ve KPE4 gibi Nernstian'a yakın cevap verdiği gözlemlendi. THATFB'li KPE8 elektrodundaki bu olumlu gelişmeyle, tiyosiyanat duyarlılığını artırmak için denenecek nanokompozit bileşiminde %40 iyonofor ve onun mol sayısının %60'ı kadar lipofilik katkı maddesi sabit tutuldu. TFFTFB kullanımının DÇA'yı genişletmiş olmasının yapısındaki anyonik grubun iyonofordaki halojenlerle yer değiştirmesi sonucunda oluşan yeni kompleks yapısıyla SCN'nin daha kolay ve tersinir şekilde etkileşiminden kaynaklandığı düşünülebilir [20,21]. Bu nedenle, karşılaştırma amacıyla iyonofor olmadan TFFTFB ile hazırlanan KPE16'nın potansiyometrik cevabı incelendiğinde, üç hafta süreyle $1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$ M derişim aralığında 48,6 mV/pSCN'lik duyarlılık göstermesi, iyonoforla birlikte kullanıldıklarında sinerjik etki göstererek hem duyarlılığın artmasına hem de R^2 değeri bire daha yakın olacak şekilde DÇA'nın genişlemiş olmasına katkıda bulunduğu şeklinde yorumlandı.

3.1.4. Nanomalzeme türünün ve miktarının etkisi

Tablo 1. Karbon pasta bileşiminin elektrodun performans özellikleri üzerindeki etkisi

Elektrot ismi ^b	Karbon pasta bileşimi, % (w/w) ^a				Plastikleştirici, ^c	Performans özelliği		
	İyonofor	Grafit	İletkenlik Artırıcı	NP		Eğim, ^d (mV/pSCN)	DÇA (mol ^m d ⁻³)	R^2 , ^e
KPE0	0	100	-	-	<i>o</i> -NPOE	18,3±3,3	$1,0 \times 10^{-4}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9371
KPE1	10	90	-	-	<i>o</i> -NPOE	51,2±2,6	$1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9772
KPE2	20	80	-	-	<i>o</i> -NPOE	55,7±3,7	$1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9792
KPE3	30	70	-	-	<i>o</i> -NPOE	54,4±2,4	$1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9607
KPE4	40	60	-	-	<i>o</i> -NPOE	59,6±3,8	$1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9814
KPE5	40	60	-	-	BEHA	10,2±1,6	$1,0 \times 10^{-4}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9668
KPE6	40	60	-	-	BEHS	12,8±2,2	$1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9407
KPE7	40	60	-	-	BEHF	29,1±1,6	$1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9561
KPE8	40	23,3	36,7 THATFB	-	<i>o</i> -NPOE	56,1±1,8	$1,0 \times 10^{-6}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9882
KPE9	40	30	30 TBATFB	-	<i>o</i> -NPOE	47,5±2,3	$1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9891
KPE10	40	35	25 TFFTFB	-	<i>o</i> -NPOE	58,9±0,9	$1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9843
KPE11	40	13,3	36,7 THATFB	10 Al ₂ O ₃	<i>o</i> -NPOE	65,6±1,5	$1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9784
KPE12	40	13,3	36,7 THATFB	10 SnO ₂	<i>o</i> -NPOE	50,8±1,8	$1,0 \times 10^{-5}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9987
KPE13	40	20,0	36,7 THATFB	3,3 Co ₃ O ₄	<i>o</i> -NPOE	57,4±1,3	$1,0 \times 10^{-6}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9753
KPE14	40	13,3	36,7 THATFB	10 Co₃O₄	<i>o</i>-NPOE	59,7±0,6	$1,0 \times 10^{-6}$-$1,0 \times 10^{-1}$	0,9943
KPE15	40	6,7	36,7 THATFB	16,7 Co ₃ O ₄	<i>o</i> -NPOE	59,7±2,9	$1,0 \times 10^{-6}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9781
KPE16	0	63,3	36,7 THATFB	-	<i>o</i> -NPOE	48,6±3,6	$1,0 \times 10^{-4}$ - $1,0 \times 10^{-1}$	0,9982

(^akarbon pasta katı bileşenlerin toplamı = 30 mg, ^bFarklı bileşimlerle hazırlanmış karbon pasta elektrot isimlerinin kısaltmaları, ^cBağlayıcı sıvı olarak yeterince plastikleştirici, ^d%95 GS $\bar{x} \pm ts/\sqrt{N}$ ($N=5$, $t_c=2.78$), ^eRegresyon katsayısı)

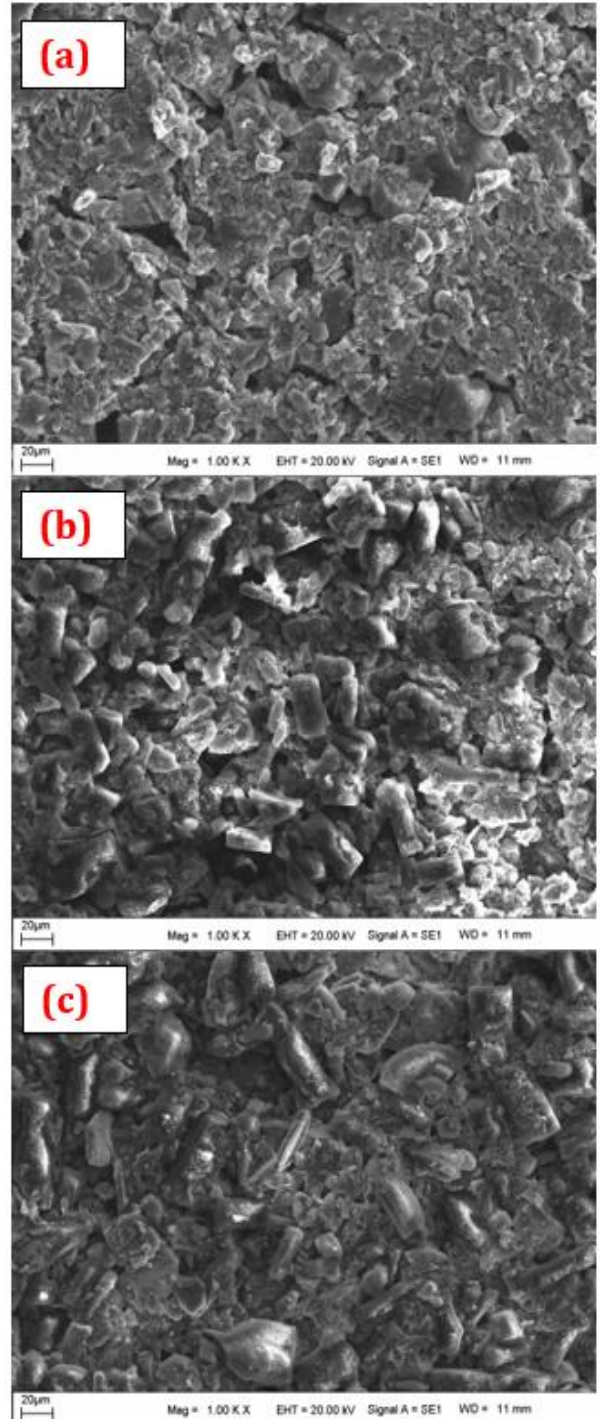
Optimizasyon çalışmaları sonucunda, MONP'lerle modifiye edilerek hazırlanan katı-temaslı nanokompozit elektrodun en iyi performans özelliklerini gösterdiği bileşimi %34,8 iyonofor, %11,6 grafit, %31,9 THATFB, %8,7 Co_3O_4 , %13,0 o-NPOE içermektedir (KPE14). Aşağıdaki SEM görüntülerinden Şekil 2(a) pürüzsüz olmayan ancak homojen dağılım gösteren plakaların olduğu iyonoforlu karbon pastaya aittir.

Şekil 2(a)'daki pasta bileşimine lipofilik katkı maddesi ve Co_3O_4 NP katıldığında gözlenen belirgin kalın dikdörtgen plakalar ve üzerlerindeki küçük beyaz noktasal yapılar önemli farklılıklar olup sırasıyla TFFTFB ve NP'ye ait oldukları söylenebilir (Şekil 2(b)). Ayrıca, Şekil 2(a) ve 2(b)'de gözlenen ince çubuksu yapıların Şekil 2(c)'de gözlenmesi, bu yapıların iyonofora ait olabileceğini düşündürdü.

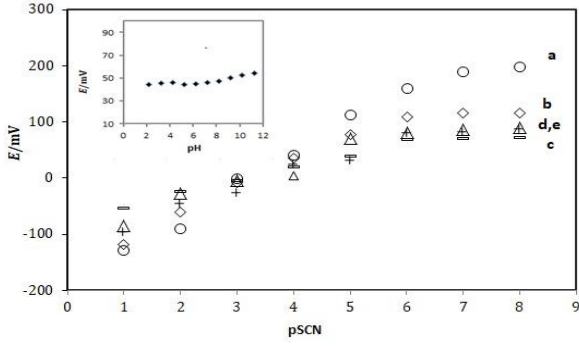
3.2. Çalışma koşullarının etkisi

Katı-temaslı nanokompozit elektrot KPE14'e çalışma koşullarının etkisi araştırılırken ilk olarak pH'nın etkisi incelendi. İyonoforun (paladyum (II) kompleksinin) asidik ve bazik ortamlarda yapısında bir değişiklik meydana gelip gelmediğinin anlaşılması için $0,1 \text{ mol dm}^{-3}$ NaCl varlığında pH'sı 2,0-11,0 aralığında değiştirilen BR tampon çözeltilerinde kaydedilen potansiyellerle KPE14 elektrodunun E-pH grafikleri çizildi (Şekil 3).

Elektrodun potansiyel cevabında 2,0-7,0 pH aralığında bir değişiklik olmazken pH 8,0-10,0 arasındaki bazik kısımda gözlenen potansiyel değişiminin ise ihmal edilebilir olduğu görüldü. Bu durum, iyonoforun pH 2,0-7,0 aralığında sulu ortamda kararlılığını koruduğu şeklinde yorumlanabilir. Elektrodun bu aralıktaki optimum çalışma pH'sını seçmek için farklı tampon çözeltilerinde (MES: 4-morfolinetansülfonik asit; TRİS: tris(hidroksimetil) aminometan hidroklorür) pH 4,0-7,0'da çalışıldı. $0,1 \text{ mol dm}^{-3}$ NaCl içeren çözeltilerde E-pSCN grafikleri oluşturuldu (Şekil 3). Kalibrasyon grafiklerinin eğimleriyle ilgili DÇA'ları karşılaştırıldı. KPE14, pH 4,0'da ($59,7 \pm 0,6 \text{ mV/pSCN}$) Nernstian eğime sahipken pH 5,0'da ($45,4 \pm 1,4 \text{ mV/pSCN}$), pH 6,0'da ($35,7 \pm 0,8 \text{ mV/pSCN}$) ve pH 7,0'da Nernstian altı cevap gösterdiği ($23 \pm 1,4 \text{ mV/pSCN}$) söylenebilir. Şekil 3' de görüldüğü gibi, pH 4,0' da en geniş çalışma aralığı ($1,0 \times 10^{-6} - 1,0 \times 10^{-1} \text{ mol dm}^{-3}$), en yüksek Nernst eğimi ($59,7 \pm 0,6 \text{ mV/pSCN}$) ve R^2 değeri 0,9943 olarak bulundu. Sonuç olarak, tiyosiyanat-seçici KPE14 nanokompozit elektrodunun optimum çalışma pH'sının 4,0 olduğu kabul edildi.



Şekil 2. Optimum miktarlara sahip bileşenleri içeren karbon pasta yüzeylerine ait SEM görüntüleri (a) iyonofor, plastikleştirici, grafit, (b) KPE14 bileşimi (c) iyonoforsuz KPE14 bileşimi



Şekil 3. KPE14'ün farklı pH'larda kalibrasyon eğrileri (a) 4,0 (asetik asit/asetat); (b) 5,0 (MES); (c) 6,0 (MES); (d) 7,0 (TRİS) (e) 8,0 (TRİS) içteki: pH 2,0-11,0 aralığında tiyosiyanat içermeyen BR tampon çözeltilerinde KPE14'ün potansiyometrik cevabına pH'nın etkisi)

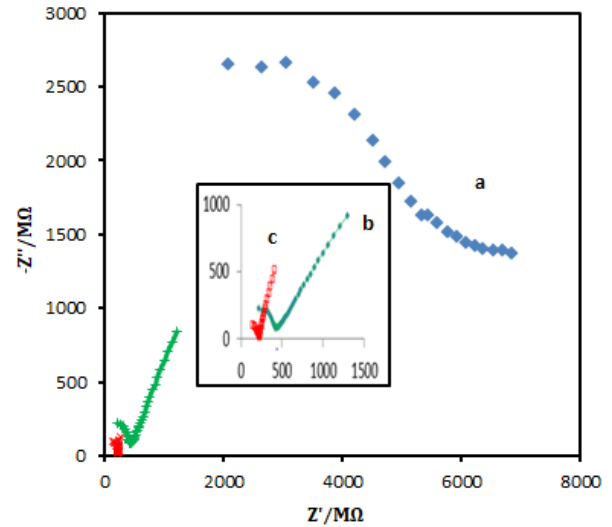
Optimum tiyosiyanat-seçici KPE14, pH 4,0'da her seferinde $1,0 \times 10^{-8}$ - $1,0 \times 10^{-1}$ mol dm^{-3} NaSCN kalibrasyon çözeltilerinde potansiyel cevabı ölçülmeden önce saf suda, $1,0 \times 10^{-5}$, $1,0 \times 10^{-4}$ ve $1,0 \times 10^{-3}$ mol dm^{-3} NaSCN çözeltisinde 1 saat şartlandırıldı. Kalibrasyon eğrilerinin eğimlerine ve elektrodun çalışma aralıklarına göre en uygun sonuç, elektrodun daha düşük derişimde ($1,0 \times 10^{-6}$ mol dm^{-3}) duyarlılık göstermesini sağlayan $1,0 \times 10^{-4}$ mol dm^{-3} analit çözeltisinde şartlandırılmasıyla elde edildi.

Her kullanım öncesinde şartlandırılması gereken elektrodun performansına $1,0 \times 10^{-4}$ mol dm^{-3} analit çözeltisiyle temas süresinin etkisini incelemek için KPE14 elektrodu, hiç şartlandırmadan daha sonra farklı süreler boyunca (30 ve 45 dak.) çözeltide bekletildikten sonra hücre potansiyelleri ölçüldü. Bulunan eğim değerleri şartlandırma olmadan 69,13 mV/pSCN iken, 30 ve 45 dakikalık beklemler için sırasıyla 64,0 mV/pSCN ve 60,8 mV/pSCN olarak bulundu. Nernstian'a yakın en iyi eğim ve R^2 değeri 45 dakikalık koşullandırma esnasında gözlemlendiğinden çalışmadan önce mutlaka 45 dakika şartlandırılarak deneyler gerçekleştirildi.

3.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi

EES, potansiyometrik iyon-seçici elektrotlar için elektrot yüzeyinin karakterizasyonu ve iletkenliği hakkında bilgi sağlayan bir yöntemdir [63,64]. KPE14'ün nanokompozit yüzey bileşimindeki iyonofor ile tiyosiyanat arasındaki etkileşimi desteklemek ve katı-temaslı elektrot yüzeyinin iletkenliğinde meydana gelen değişiklikleri gözlemek için $0,1$ mol dm^{-3} NaCl içeren asetik asit/asetat tamponunda çeşitli tiyosiyanat çözeltilerinde ($1,0 \times 10^{-6}$, $1,0 \times 10^{-4}$, $1,0 \times 10^{-2}$ mol dm^{-3}) elde edilen Nyquist eğrileri değerlendirildi (Şekil 4, Şekil 5). Elektrotlar için yüksek frekanslarda tamamlanamayan yarı dairesel eğriler gözlemlendi. Şekil 4 (a)'da $0,1$ mol dm^{-3} NaCl olacak şekilde pH 4,0 asetik asit/asetat tamponunda hazırlanan $1,0 \times 10^{-2}$ mol dm^{-3} NaSCN çözeltisine daldırılan ve sadece grafit ve bağlayıcı sıvı içeren karbon pasta

elektrodun direncinin ne kadar yüksek olduğu görülmektedir. Pasta bileşimine sırasıyla iyonofor (Şekil 4(b)) ve Co_3O_4 NP katılması (Şekil 4(c)) sonucunda elektrodun direncinin önemli derecede düştüğü ve yüzey iletkenliğinin arttığı anlaşılmaktadır. Bu durum, hem iyonoforun çözeltideki tiyosiyanat iyonlarıyla etkileşiminin gerçekleşmiş olduğunun ve iyon-seçici yüzeyin potansiyometrik cevap mekanizmasını desteklediğinin göstergesidir. Hem de, beklenildiği gibi KPE14 yüzey bileşiminde nanopartiküllerin varlığının, elektrot yüzeyinin direncini azaltarak daha hızlı kütle transferi sağlamasına katkıda bulunduğu şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca, Şekil 5'de tiyosiyanat derişimi arttıkça yarı dairesel kısımların alt alta gelerek, elektrot yüzeyinin direncinin düştüğü görülmektedir. İyonoforla analit arasında artan etkileşim sonucu yüzeyde analit iyonlarının varlığı bir taraftan iletkenliğin artışı diğer taraftan da elektrodun yüksek tiyosiyanat duyarlılığını desteklemektedir.



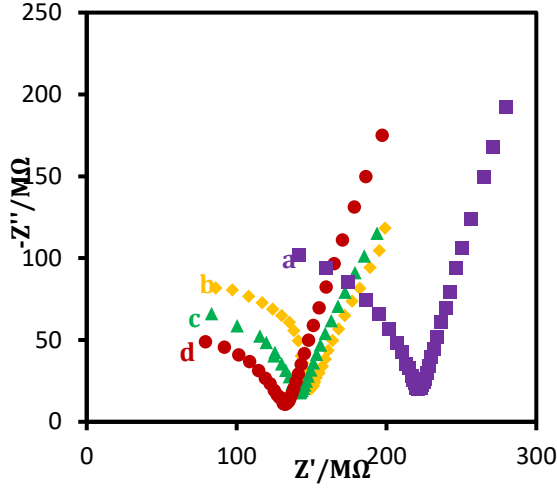
Şekil 4. Farklı yüzey bileşimlerinde hazırlanan elektrotların $0,1$ mol dm^{-3} NaCl'li pH 4,0 ortamında $1,0 \times 10^{-2}$ mol dm^{-3} NaSCN'de elde edilen Nyquist eğrileri (a) iyonoforsuz ve nanopartikülsüz (b) iyonoforlu ve nanopartikülsüz (c) iyonofor ve nanopartikül içeren KPE14

3.4. Çalışma aralığı, eğim, gözlenebilme sınırı

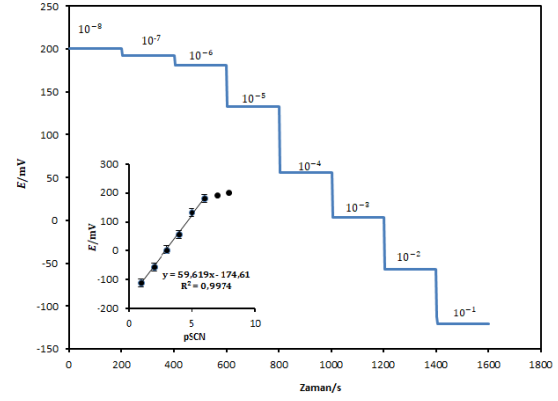
KPE14'ün eğimi ve doğrusal çalışma aralığı iki şekilde belirlendi. pH 4,0'da tiyosiyanat içeren çözeltilerdeki kronopotansiyometrik ($E-t$) verilerden elde edilen kalibrasyon eğrileri kullanılarak Şekil 6'daki iç grafik elde edildi. Hata çubuklarıyla birlikte verilen $1,0 \times 10^{-6}$ - $1,0 \times 10^{-1}$ mol dm^{-3} çalışma aralığına sahip bu eğride Co_3O_4 NP'lerin dahil edilmesiyle hazırlanan KPE14'ün eğimi üç tekrar için $59,6 \pm 1,57$ mV/pSCN olarak hesaplandı. Bu değer, aynı çalışma aralığı için Şekil 3(a)'da verilen ve pH-iyon metreden kaydedilen potansiyel değerleriyle çizilen kalibrasyon

eğrilerinin eğim ortalamasıyla ($59,7 \pm 0,6 \text{ mV/pSCN}$, $N:15$) çok uyumlu olduğu görüldü.

KPE14'ün gözlenebilme (LOD) ve alt tayin sınırları (LOQ) için, literatürde bildirilen IUPAC tavsiyelerine uygun olarak hesap yapıldı [65, 66]. LOD'si literatürdeki $\text{LOD}=3S/\text{eğim}$ denklemine göre hesaplanarak $1,4 \times 10^{-8} \text{ mol dm}^{-3}$ bulunurken; LOQ, değeri $\text{LOQ}=10S/\text{eğim}$ denklemine göre $4,7 \times 10^{-8} \text{ mol dm}^{-3}$ olarak hesaplandı. Burada S , KPE14'ün kalibrasyon eğrilerinde iki doğrusal kısım için kesişme noktalarının standart sapmasıdır.



Şekil 5. KPE14 için $0,1 \text{ mol dm}^{-3}$ NaCl içeren pH 4,0 tampon ortamında NaSCN çözeltilerinde Nyquist eğrileri (a) 0, (b) $1,0 \times 10^{-6}$ (c) $1,0 \times 10^{-4}$ ve (d) $1,0 \times 10^{-2} \text{ mol dm}^{-3}$



Şekil 6. KPE 14 elektrodunun pH 4,0' da $0,1 \text{ mol dm}^{-3}$ NaCl' li ortamda NaSCN eklemeleriyle elde edilen potansiyel-zaman grafiği (içteki grafik, kronopotansiyometrik verilerle çizilmiş kalibrasyon eğrisi, $N=3$)

3.5. Cevap süresi ve ömrü

Analitik amaçlarla kullanılan iyon-seçici elektrotların kısa cevap süresine sahip olması istenen bir özelliktir. Elektrodun cevap süresinin belirlenmesinde, kronopotansiyometrik $E-t$ grafiğinden (Şekil 6) yararlanıldı. Şekilde görüldüğü gibi, ardışık ilavelerden sonra elektrodun 5s kadar kısa bir sürede dengeye geldiği gözlemlendi. Elde edilen sonuçlar ışığında oluşturulan tiyosiyanat-seçici karbon pasta nanokompozit elektrodun cevap süresinin, Tablo 2'de verilen ve bildiğimiz kadarıyla literatürdeki tek potansiyometrik tiyosiyanat-seçici KPE çalışması olanla aynı sürede olup PVC membran elektrotlardan daha iyi olduğu açıktır [48-53]. KPE14'ün ömrünü belirlemek için elektrot $1,0 \times 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$ NaSCN içinde şartlandırılarak günde en az iki kez hücre potansiyeli ölçülerek eğiminde değişim olup olmadığı gözlemlendi. Her gün için çizilen kalibrasyon eğrilerinin eğimlerinde ölçülebilir bir değişikliğe yol açan önemli bir sapma olmadığı görüldü. Bunun sonucunda önerilen elektrodun 2 aydan fazla süre kararlı kaldığı söylenebilir.

Tablo 2. Tiyosiyanat-seçici bazı karbon pasta ve PVC membran elektrotların bileşimleri ve performans özelliklerinin karşılaştırılması

İyonofor	Karbon Pasta/PVC membran Bileşimi	Eğim, mv/pSCN	DÇA, M	LOD ^b , M	Cevap Süresi	Çalışma pH aralığı	Ömrü	Kaynak
(Ia)	KPE-I: %6 AgSD, %52 <i>o</i> -NPOE, %40,5 grafit, %2,5 CPC	63,2±0,7	$1,5 \times 10^{-5}$ – $1,09 \times 10^{-2}$	$8,7 \times 10^{-6}$	5 s	5-9		[47]
(Ib)	KPE-II: %7 CuSD ₂ , %53 <i>o</i> -NPOE, %37 grafit, %3 CPC	60,6±0,6	$1,82 \times 10^{-6}$ – $1,17 \times 10^{-2}$	$6,9 \times 10^{-7}$	5 s			
(Ic)	KPE-III: %6 FeSD ₃ ; %40,5 grafit tozu; %52 <i>o</i> -NPOE, %2,5 CPC	60,6±0,4	$9,33 \times 10^{-6}$ – $1,86 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-6}$	5 s			
(II)	%5,1 iyonofor, %28,9 PVC, %65 <i>o</i> -NPOE	59,5±0,5	$1,0 \times 10^{-7}$ – $9,0 \times 10^{-1}$	$5,5 \times 10^{-7}$	<15 s	5-9	3 ay	[48]
(IIIa)	%10 iyonofor, %30 PVC, %60 BEHP, %2 TOMAC	59,1	$1,0 \times 10^{-1}$ – $1,0 \times 10^{-6}$	5×10^{-7}	20 s	5-9	>1 ay	[49]

(IIIb)	%10 iyonofor, %30 PVC, %60 BEHP,	55,2	$1,0 \times 10^{-1}$ – $1,0 \times 10^{-6}$	5×10^{-7}	20 s	5-9	>1 ay	
(IV)	%1 iyonofor, %66 DBS, %33 PVC	52-56	$9,33 \times 10^{-5}$ – $1,86 \times 10^{-3}$	-	<60 s	5,5	-	[50]
(V)	%6 iyonofor, %32 PVC, %60 DOP, %2 TOMAC	56,5±1,1	$1,0 \times 10^{-1}$ – $1,0 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-7}$	5-15s	3,5–8,5	3 ay	[51]
(VI)	%1,5 iyonofor, %65 DOP, %33 PVC, %0,5 TDMAC	58,3±0,1	$1,0 \times 10^{-2}$ – $1,0 \times 10^{-6}$	5×10^{-6}	10-20 s	2-8	8 hafta	[54]
(VII)	%5 iyonofor, %31 PVC, %64 DOP	57,6±1,1	$1,0 \times 10^{-7}$ – $1,0 \times 10^{-1}$	5×10^{-7}	≤20 s	3,8–9,2	~6 hafta	[55]
Pd(II) kompleksi^a	KPE14: %34,8 iyonofor, %11,6 grafit, %31,9 THATFB, %8,7 Co ₃ O ₄ , %13,0 o-NPOE	59,7±0,6	$1,0 \times 10^{-6}$ – $1,0 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-8}$	≤5 s	2-7	≥ 2 ay	Bu çalışma

^aÇalışma için belirlenen bileşenlerin kütleleri sabit tutularak yeterince plastikleştiriciyle birlikte toplam karbon pasta kütlesi=34,5 mg ^bLOD: Gözlenebilirlik sınırı; Ia: AgSD: Ag(I) sulfadimidin Ib:CuSD2: Cu(II) sulfadimidin Ic: FeSD3: Fe(III) sulfadimidin, CPC: setilpiridinyum klorür DOP: Dioktil ftalat, DBS: Dibutil sebakat, TDMAC: Tridodesilmetilamonyum klorür, TOMAC: Trioktilmetilamonyum klorür

3.6. Seçicilik katsayıları

Elektrodun hangi iyonu tercih ettiği ve hangi iyonların ölçüme müdahale etme olasılığının daha yüksek olduğunu gösteren bir ölçüt olan seçicilik katsayısı, İSE için gerçek numune analizlerine geçmeden önce elektrodun uygulanabilirliği açısından önemli bir faktördür. Farklı matris ortamlarındaki türler, potansiyometrik olarak tayin edilirken elektrodun seçiciliği bozucuların bertaraf edilmesi açısından katkı sağlamaktadır. Bu amaçla asetat, perklorat, bromür, iyodür, salisilat, florür, klorür, sitrat, nitrat, karbonat, sülfid, kromat, nitrit varlığında KPE14'ün potansiyometrik cevabı ölçülüp, ayrı çözelti yöntemi kullanılarak seçicilik katsayıları ($\log K_{SCN,X}^{pot}$: X bozucu etki eden iyondur) belirlendi.

Ayrı çözelti yöntemi kullanılarak seçicilik katsayıları belirlendi ($\log K_{SCN,X}^{pot}$: X bozucu etki eden iyondur). Tablo 3' teki verilere göre KPE14' ün seçicilik sırası karbonat> salisilat> perklorat> iyodür> klorür> nitrat> nitrit> sülfid> bromür> asetat> florür olarak bulunmuştur. Tablo 3 ile ilgili olarak, elektroduna karbonat, salisilat, iyodür ve perklorat anyonlarının girişim yaptığı, diğer anyonların çoğunun önemli bir müdahale etkisi yok denecek kadar az olduğu görüldü.

3.7. Tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik

KPE14 için tekrarlanabilirliğin bir elektrotla ve yeniden üretilebilirliğin beş ayrı elektrotla art arda yapılan potansiyel ölçümlerinde, her biri için beşer kalibrasyon eğrisinden belirlenen eğimlerin standart sapması hesaplandı.

Bu değerlerin %5 'ten az bulunması tekrarlanabilirliğin ve yeniden üretilebilirliğin yüksek olduğunu gösterdi.

Tablo 3. Tiyosiyanat-seçici nanokompozit elektrot için hesaplanan seçicilik katsayıları

Bozucu anyon	$\log K_{SCN,X}^{pot}$	Bozucu anyon	$\log K_{SCN,X}^{pot}$
CO ₃ ²⁻	-0,3	NO ₂ ⁻	-2,4
Salisilat	-1,1	SO ₃ ²⁻	-2,7
ClO ₄ ⁻	-1,3	Br ⁻	-3,8
I ⁻	-1,3	CH ₃ COO ⁻	-5,6
Cl ⁻	-1,8	F ⁻	-5,9

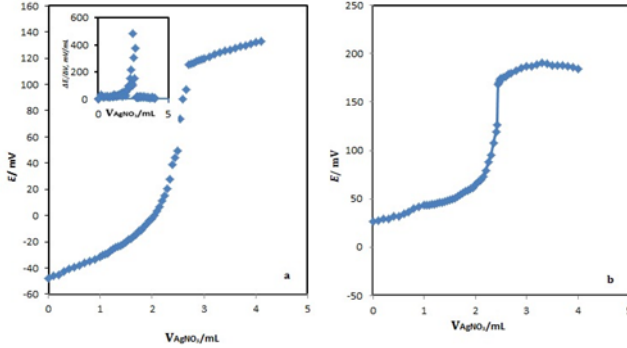
3.8. Analitik uygulama

İçerisinde eritromisin tiyosiyanat bulunan bir antibiyotik olan veteriner ilacı hayvanlarda, özellikle tavuk ve hindi gibi kuşlarda ağızdan verilerek tedavi edici olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, çalışmada ilaç örneği olarak kullanıldı.

Geliştirilen KPE14 nanokompozit elektrodun analitik uygulanabilirliği iki farklı şekilde gösterildi. Birincisinde, standart NaSCN çözeltisi ikincisinde, veteriner ilacındaki tiyosiyanat içeriğini analiz etmek için hazırlanan örnek çözeltisi standart AgNO₃ ile titre edildi. Her analiz beş tekrar yapılarak S şeklindeki titrasyon eğrilerine bir örnek Şekil 7' de, iç grafikte yer alan birinci türev eğrisiyle birlikte verildi.

Titrasyon eğrilerinin dönüm noktası civarındaki gözlenebilir sıçramalar KPE14'ün gerçek numunelerde tiyosiyanatın potansiyometrik

tayininde uygulanabileceğini gösterdi. Tablo 4' teki veriler, belirli miktarda alınan ilaç numunesi çözeltisinin standart AgNO_3 çözeltisi ile titre edilmesi sonucunda hesaplanan tiyosiyanat miktarları olup geri kazanım değerleri ile birlikte verildi.



Şekil 7. KPE14 elektrotu kullanılarak pH 4.0'da $2,0 \times 10^{-2}$ mol dm^{-3} standart AgNO_3 çözeltisiyle elde edilen titrasyon eğrileri (a) $1,0 \times 10^{-3}$ mol dm^{-3} NaSCN çözeltisinde (iç grafik eğrinin 1. türevidir) ve (b) veteriner ilaç numunesi çözeltisinde

Hesaplanan geri kazanım değerlerinin %100'e yakın olduğu tespit edildi. Aynı zamanda deneysel t değeri (t_d), t testi uygulanarak %95 GS'de kritik t değeri ($t_k=2,57$) ile karşılaştırıldı. $t_d < t_k$ olduğundan, beyan edilen değer ile hesaplanan deneysel ortalamalar arasında anlamlı bir fark olmadığı ve böylece sistematik bir hatanın bulunmadığı söylenebilir. Sonuç olarak, önerilen bu elektrot, tiyosiyanatın potansiyometrik tayini amacıyla ilaçlarda kullanılabilir.

Tablo 4. Gerçek numunede tiyosiyanatın potansiyometrik tayini ve geri kazanım değerleri (a %95 GS'de $N = 6$, $t_k = 2,57$)

Deney	Numunedeki Tiyosiyanat miktarı (mg)	Geri Kazanım, (%)
1	27,9	97,9
2	28,5	100
3	28,5	100
4	28,3	99,3
5	28,3	99,3
6	28,1	98,6
$\bar{x} \pm$	$28,3 \pm 0,2$	$99,2 \pm 0,8$
$t_s / \sqrt{N^3}$	$t_d = -2,12$	

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, ilk kez iyonofor olarak diklorobis (metildifenilfosfin) paladyum (II) kompleksinin kullanıldığı ve bu durum bilgimiz dahilinde potansiyometrik tiyosiyanat-seçici elektrotlar arasında hiç rastlanmayan katı-temaslı

nanokompozit elektrot olarak bir ilk olup yeni bir karbon pasta elektrot olduğunu göstermektedir. Elektrodun performansını artırmak için farklı metaloksit nanopartiküllerin eklenmesi sırasında Co_3O_4 NP ile hazırlanan KPE14 elektrotu için elde edilen kalibrasyon eğrilerinin çalışma aralığı aynı kalırken ($1,0 \times 10^{-1}$ - $1,0 \times 10^{-6}$) eğiminin NP'siz KPE8'e göre $56,1 \pm 1,8$ mV/pSCN'den $59,7 \pm 0,6$ mV/pSCN'ye artmasına katkı sağladığı açıktır. Ayrıca, R^2 değerinin bire yaklaşmasıyla daha tekrarlanabilir potansiyel ölçümlerinin elde edilmesiyle, literatürde sunulan diğer elektrotlarla karşılaştırıldığında daha kısa cevap süresine ve daha uzun kullanım süresine sahip olmasına katkı sağladığı düşünülmektedir [48-51,54,55].

Önerilen optimum elektrodun seçicilik performansı incelendiğinde, daha düşük derişimlerde karbonat, salisilat, iyodür ve perklorat içeren veya bunların bulunmadığı veteriner ilaç örneği gibi gerçek numunelerde düşük miktarda tiyosiyanat içeriğinin potansiyometrik tayini için indikatör elektrot olarak tatmin edici sonuçlar verebileceği görülmektedir. IUPAC önerisine göre hesaplanan LOD değerinin ($1,4 \times 10^{-8}$ mol dm^{-3}), Tablo 2'de verilen bazı PVC membran ve KPE'lerinkilerle karşılaştırıldığında en düşük bulunması da bu sonucu desteklemektedir.

Nanomateriyal içeren tiyosiyanat-seçici KPE çalışmalarının yok denecek kadar az olması, çalışmanın, modifiye edilmiş yeni tiyosiyanat-seçici karbon pasta elektrotlarının geliştirilmesinde nanomateriyallerin kullanımıyla ilgili literatüre değerli bir katkı sağlayacaktır.

Teşekkürler

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında malzeme desteği sağlayan İnönü Üniversitesi BAP FDK-2022-2949 nolu proje ile Ankara Üniversitesi BAP FYL-2024-3282 nolu proje için Bilimsel Araştırma Projesi Koordinatörlüklerine ve çalışmalarımızı yapabilmemiz için laboratuvarlarını kullanma imkanı sunan Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü'ne teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Reboiras, M. D. 1996. Electrochemical properties of cellulosic ion-exchange membranes III. Application to ion-selective electrodes. Journal of membrane science, 114(1), 105-113.
- [2] Zahirakha, A. V., Smolenkov, A. D., Shpigun, O. A. 2016. Preparation and chromatographic performance of polymer-based anion exchangers for ion chromatography: A review. Analytica chimica acta, 904, 33-50.
- [3] Rutz, C., Schmolke, L., Gvilava, V., Janiak, C. 2017. Anion analysis of ionic liquids and ionic liquid

- purity assessment by ion chromatography. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 643(1), 130-135.
- [4] Yang, J., Cao, Y., Zhang, N. 2020. Spectrophotometric method for superoxide anion radical detection in a visible light (400–780 nm) system. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 239, 118556.
- [5] Liang, CF Huang, N Mohanty, RM Kurakalva 2008. A rapid spectrophotometric determination of persulfate anion in ISCO-*Chemosphere*, 73(9):1540-1543.
- [6] Gong B, Gong G., Fluorimetric method for the determination of thiocyanate with 2',7'-dichlorofluorescein and iodine 1999. *Anal. Chim. Acta* Volume 394, Issues 2–3, Pages 171-175.
- [7] Ozoemena, K. I., Nyokong, T. 2005. Surface electrochemistry of iron phthalocyanine axially ligated to 4-mercaptopyridine self-assembled monolayers at gold electrode: Applications to electrocatalytic oxidation and detection of thiocyanate. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 579(2), 283-289.
- [8] Hein, R., Beer, P. D., Davis, J. J. 2020. Electrochemical anion sensing: supramolecular approaches. *Chemical reviews*, 120(3), 1888-1935.
- [9] Titretir, S., Erdoğan, G., Karagözler, A. E. 2006. Determination of iodide ions at poly (3-methylthiophene)-modified electrode by differential pulse stripping voltammetry. *Journal of Analytical Chemistry*, 61, 592-595.
- [10] Pagliano, E., Campanella, B., D'Ulivo, A., Mester, Z. 2018. Derivatization chemistries for the determination of inorganic anions and structurally related compounds by gas chromatography-a review. *Analytica chimica acta*, 1025, 12-40.
- [11] Lin, F. M., Wu, H. L., Kou, H. S., Lin, S. J. 2003. Highly sensitive analysis of iodide anion in seaweed as pentafluorophenoxyethyl derivative by capillary gas chromatography. *Journal of agricultural and food chemistry*, 51(4), 867-870.
- [12] Martinez-Manez, R., Sancenon, F. 2003. Fluorogenic and chromogenic chemosensors and reagents for anions. *Chemical reviews*, 103(11), 4419-4476.
- [13] Işıldak, O., Yıldız, I. 2023. Highly selective potentiometric determination of nitrate ions using silver bisdiethyldithiocarbamate based membrane electrodes. *Electrochimica Acta*, 459, 142587.
- [14] Manandhar, S., Yrjänä, V., Leito, I., Bobacka, J. 2024. Determination of benzoate in cranberry and lingonberry by using a solid-contact benzoate-selective electrode. *Talanta*, 274, 125996.
- [15] Ayanoğlu, M. N., Kormalı Ertürün, H. E., Demirel Özel, A., Şahin, Ö., Yılmaz, M., Kılıç, E. 2015. Salicylate Ion-Selective Electrode Based on a Calix [4] arene as Ionophore. *Electroanalysis*, 27(7), 1676-1684.
- [16] Ertürün, H. E. K., Özel, A. D., Ayanoğlu, M. N., Şahin, Ö., Yılmaz, M. 2017. A calix [4] arene derivative-doped perchlorate-selective membrane electrodes with/without multi-walled carbon nanotubes. *Ionics*, 23, 917-927.
- [17] Karimipour, G., Gharaghani, S., Ahmadpour, R. 2012. Bis (trans-cinnamaldehyde)-1, 3-propanediimine) mercury (II) chloride, [Hg (BPPPB) Cl 2] as Carrier for Construction of Iodide Selective Electrode. *Journal of Chemistry*, 9, 2565-2574.
- [18] El-Kosasy, A. M., Rahman, M. H. A., Abdelaal, S. H. 2019. Graphene nanoplatelets in potentiometry: A nanocomposite carbon paste and PVC based membrane sensors for analysis of Vilazodone HCl in plasma and milk samples. *Talanta*, 193, 9-14.
- [19] El-Sanafery, S. S., Abbas, A. A., Mohamed, G. G. 2022. Chemical modified carbon paste electrode for potentiometric determination of Mo (VI) and its application in food analysis and agriculture fertilizers. *Electroanalysis*, 34(5), 872-882.
- [20] Aslaner, S. İ., Demirel Özel, A. 2022. The use of nanocomposite approach in the construction of carbon paste electrode and its application for the potentiometric determination of iodide. *Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly*, 153(10), 881-893.
- [21] Muratoğlu, S., Ertürün, H. E. K., Özel, A. D., 2018. Paladyum Komplekslerine Dayalı İyodür-Seçici Karbon Pasta Elektrot Hazırlanması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 237-246.
- [22] Bakker, E., Pretsch, E. 2005. Potentiometric sensors for trace-level analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 24(3), 199-207.
- [23] Ghaedi, H., Afkhami, A., Madrakian, T., & Soltani-Felehgari, F. 2016. Construction of novel sensitive electrochemical sensor for electro-oxidation and determination of citalopram based on zinc oxide nanoparticles and multi-walled carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: C*, 59, 847-854.
- [24] Gautam, V., Srivastava, A., Singh, K. P., Yadav, V. L. 2017. Preparation and characterization of

- polyaniline, multiwall carbon nanotubes, and starch bionanocomposite material for potential bioanalytical applications. *Polymer Composites*, 38(3), 496-506.
- [25] Abdallah, N. A. 2021. Novel Potentiometric Solid-Contact Electrode for the determination of Fe²⁺ ions via MWCNTs-Gemifloxacin composite. *Electroanalysis*, 33(5), 1283-1289.
- [26] Atta, N. F., Galal, A., El-Ads, E. H., Hassan, S. H. 2019. Cobalt oxide nanoparticles/graphene/ionic liquid crystal modified carbon paste electrochemical sensor for ultra-sensitive determination of a narcotic drug. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*, 9(1), 110-121.
- [27] Afkhami, A., Shirzadmehr, A., Madrakian, T. 2014. Improvement in performance of a hyoscine butylbromide potentiometric sensor using a new nanocomposite carbon paste: a comparison study with polymeric membrane sensor. *Ionics*, 20, 1145-1154.
- [28] Alizadeh, T., Zargr, F. 2020. Highly selective and sensitive iodide sensor based on carbon paste electrode modified with nanosized sulfate-doped α -Fe₂O₃. *Materials Chemistry and Physics*, 240, 122118.
- [29] Mazloun-Ardakani, M., Beitollahi, H., Amini, M. K., Mirkhalaf, F., Abdollahi-Alibeik, M. 2010. New strategy for simultaneous and selective voltammetric determination of norepinephrine, acetaminophen and folic acid using ZrO₂ nanoparticles-modified carbon paste electrode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 151(1), 243-249.
- [30] Afkhami, A., Soltani-Felehgari, F., Madrakian, T. 2013. Gold nanoparticles modified carbon paste electrode as an efficient electrochemical sensor for rapid and sensitive determination of cefixime in urine and pharmaceutical samples. *Electrochimica acta*, 103, 125-133.
- [31] Zhou, Y., Yang, L., Li, S., Dang, Y. 2017. A novel electrochemical sensor for highly sensitive detection of bisphenol A based on the hydrothermal synthesized Na-doped WO₃ nanorods. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 245, 238-246.
- [32] Savari, Z., Soltanian, S., Noorbakhsh, A., Salimi, A., Najafi, M., Servati, P. 2013. High sensitivity amperometric and voltammetric determination of persulfate with neutral red/nickel oxide nanowires modified carbon paste electrodes. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 176, 335-343.
- [33] Asefa, T., Duncan, C. T., Sharma, K. K. 2009. Recent advances in nanostructured chemosensors and biosensors. *Analyst*, 134(10), 1980-1990.
- [34] Chen, S. H., Yang, Z. Y., Wu, H. L., Kou, H. S., Lin, S. J. 1996. Determination of thiocyanate anion by high-performance liquid chromatography with fluorimetric detection. *Journal of analytical toxicology*, 20(1), 38-42.
- [35] Connolly, D., Barron, L., Paull, B. 2002. Determination of urinary thiocyanate and nitrate using fast ion-interaction chromatography. *Journal of Chromatography B*, 767(1), 175-180.
- [36] Han, W. S., Hong, T. K., Lee, Y. H. 2011. Thiocyanate ion-selective solid contact electrode based on Mn complex of N, N'-bis-(4-phenylazosalicylidene)-o-phenylene diamine ionophore. *American Journal of Analytical Chemistry*, 2(06), 731-738.
- [37] Pena-Pereira, F., Lavilla, I., Bendicho, C. 2016. based analytical device for instrumental-free detection of thiocyanate in saliva as a biomarker of tobacco smoke exposure. *Talanta*, 147, 390-396.
- [38] Yang, P., Wei, W., Tao, C. 2007. Determination of trace thiocyanate with nano-silver coated multi-walled carbon nanotubes modified glassy carbon electrode. *Anal. Chim. Acta*, 585(2), 331-336.
- [39] Bernabéu JA, Camacho MA 2001. Procedure to evaluate the stability during processing and storage of a medicated premix and medicated farm feed: erythromycin thiocyanate, *Journal of agricultural and food chemistry*, 49(8), 3709-3712.
- [40] Ognean, L., Chiurciu, V., Cernea, C., Trîncă, S., Oroian, R. 2011. The Evaluation of Therapeutic Doses of Erythromycin on the Main Hematological Parameters of Broiler Chickens. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Veterinary Medicine*, 68(1), 277-284.
- [41] Nivas, S. C., Sunde, M. L., Bird, H. R. 1967. Erythromycin Thiocyanate and the Performance of Laying Hens 1. *Poultry Science*, 46(5), 1103-1108.
- [42] Shuaib, A. C. A., Beswick, G., Tomlins, R. I. 1981. The thiocyanate ion (SCN⁻) content of eggs from hens (*Gallus domesticus*) fed on a diet containing rapeseed meal. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 32(4), 347-352.
- [43] Özalp, E. 2007. Tiyosiyanat Bellekli Polimer Sistemlerinin Hazırlanması. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 87s, Eskişehir.
- [44] Bakker, E., Bühlmann, P., Pretsch, E. 1997. Carrier-based ion-selective electrodes and bulk

- optodes. 1. General characteristics. *Chemical reviews*, 97(8), 3083-3132.
- [45] Amini, M. K., Rafi, A., Ghaedi, M., Habibi, M. H., Zohory, M. M. 2003. Bis (2-mercaptobenzoxazolato) mercury (II) and bis (2-pyridinethiolato) mercury (II) complexes as carriers for thiocyanate selective electrodes. *Microchemical journal*, 75(3), 143-150.
- [46] Schaller, U., Bakker, E., Spichiger, U. E., Pretsch, E. (1994). Ionic additives for ion-selective electrodes based on electrically charged carriers. *Analytical Chemistry*, 66(3), 391-398.
- [47] Shehab, O. R., Mansour, A. M. 2014. New thiocyanate potentiometric sensors based on sulfadimidine metal complexes: Experimental and theoretical studies. *Biosensors and Bioelectronics*, 57, 77-84.
- [48] Xu, W. J., Chai, Y. Q., Yuan, R., Liu, S. L. 2006. A novel thiocyanate-selective electrode based on a zinc-phthalocyanine complex. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 385, 926-930.
- [49] Amini, M.K., Shahrokhian, S., Tangestaninejad, S. 1999. PVC-based cobalt and manganese phthalocyanine coated graphite electrodes for determination of thiocyanate. *Analytical letters*, 32(14), 2737-2750.
- [50] Brown, D. V., Chaniotakis, N. A., Lee, I. H., Ma, S. C., Park, S. B., Meyerhoff, M. E., ... Groves, J.T. 1989. Mn (III)—porphyrin-based thiocyanate-selective membrane electrodes: Characterization and application in flow injection determination of thiocyanate in saliva. *Electroanalysis*, 1(6), 477-484.
- [51] Ardakani, M. M., Sadeghi, A., Salavati-Niasari, M. 2005. Highly selective thiocyanate membrane electrode based on butane-2, 3-dione bis (salicylhydrazonato) zinc (II) complex. *Talanta*, 66(4), 837-843.
- [52] El Aamrani, F. Z., García-Raurich, J., Sastre, A., Beyer, L., & Florido, A. 1999. PVC membranes based on silver (I)-thiourea complexes. *Analytica chimica acta*, 402(1-2), 129-135.
- [53] Xu, G., Dong, W. L., Ren, L. Y. 2012. Research and application of thiocyanate-selective electrodes based on copper (II) complex with ethylenediamine-bis-(salicylaldehyde) base as carrier. *Advanced Materials Research*, 396, 2230-2233.
- [54] Hassan, S. S., Abou Ghalia, M. H., Amr, A. G. E., Mohamed, A. H. 2003. Novel thiocyanate-selective membrane sensors based on di-, tetra-, and hexa-imidepyridine ionophores. *Analytica chimica acta*, 482(1), 9-18.
- [55] Arvand, M., Zanjanchi, M.A., Heydari, L. 2007. Novel thiocyanate-selective membrane sensor based on crown ether-cetyltrimethyl ammonium thiocyanate ion-pair as a suitable ionophore. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 122(1), 301-308.
- [56] Erden, S., Demirel, A., Memon, S., Yılmaz, M., Canel, E., Kılıç, E. 2006. Using of hydrogen ion-selective poly (vinyl chloride) membrane electrode based on calix [4] arene as thiocyanate ion-selective electrode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 113(1), 290-296.
- [57] Abdel-Haleem, F. M., Shehab, O. R. 2016. Comparative Study of Carbon Paste, Screen Printed, and PVC Potentiometric Sensors Based on Copper-sulphamethazine Schiff Base Complex for Determination of Iodide-Experimental and Theoretical Approaches. *Electroanalysis*, 28(4), 800-807.
- [58] Xu, W. J., Zhang, Y., Chai, Y. Q., Yuan, R. 2009. Preparation and characterization of thiocyanate-selective electrodes based on new complexes of copper (II) as neutral carriers. *Desalination*, 249(1), 139-142.
- [59] Mortazavi, K., Ghaedi, M., Montazerzohori, M., Andikaey, Z. 2011. Iodide-Selective Electrodes Based on Bis (Trans-Cinnamaldehyde) 1, 3-Propanediimine Mercury (II) Chloride [BCPHgCl₂] and Bis (Trans-Cinnamaldehyde)-1, 3-Propandiimine Cadmium (II) Chloride [BCPCdCl₂] Carriers: Influence of Multiwalled Carbon Nanotubes on the Response Performance. *International Journal of Electrochemical Science*, 6(9), 4250-4263.
- [60] Benvidi, A., Ghanbarzadeh, M.T., Mazloun-Ardakani, M. and Vafazadeh, R. 2011. Iodide-selective polymeric membrane electrode based on copper(II) bis(N-2-bromophenyl salicylidenaminato) complex. *Chin. Chem. Lett.*, 22, 1087-1090.
- [61] Eugster, R., Gehrig, P.M., Morf, W. E., Spichiger, U. E., & Simon, W. 1991. Selectivity-modifying influence of anionic sites in neutral-carrier-based membrane electrodes. *Analytical chemistry*, 63(20), 2285-2289.
- [62] Abbaspour, A., Izadyar, A. 2007. Carbon nanotube composite coated platinum electrode for detection of Cr (III) in real samples. *Talanta*, 71(2), 887-892.
- [63] Guo, J., Chai, Y., Yuan, R., Song, Z., Zou, Z. 2011. Lead (II) carbon paste electrode based on derivatized multi-walled carbon nanotubes: Application to lead content determination in environmental samples. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 155(2), 639-645.
- [64] Anderson E.L., Bühlmann P., 2016. Electrochemical Impedance Spectroscopy of Ion-Selective Membranes: Artifacts in Two-, Three-, and Four-Electrode Measurements. *Anal Chem* 88(19):9738-9745.

- [65] Magnusson B., Örnemark U., 2014. Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods –A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics, 2nd, edition., Eurachem, Belgium, 70p.
- [66] Elgamouz A, Shehadi I, Assal A, Bihi A, Kawde A.N., 2021. J Electroanal Chem 895,115443.

Tatlı Su Kaynaklarında Temiz Enerji Üretimi için Eğirdir Gölü Üzerinde Hibrit Yüzer Enerji Santral Tasarımı Örneği ve GZFT Analizi

Büşra CESUR DURMAZ^{1*}, İbrahim ÜÇGÜL²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, 32200, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Tekstil Mühendisliği, 32200, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 11.06.2024, Kabul / Accepted: 21.10.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Yenilenebilir enerji,
Tatlı su kaynakları,
Eğirdir Gölü,
Hibrit yüzer yenilenebilir
enerji santrali,
GZFT analizi,
GZFT matrisi.

Öz: Çalışmada Türkiye'nin önemli bir tatlı su havzası olan Eğirdir Gölü özelinde hibrit yüzer enerji santral tasarımı geliştirilmiştir. Eğirdir Gölü'nün buharlaşma ve diğer etkenlerden kaynaklı su seviyesinin azalması ve bu bölgenin hassas koruma alanı olmasından dolayı öneri niteliğinde ki bu tasarım ile enerji üretimi sağlanırken, su kaynaklarının ve su havzasının da korunmasını amaçlanmıştır. İzlenen yöntem; literatür taraması, uygun yer seçiminin belirlenmesi, santral tasarımının yapılması, enerji potansiyel hesapları ve konut sayısının bulunması, santral tasarımının GZFT Analizi ile incelenmesi ve stratejik kararların açıklanması aşamalarından oluşmaktadır. Çalışma kapsamında, Eğirdir Gölü'nde belirlenen en uygun alanda kurulacak yüzer enerji santralinin, 509.826 kWh/yıl enerji potansiyeline sahip ve yaklaşık 140 konutun enerji ihtiyacını karşılabilecek durumda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca Eğirdir'de yüzer enerji santral tasarımının uygulanabilirliğini arttırmak için GZFT Matrisi stratejik önerileri çıkartılmıştır. Bu sayede, Türkiye'de tatlı su alanlarında enerji üretiminin gelişmesine yönelik yenilikçi çözüm sunulmuş, uygulanabilmesi yönündeki hususlara dikkat çekilmiştir.

Hybrid Floating Power Plant Design Example and SWOT Analysis on Lake Eğirdir for Clean Energy Production in Fresh Water Resources

Keywords

Renewable energy,
Fresh water resources,
Eğirdir Lake,
Hybrid floating renewable
energy power plant,
SWOT analysis,
SWOT matrix.

Abstract: In this study, a hybrid floating power plant design is developed for Lake Eğirdir, an important freshwater basin of Turkey. Due to the decrease in the water level of Lake Eğirdir for evaporation and other factors and the sensitive protection area of this region, this proposed design aims to protect water resources and the water basin while providing energy production. The method followed consists of the following stages: literature review, determination of the appropriate site selection, design of the power plant, energy potential calculations and finding the number of dwellings, examination of the power plant design with SWOT Analysis and explanation of strategic decisions. Within the scope of the study, it was concluded that the floating power plant to be established in the most suitable area determined in Lake Eğirdir has an energy potential of 509.826 kWh/year and can meet the energy needs of approximately 140 houses. In addition, SWOT Matrix strategic recommendations were extracted to increase the feasibility of floating power plant design in Eğirdir. In this way, an innovative solution for the development of energy production in freshwater areas in Turkey was presented and attention was drawn to the issues that could be implemented.

*İlgili yazar: busracesur.pm@gmail.com

1. Giriş

Tatlı su kaynakları bütün canlılar için gerekli olan biyolojik anlamda temel bir ihtiyaçtır. Aynı zamanda insanların yerleşim alanlarını tatlı su kaynaklarına yakın planlayarak içme suyu temin ettiği, su ürünleri yetiştiriciliği yaptığı, tarımsal ve enerji üretimi gibi ekonomik faaliyetlerde bulunduğu yaşam ortamlarıdır. Göller de bu anlamda geniş su havzasına sahip, biyolojik çeşitliliği destekleyen, temel ekosistem hizmetleri sağlayan ve iklim değişikliğine duyarlı su kaynaklarıdır [1].

Dünya'nın yüzey tatlı suyunun % 87'sini göller oluşturmakta ve Dünya genelinde 100 milyondan fazla göl bulunmaktadır [2]. Türkiye de ise göl ve bataklıkların (sulak alanların) toplam yüz ölçümünü 10.000 km² ve ülke yüz ölçümünün 1/80'ini oluşturmaktadır [3]. Dolayısıyla Türkiye tatlı su potansiyeli bakımından zengin bir ülke sayılmamaktadır [4]. Buna rağmen tatlı su kaynaklarından yararlanırken çeşitli insan etkilerinden dolayı göllerin kirliliği söz konusu olmakta veya yanlış tarımsal sulama, şehirleşme, sürdürülebilir olmayan su altyapı projelerinden dolayı (hidroelektrik santraller, barajlar, havzalar arası su transferi gibi) göl seviyesinde azalma meydana gelmektedir [3, 5]. Aynı zamanda fosil kaynak kullanımına bağlı sıcaklık artışı sonucu küresel iklim değişikliğinin de meydana gelmesi, göl yüzeyinde buharlaşmayı hızlandırarak su seviyesinin düşmesine neden olmaktadır.

Bu hususla ilgili "Türkiye 2024-2030 İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı" raporuna göre küresel iklim değişikliğini en aza indirmek ve günümüz enerji ihtiyacının büyük oranda karşılandığı kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil kaynaklara ve ithalata bağlılığı azaltmaya yönelik stratejilerin geliştirildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra enerji sektöründe güneş, rüzgar, dalga, hidroelektrik vb. yenilenebilir kaynakların kullanımını da teşvik eden politikalar hızlanmaktadır [6]. Ancak yenilenebilir enerji üretimi artarken havza ölçeğinde yapılmayan bazı hidroloji planları, dere ve sulak alanların yok olmasına [5] ve gölleri besleyen kaynakların azalmasıyla tatlı su kaynaklarının kurumasına yol açmaktadır. Bu nedenle tatlı su kaynaklarının korunarak yenilenebilir enerji üretiminin sağlanmasında öncelikle uygun olmayan su altyapı projeleri yerine yüzer sistemleri tercih etmek gerekmektedir. Özellikle güneş, rüzgar, dalga, akıntı, termal gibi enerji kaynak potansiyelinin yüksek olduğu ve su yüzeyinin geniş alan kullanımına izin verdiği kıyılarda alternatif enerji üretimine katkı sağlamak için yüzer sistemler avantaj sağlamaktadır [7]. Bu nedenle çalışmada Türkiye'nin ikinci büyük tatlı su gölü olan ve ekonomik, sosyal, kültürel, enerji gibi her alanda yerel halk tarafından yaşam kaynağı olarak görülen Eğirdir Gölü [8], çalışma alanı olarak tercih edilmiştir.

Eğirdir gölünü besleyen kaynaklar yağmur ve kar suları, küçük dereler, çevredeki yeraltı suları ve göl tabanındaki kaynak sularından oluşturmaktadır [9]. Gölün su seviyesinde ki azalma başta yağış rejiminin değişmesi, buharlaşma ve yanlış tarımsal sulamadan kaynaklanmaktadır [9, 10, 11]. Aynı zamanda kimyasal gübreler, tarımsal ilaçlar, evsel ve endüstriyel atıklar, su israfı ve nüfus artışı da gölü tehlikeye atan önemli unsurlardır [11, 12]. Eğirdir ve Kovada Gölü Koruma Birliği Müdürü Süleyman Can tarafından Eğirdir Gölü'nün su seviyesi ölçümüne göre 2020-2023 yılları arasında 1,36 m azaldığı, 2017-2023 yılları arasında ise 2,12 m azaldığı belirtilmiştir [13].

Su seviyesinde meydana gelen önemli derecedeki azalmayı engellemek, Eğirdir Gölü'nü korumak ve sürdürülebilirliğini sağlamak için öncelikle maksimum su kotu ile çevrelenen su alanı "I. Derece Doğal Sit Alanı", maksimum su kotundan itibaren 300 m'lik alan sınırı "III. Derece Doğal Sit Alanı" olarak kabul edilmiştir [14]. Zamanla bu karar güncellenerek Eğirdir Gölü Doğal Sit Alanı "Kesin Korunacak Hassas Alan", "Nitelikli Doğal Koruma Alanı" ve "Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı" olarak 3357 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararı ile ilan edilmiştir [15]. Ayrıca Isparta ili ve çevredeki yerleşim alanlarının da yararlandığı Eğirdir Gölü, birinci sınıf yüksek kalite içme suyu özelliğine sahip olmasından dolayı "A Sınıfı Sulak Alan" listesine alınmıştır [14, 16].

Eğirdir Gölü'nün çevresi için önemli derecede tatlı su havzası niteliğinde olması yapılacak tüm enerji planlarında koruma ölçütlerinin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu nedenle çalışmada tatlı su kaynaklarının korunarak enerji üretiminde yararlanılması noktasında öneri niteliğinde Eğirdir Hibrit Yüzer Enerji Santral Tasarımı geliştirilmiştir. Santral tasarımında Eğirdir Gölü Havzasının su kalitesinin, su seviyesinin ve su rezervini besleyen kaynakların korunması amaçlanmıştır. Aynı zamanda Eğirdir Gölü Havzası için yüzer enerji santralinin gerekliliğinin vurgulanması ve öneri olarak geliştirilen santral tasarımının olumlu ve olumsuz yönlerinin değerlendirilmesi için GZFT Analizi uygulanarak, stratejik kararlar belirlenmiştir.

Eğirdir Gölü Havzası özelinde yüzer enerji santrali geliştirilirken koruma ölçütleri göz önünde bulundurularak aşağıda belirtilen yöntem izlenmiştir.

1. Aşama: Eğirdir Gölü üzerinde planlanan yüzer enerji santrali için gerekli olan materyal bilgilerinin ve iklimsel verilerin elde edilmesi.
2. Aşama: Yer seçim ölçütlerinin belirlenerek Eğirdir Gölünde en uygun kıyı alanının tespit edilmesi.
3. Aşama: Hibrit yüzer enerji santrali tasarımının geliştirilmesi.
4. Global Solar Atlas ve Global Wind Atlas yazılımlarından elde edilen verilere göre yüzer enerji santralinin toplam güneş ve rüzgar enerji

potansiyelinin hesaplanması ve karşılayacağı konut sayısının bulunması.

5. Aşama: GZFT (SWOT) Analizi ile Eğirdir hibrit yüzer enerji santralini değerlendirme ve GZFT Matrisinin uygulanarak stratejik kararların geliştirilmesi, aşamalarından oluşmaktadır.

Eğirdir Gölü havzası güneş ve rüzgar enerjisi üretimi açısından uygun iklim verilerine sahip ve bu sayede güneşli günlerde veya kapalı havalarda enerji üretiminin devamlı sağlanabileceği bir bölgedir. Ancak hassas koruma bölgesi olması kara kurulumlarını kısıtlamakta ve yenilenebilir enerji üretimini engellemektedir. Bu nedenle su yüzeyinin kullanılması hem buharlaşmayı azaltacak hem de enerji üretimine katkı sağlayacak bir unsurdur. Aynı zamanda göl yüzeyinde güneş, rüzgar ve dalga enerji sistemlerinin hibrit kombinasyonu ile mevcut su kaynaklarını, dere yatağını veya çevresindeki yeşil alan varlığını etkilemeden temiz enerji elde etmekte mümkün olacaktır. Bu açıdan Eğirdir Gölü Havzası ölçeğinde hibrit yüzer enerji santrali tasarımının geliştirilmesi, arazi koşullarının uygun olmadığı tatlı su alanları için örnek niteliğindedir. Eğirdir özelinde stratejik kararların belirlenmesi de çalışmaya özgünlük kazandırmakta ve Eğirdir için gerekliliğini kanıtlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

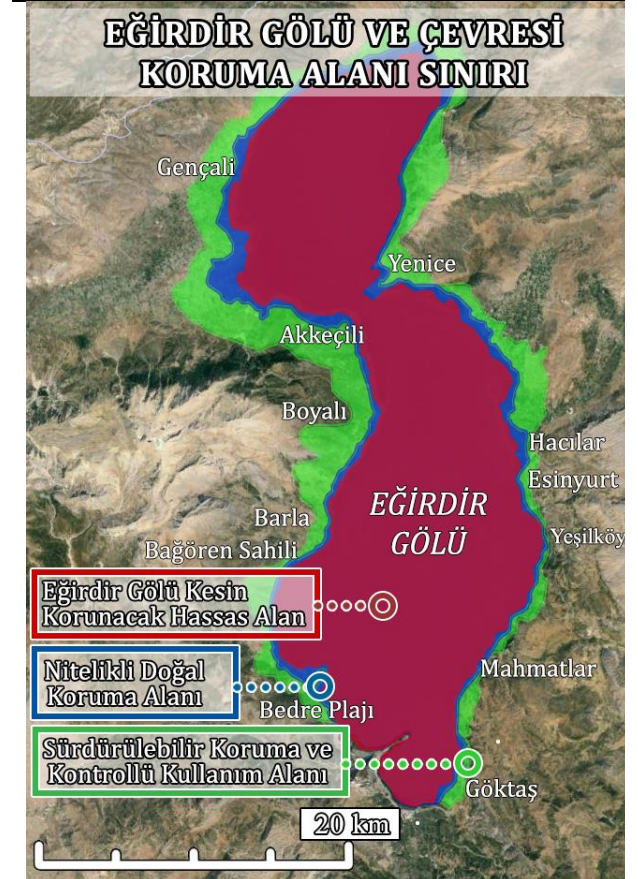
Eğirdir Gölü, Batı Akdeniz Bölgesinde Isparta sınırları içerisinde $37^{\circ} 50' 36''$ Kuzey ve $38^{\circ} 16' 24''$ Kuzey enlemleri ile $30^{\circ} 44' 39''$ Doğu ve $30^{\circ} 58' 08''$ Doğu boylamları arasında yer alan, karstik kayaların aşınması ile tektonik çöküntü üzerinde oluşmuş bir tatlı su göldür [17]. Eğirdir gölü havzasının toplam büyüklüğü 3.020 km^2 , kıyı uzunluğu 150 km ve yüzey alanı ise 468 km^2 'dir. Gölün deniz seviyesinden yüksekliği $917,7 \text{ m}$, ortalama derinliği $10-12 \text{ m}$ 'dir [10, 16]. Kuzey-Güney uzunluğu 50 km , Doğu-Batı genişliği $3-15 \text{ km}$ arasında değişmektedir [8]. Su kalitesinin uygun olmasından dolayı Isparta'nın içme suyu ihtiyacının bir bölümü Eğirdir Gölü'nden sağlanmaktadır. Ayrıca tarımsal sulama ve enerji üretimi bakımından büyük önem taşıyan gölden balıkçılık ve turizm amaçlı da yararlanılmaktadır [8, 10]. Eğirdir Gölü, güneyinde bulunan Kovada Gölü'ne ve Kurudere-Aksu Irmağı üzerinden Akdeniz'e ulaşmaktadır [10]. Kovada hidroelektrik santrallerinin su ihtiyacı bu sayede karşılanmaktadır.

Eğirdir Gölü'nü besleyen Uluborlu-Senirkent yönünden gelen Pupa Çayı, Hoyran Ovasından inen Değirmen Çayı (Hoyran Deresi), Gelendost Çayı (Akçay) ve Güneyden gelen Çaydere önemli akarsulardır [8, 18]. Gölü besleyen bir diğer kaynak suyu Hoyran Gölü'nün kuzeyinden çıkan yeraltı suyudur. Batısında Gençali köyünün altından çıkan Kanlıpalamut pınarı ve güneyden çıkan Karaot Avlağı

pınarı ile Havlutlu pınarı da gölü besleyen başlıca pınarlardır [10].

Çevre ve Orman Bakanlığı, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı ile Antalya Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Müdürlüğü'nün ortak kararı ile Eğirdir Gölü 1996'da doğal sit alanı ilan edilmiştir [18]. Eğirdir Gölü ve çevresi doğal sit koruma alanı bölgeleri ve büyüklükleri Tablo 1'de verilmiştir.

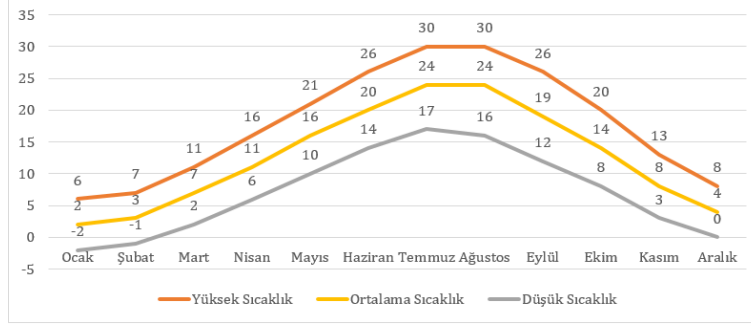
Tablo 1. Eğirdir Gölü ve çevresi koruma alanı sınırları [Yazara ait görsel*, Sit Alanları Yönetim Sisteminden (SAYS) alınan koordinat bilgilerinin Google Earth görüntüsü üzerinde düzenlenmesiyle oluşturulmuştur].



Eğirdir Gölü ve Çevresi Doğal Sit Koruma Alanı (DSKA)	Kesin Korunacak Hassas Alan	47.492 Ha
	Nitelikli Doğal Koruma Alanı	6.160 Ha
	Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı	15.528 Ha
TOPLAM		69.180 Ha
Can Ada DSKA	Nitelikli Doğal Koruma Alanı	6 Ha
Yeşilada DSKA	Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı	14 Ha
TOPLAM		20 Ha

Eğirdir Gölü Havzası, Akdeniz ve İç Anadolu arasında geçiş iklim tipine sahip ve iki bölgenin de etkisinde kalmasından dolayı yaz ayları sıcak ve kısmen kurak, kış ayları soğuk ve yağışlı geçmektedir [3, 19, 20]. Eğirdir'in yıl içerisinde sıcaklık normalleri -2°C ile 31°C arasında değişiklik gösterirken, nadiren -9°C altına ve 34°C üzerine çıkmaktadır [21]. Havzada

sıcaklık güneyden kuzeye doğru azalmaktadır [19]. Haziran ve Eylül ayları arasında sıcak mevsimler yaşanmakta ve günlük ortalama yüksek sıcaklık 26°C'nin üzerinde geçmektedir. En sıcak ay Temmuz ve ortalama yüksek sıcaklık 30°C, düşük sıcaklık ise 17°C olarak görülmektedir. Kasım ve Mart arasında ise soğuk mevsimler yaşanırken günlük ortalama yüksek sıcaklık 11°C'nin altında kalmakta, en soğuk ay Ocak ayında ve bu ayda ortalama yüksek sıcaklık 6°C, düşük sıcaklık -2°C seviyesinde görülmektedir (Şekil 1) [21].



Şekil 1. Isparta Eğirdir ilçesi sıcaklık grafiği [21]

Tablo 2. Isparta Eğirdir ilçesi aylara göre açık ve kapalı gün durumu [8, 21]

Oran	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Daha bulutlu (%)	48	48	43	39	29	10	2	2	12	32	43	51
Daha açık (%)	52	52	57	61	71	90	98	98	88	68	57	49
Yağışlı gün sayısı	6,9	6,6	6,2	6,3	5,0	3,2	1,9	1,5	2,0	3,9	5,2	7,1
Yağış miktarı (mm)	53,4	47,0	39,0	39,8	31,7	17,7	9,6	8,2	13,0	30,3	44,0	57,2
Gün Işığı (h)	9,9	10,8	12,0	13,2	14,2	14,7	14,5	13,6	12,4	11,2	10,1	9,6

Eğirdir'in yıl içerisinde hakim rüzgar yönü genellikle kuzey ve güney doğrultusundadır [19]. Bölgenin en rüzgarlı ayı Şubat ve ortalama rüzgar hızı 13,2 km/h, yılın en sakin ayı Eylül ve ortalama rüzgar hızı 9,9 km/h olmaktadır [21].

Eğirdir Göl suyu sıcaklık değeri ise Şehnaz (2010)'ın çalışmasında 20,8°C ile 27,7°C arasında ölçümlenirken birlikte ortalama su sıcaklığı 25,2°C olarak hesaplanmakta ve bu sıcaklık değerinin her 2,5 m'de yapılan yerinde ölçümler sonucunda derinliğe bağlı olarak da azaldığı belirtilmektedir [22]. Ayrıca bu verileri destekler nitelikte Bulut ve Kubilay (2019)'da çalışmasında, 2013 yılı Nisan, Temmuz, Ekim ve 2014 yılı Ocak ayı içerisinde Eğirdir Gölü su sıcaklığının 4,0-27,7°C arasında değiştiği ve ortalama 14,2°C olduğu sonucuna ulaşmaktadır. Aynı zamanda mevsimlere göre sıcaklık değişimlerinin ilkbaharda 12,4°C, yazın 25,9°C, sonbaharda 13,6°C ve kışın ise 5,0°C ölçüldüğü belirtilmektedir [9]. Güner ve Özgür (2023)'ün çalışmasında ise farklı zamanlarda yapılan ölçümlerde su sıcaklığının en düşük olduğu bölgenin Gelendost ilçesi açıklarının, en yüksek olduğu bölgenin gölün kuzeydoğusu olduğu sonuçlarına ulaşılmaktadır [17].

Eğirdir'de toplam güneşlenme süresi kış aylarında yaklaşık 150 h, yaz aylarında 310-330 h arasındadır. Bu durumda yaz aylarında günlük olarak 9-11 h kesintisiz olarak güneş alan bir bölge olduğu anlaşılmaktadır [8]. Yağmur sezonunda ise Aralık ayı en çok yağmurlu günün olduğu ay olmakla birlikte ortalama yağış 57 mm ve kurak sezonda en az yağmurlu günün olduğu ay Ağustos olmakla birlikte ortalama yağış 8 mm'dir (Tablo 2) [21].

Eğirdir Gölü'nün yıllık buharlaşma miktarı 1.246 mm/yıldır [23]. DSİ 18. Bölge Müdürlüğü tarafından 1975-2015 yılları arasında yapılan ölçümlere göre 1983 yılında en yüksek buharlaşmanın görüldüğü (113 hm³) diğer yıllarda ise sıcaklığa bağlı olarak kısmen azalma kısmen artışın yaşandığı kaydedilmiştir. Gölden buharlaşma ile kaybedilen su miktarı 2013'de 92,64 hm³/yıl, 2015'de ise 82,413 hm³/yıl olarak ölçülmüştür. Bu veriler sonucunda, Eğirdir Gölü su seviyesinin değişmesinde yağış, buharlaşma ve sıcaklık değişimlerinin etkin olduğu sonucuna varılmıştır [19].

Eğirdir Gölü'nün su seviyesinde ki değişimlere neden olan etkenlerin iklim değişikliği, yağış rejimi, buharlaşma, bölgenin su ihtiyacının yoğun olarak gölden karşılanması yada yanlış tarımsal sulama gibi faaliyetlerden kaynaklı olduğu ortadadır [3]. Bu durumda Eğirdir Gölü'nü korumak, sürdürülebilirliğini sağlamak ve yenilenebilir enerji üretimine katkı sağlamak için buharlaşma etkenini minimize eden yüzer sistemler avantaj haline gelmektedir.

2.2. Metot

2.2.1. Eğirdir Gölü havzasında hibrit yüzer enerji santral alanının belirlenmesi

Hibrit yüzer enerji santralinin verimliliğini ve kararlılığını arttırabilmek için uygun yer seçiminin yapılması öncelikle dikkate alınması gereken bir unsurdur. Konu ile ilgili literatür incelendiğinde, yüzer enerji santral alanının konumu belirlenirken Eğirdir Gölü özelinde önemli görülen ve ortak nitelikteki kriterler göz önünde bulundurulmuştur [8, 17, 24, 25]. Çalışmada dikkate alınan kriterler aşağıda verilmiştir.

1. Enerji nakil hatları ile yakınlık,
2. Karadan ve sudan ulaşılabilirlik,
3. Kamu arazisine ait kıyı bağlantısının bulunması,
4. İklim parametrelerinin uygunluğu,
5. Koruma alanlarına olan mesafe.

Eğirdir Gölü, Antalya Kültür Varlıklarını Koruma Kurulu tarafından 07.05.1996 tarih ve 2996 sayılı karar ile 1. ve 3. Derece Doğal Sit Alanı olarak ilan edilmiştir. 2872 Sayılı Çevre Kanunu ve 25687 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Su Kirliliği Yönetmeliği çerçevesine göre 16.06.2012 tarihinde, Eğirdir Gölü ve havzasını kapsayan Özel Hükümler yayımlanmıştır. Eğirdir Gölü Doğal Sit Alanları, 31.11.2020 tarihli ve 31311 sayılı Resmi Gazetede “Doğal Sit-Nitelikli Doğal Koruma Alanı” ve “Doğal Sit-Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı” olarak kabul edilmiştir. 3357 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararı ile “Kesin Korunacak Hassas Alan” olarak ilan edilmiş ve 06.01.2021 tarih ve 31356 sayılı Resmi Gazetede yayımlanmıştır. Bu karara göre Eğirdir Gölü’nün 1. ve 3. Derece Doğal Sit statüleri, “Kesin Korunacak Hassas Alan”, “Doğal Sit-Nitelikli Doğal Koruma Alanı” ve “Doğal Sit-Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı” statülerine dönüştürülmüştür [26, 15].

Eğirdir Gölü ve havzasını kapsayan bu kararlar doğrultusunda, özel hükümlerde yer alan sınırlamalar ve Eğirdir Gölü ve Çevresinin Doğal Sit Koruma Alanı niteliklerine sahip olması nedeniyle kıyıda ve su üzerinde yapılaşma sınırlamaları bulunmaktadır. Bundan dolayı çalışmada enerjinin depolanmadan kullanılabilirliği zorunlu hale geldiğinden şebeke hatları ile bağlantının sağlanabilmesi için enerji nakil hatları ve trafo merkezlerine yakınlık kriteri önem kazanmaktadır.

Enerji santralinde oluşabilecek sorunun hızlı çözümü, kurulum kolaylığı, maliyetin düşürülmesi ve güvenliğin sağlanması açısından, yüzer santral alanına su taşıtları ile erişim sağlandığı gibi kıyıda da ulaşım gerekli görülmektedir. Araç yollarına yakınlık, bu noktada önemli hale gelen ulaşılabilirlik kriteri olmaktadır.

Yüzer enerji santralinin bağlı bulunduğu kıyıda ise özel mülkiyete ait arazi varlığının engel teşkil etmemesi aynı zamanda büyük santral

kurulumlarında gürültü sorununun bölge halkı üzerinde olumsuz etki oluşturmaması için tarım arazilerine, yerleşim alanlarına, açık ve yeşil alanlara, rekreasyon alanlarına uzaklık durumu dikkate alınması gereken bir husustur. Bundan dolayı kıyı ile bağlantıda öncelikle kamuya ait arazi olması durumu gerekli görülen bir kriterdir.

Yenilenebilir kaynaklardan enerji elde edilirken tepe değerlerinin sürekli mümkün olmadığı koşullarda dahi sürdürülebilir enerji temin etmek ve verimliliği sağlamak için hibrit yüzer enerji sistemleri gereklidir. Bu sebeple enerji üretiminin devamlılığı açısından güneş, rüzgar ve dalga enerjisi kombinasyonunda iklim parametrelerinin uygunluğu kriteri göz önünde bulundurulurken yer seçimi yapılmalıdır.

Sulak alanlar genellikle kuş göç yolları üzerinde yer alan ve yerli veya göçmen pek çok canlıların yaşam alanını oluşturan ortamlardır. Enerji santrali kurulumundan önce bu ortamların zarar görmemesi için fauna varlığının araştırılması ve canlıların yaşam alanlarına uzak yerlerin tercih edilmesi gerekmektedir. Ayrıca santral kurulumunda, şebeke bağlantıları sağlanırken hassas yeşil alan varlığına sahip bir kıyının da zarar görmemesi için koruma alanlarına olan mesafe önemli bir kriterdir.

Yer seçimi yapılırken bu kriterlerin önceliği ile ilgili bir standardın olmadığı görülmektedir [8, 17, 24, 25]. Çalışmada Eğirdir gölü ve çevresinin kesin korunacak hassas alan olması gereği ise enerjinin depolanmadan doğrudan elektrik şebekesine verilmesini gerektirmektedir. Bu durumda enerji nakil hatları ile yakınlık kriteri dikkate alınan ilk yer seçim ölçütü olmuş ve Enerji İşleri Genel Müdürlüğü’nün yayınladığı Isparta iline ait trafo merkezlerinin ve enerji nakil hatlarının gösterildiği haritaya göre [8] Eğirdir Gölü çevresi trafo merkezleri belirlenmiştir. Trafo merkezlerinin konumu Google Earth yazılımında da sorgulanarak bu harita ile karşılaştırılmış ve göl kıyısına yakın olarak Bedre Koyu’ndan geçen elektrik nakil hatlarıyla birbirine bağlı Eğirdir ve Barla’da trafo merkezlerinin bulunduğu görülmüştür. Gelendost’da bulunan trafo merkezinin ise göl kıyısına uzak olması durumu, depolama maliyetini arttıracığı ve karadan/sudan erişimi zorlaştıracığı için uygun görülmemiştir. Ayrıca Eğirdir trafo merkezinin bulunduğu kıyının yakınında yerleşim yerinin bulunması durumu da Barla trafo merkezini daha uygun hale getirmiştir (Şekil 2).

Araç yoluna yakınlık, yerleşim yerlerine ve tarım arazilerine mesafe, kıyıda koruma değerine sahip olmayan doğal bitki örtüsünün hakim olması [11] ve Global Solar Atlas / Global Wind Atlas [27, 28] yazılımından elde edilen iklimsel değerlerin uygun olması kriterleri göz önünde bulundurulduğunda Barla trafo merkezine yakın olarak; 38°1'37.20"K enlemi ve 30°49'44.44"D boylamı koordinat noktası uygun yer olarak tespit edilmiştir (Şekil 2).



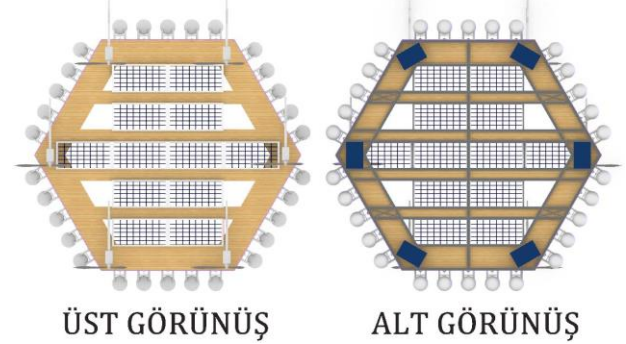
Şekil 2. Eğirdir Gölü ve çevresi çalışma alanı konumu [Yazara ait görsel*, Google Earth görüntüsü üzerinden oluşturulmuştur].

2.2.2. Eğirdir hibrit yüzer enerji santral tasarımı örneğinin geliştirilmesi

Yüzer enerji santral tasarımında; yapı formunun kurulum kolaylığı sağlaması, dalgalı su ortamında köşelerine gelen yükler altında rijitliği koruması, enerji yapılarının bağlantısı sırasında rüzgar türbini açılarının birbirini engellememesi ve kare veya yuvarlak yüzer yapılar üzerinde kurulacak enerji sisteminden elde edilecek güç ile yakın sonuçlar elde edilmesinden dolayı [29] altıgen form tercih edilmiştir.

Çalışmada, altıgen forma sahip yüzer enerji yapılarının Türkiye'de diğer tatlı su alanları için de örnek teşkil etmesi ve uygulama kolaylığı sağlaması için küçük boyutta tasarımı geliştirilerek, kenar uzunluğu 5 m olarak belirlenmiştir. Yüzer yapı üzerinde enerji sistemlerinin ve elektrik bağlantılarının kontrolünün yapılabilmesi noktasında, güneş panellerinin maksimum yerleşim planı dışında kalan tüm boşluklarda ulaşım aksları oluşturulmuştur. Ayrıca, güneş panellerine gerekli olan suyun soğutucu etkisinden daha fazla yararlanmak ve su altı ekosistemlerinin ihtiyacı olan güneş ışığını engellemek için çelik profiller üzerinde PV sistem

kurularak alt kısımları açık bırakılmıştır. PV sistemin kurulduğu yüzeyler dışında kalan bölümler ahşap döşeme ile kaplanarak buharlaşmanın en aza indirgenmesi hedeflenmiştir. Yüzer enerji yapısının tüm bağlantı elemanlarında çelik profiller kullanılmıştır. Yüzdürücü yapı için her altı köşede plastik dubalar tercih edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Yüzer enerji yapısına ait üst görünüş ve alt görünüş

Yüzer yapı üzerinde toplam 12 adet 450W kapasiteli fotovoltaik panel kullanılmıştır. Güneş panelleri, su üzerinde 10°'lik eğim açısındaki GES kurulumlarının karada 30°'ye karşılık geldiğini ve bu açıda rüzgar yüklerinin en düşük seviyede kalacağını belirttiği Dal (2021)'in çalışmasındaki gibi aynı zamanda Global Solar Atlas yazılımında da varsayılan [30], 10°'lik açı ile yerleştirilmiştir. Güneş ışınından daha fazla yararlanmak ve verimi artırmak için de Kaymak ve Şahin (2021)'in çalışmasında belirtilen esnek ve ayarlanabilir parça PV sisteme eklenerek gerektiği durumlarda eğim açısı mevsimsel değişime uygun hale getirilmiştir [31]. PV sıraları arasındaki mesafe ise Yılmaz (2023)'in verdiği aşağıdaki denklem (1), denklem (2) ve denklem (3)'e göre hesaplanmıştır [32].

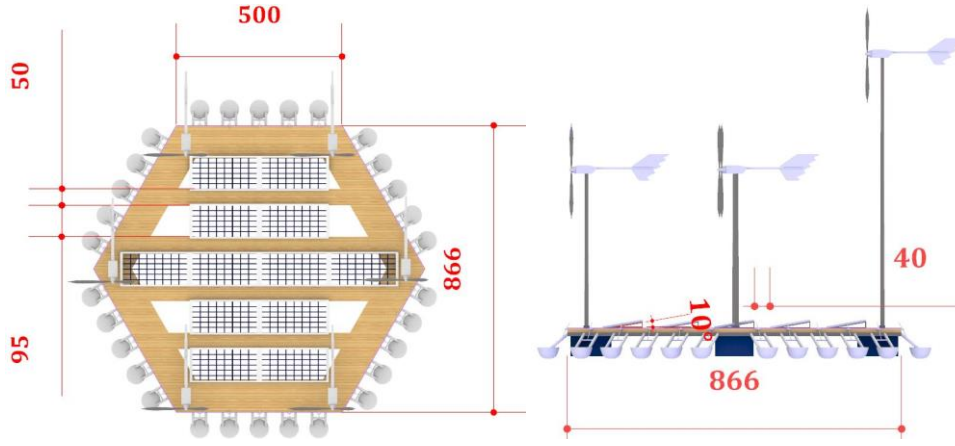
$$hs = 90^\circ - (\varphi) - 23^\circ \quad (1)$$

$$h = L \times \sin(a) \quad (2)$$

$$d = h / \tan(hs) \quad (3)$$

Bu denklemde güneşin derece cinsinden minimum yüksekliği (hs) hesaplanırken, Eğirdir Gölü üzerinde uygun yer olarak belirlenen konum enlemi (φ) 38° alınmıştır. Güneş panelinin arkada kalan tarafının yerden yüksekliği (h) hesaplanırken, güneş panelinin kısa kenar uzunluğu (L) 104 cm ve eğim açısı (a) 10° olarak girilmiştir. Sonuçta güneş paneli dizileri arasındaki mesafe (d) en az ~33 cm olarak bulunmuş ve 40 cm bırakılmıştır (Şekil 4).

Yüzer yapının her köşesinde 6 adet 4 kW kapasiteli 3 kanatlı kuyruklu rüzgar türbini kullanılmıştır. Aynı hizadaki türbinlerin rüzgar alış açılarının kesişmesini önlemek için ön ve orta sırada 4 m, arka sırada 7 m direk boyu tercih edilmiştir (Şekil 4). Firma ürünlerinde marka ismi kullanmak yerine Fotovoltaik panel "PV" kodu ve rüzgar türbini "RT" kodu ile belirtilmiş ve özellikleri Tablo 3'de verilmiştir [33, 34].



Şekil 4. Yüzer enerji yapısı boyutları ve yan görünüş (cm)

Tablo 3. Yüzer enerji yapısı üzerinde kullanılan güneş ve rüzgar enerjisi firma ürünü özellikleri [33, 34]

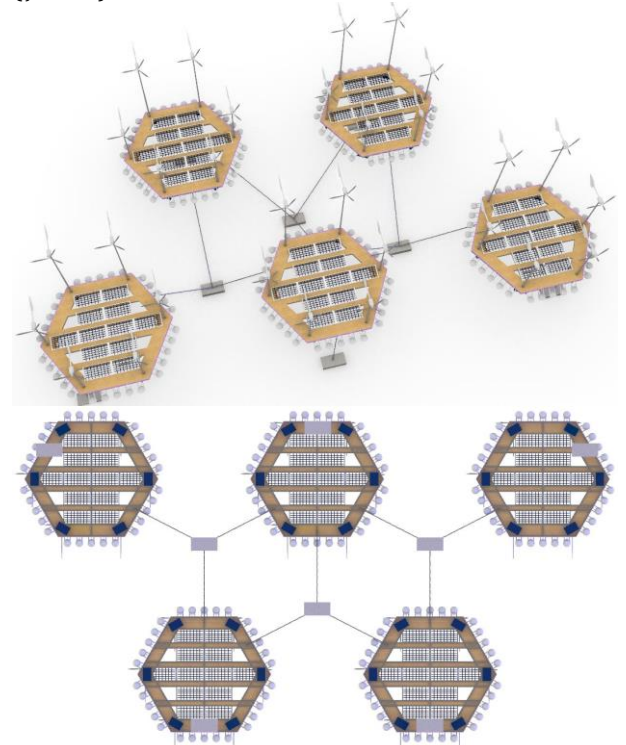
Firma ürünü	PV (Mono-Perc)	Firma ürünü	RT (3 Adet Ultra Sessiz Fiber Glass kanat)
<i>Maksimum güç (PV_{Güç})</i>	450 W	<i>Anma Gücü</i>	4 kW
<i>Modül Verimi</i>	% 20,7	<i>Maksimum Çıkış Gücü</i>	5 kW
<i>Hücreler</i>	144	<i>Rotor çapı</i>	2,85 m
<i>Panel Boyut</i>	2095 x 1039 x 35 mm	<i>Rotor ağırlığı</i>	68 kg
<i>Ağırlık</i>	24,5	<i>Başlangıç Rüzgar hızı</i>	2,5 m/s
<i>Çalışma Modülü Sıcaklığı (OC)</i>	-40 °C ; +85 °C	<i>Anma Rüzgar Hızı</i>	15 m/s
<i>Nominal Hücre Sıcaklığı (NOCT)</i>	42 ± 2°C	<i>Maksimum Rüzgar Hızı</i>	50 m/s

Dalga enerjisi rüzgar basınçları ve fiziksel koşullardan etkilendiği için dalga yüksekliği, dalga boyu ve dalga periyodu elde edilecek enerjiyi belirlemektedir. Bu nedenle dalga enerjisinden elektrik üretimi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre farklılık göstermektedir. Yüzer enerji yapısında ideal dalga dönüştürücüsünü belirlemek için Ding vd. (2015)'in çalışmasında geçen bölgenin konumu, çalışma prensibi ve yüzer yapı büyüklüğü kriterleri dikkate alınmıştır [35]. Bu durumda boyut olarak yüzer yapıyla entegre olabilen, farklı hareket yönlerine uyumlu ve kıyıya yakın yerlerde kullanılan salınlı gövde sistemi tercih edilmiştir [35, 36].

Çalışmada yüzer enerji yapısının tüm kenarları boyunca dalga enerji dönüştürücüsü yerleştirilerek yapıya gelen dalga etkisinin sönümlenmesi ve enerji üretimi hedeflenmiştir. Yüzer yapı ve dalga zayıflatıcı şamandıra arasında doğrusal jeneratöre sahip enerji dönüştürücüsü için Guo et al.(2022)'un çalışmasında tanımlanan yüzer iki gövdeli çok noktalı dalga emicili dönüştürücü tercih edilmiştir [37]. Ancak dalga enerjisi üretici firmaların ürünleri ve literatür incelendiğinde [38, 39, 40, 41, 42], yüzer enerji yapı boyutuna uygun ve enerji hesaplarının verildiği sisteme rastlanmamıştır. Bundan dolayı şamandıranın çapı 6 m, çelik kolun uzunluğu 12 m ve güç ünitesi değeri (PTO) 30 kW olan WaveStar C6-600 kW modeli dalga enerjisi dönüştürücüsü 1:20 ölçeğinde küçültülerek kullanılmıştır [38]. Kullanılan bu sistem sayesinde kıyı şeridinde ve küçük dalga yüksekliğinde enerji üretebilmek mümkün hale gelmiştir. Tek bir yapıda birbirine bağlı olan bu sistem, dalganın

gelmesiyle birlikte şamandıraların yukarı ve aşağı hareket etmeleri sonucu elektrik üretmektedir.

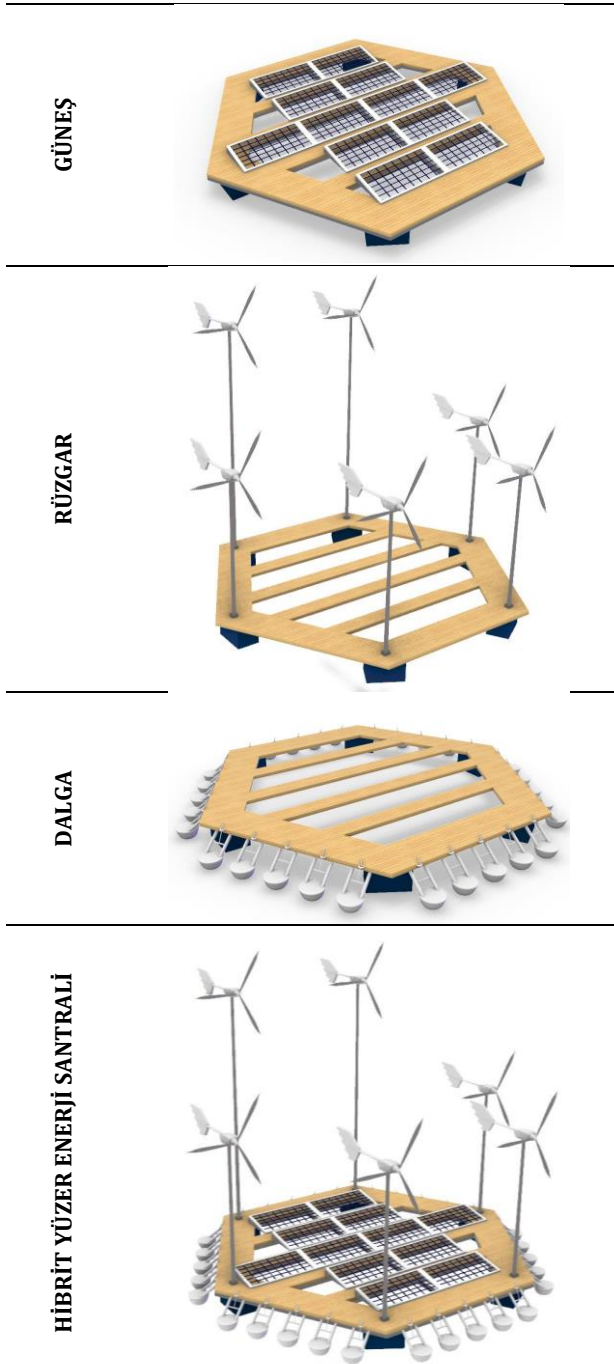
Yüzer enerji yapılarının su üzerindeki serbest dolaşımını önlemek ve aralarında 6 m boşluk bırakılarak birbiri ile bağlantısını sağlamak için üçlü gruplar birbiri ile çelik halat kullanılarak bağlanmış ve su altına yerleştirilen beton bloklara sabitlemiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Yüzer enerji yapılarının birbiri ve su altında beton bloklar ile bağlantı detayı

2.2.3. Yüzer enerji santrali enerji potansiyelinin hesaplanması

Eğirdir Barla mevkiî kıyı alanı, yüzer enerji santrali açısından en uygun alan olarak tespit edilmiştir. Bölgenin güneş ve rüzgar enerji potansiyeli belirlenirken Global Solar Atlas ve Global Wind Atlas yazılımı kullanılmıştır. Ancak Türkiye iç suları dalga potansiyeline ait verilere ulaşamadığı için yüzer iki gövdeli çok noktalı dalga emicili dönüştürücünün yıllık toplam enerji potansiyeli hesaplara dahil edilmemiştir. 38°1'37.20"K enlemi ve 30°49'44.44"D boylamı için enerji hesapları yapılan yüzer enerji santralini görseli Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Eğirdir Gölü hibrit yüzer enerji santral tasarımı

Yüzer enerji santralini bulduğu konuma ait güneş enerji potansiyeli hesaplanırken Global Solar Atlas yazılımında, yüzer büyük ölçekli PV sistemi tipi seçilerek 10°'lik eğim açısı dikkate alınmıştır. 1.000 kWp kurulu güç potansiyeline göre yıllık ortalama üretilen fotovoltaik güç çıkış değerleri ve koordinat noktasına ait 10 m yükseklikte rüzgar ortalama güç yoğunluğu verileri Tablo 4'te gösterilmiştir [27, 28].

Tablo 4. Koordinat noktalarına ait fotovoltaik güç çıkışı ve rüzgar ortalama güç yoğunluğu [27, 28]

38°1'37.20"K enlem ve 30°49'44.44"D boylam için:		
Yıllık Ortalama Üretilen Güç Çıkışı	PV panellerinin eğimi: Varsayılan (10°)	1,395 GWh
	Referans kurulu güç: 1.000 kWp	
Rüzgar Ortalama Güç Yoğunluğu	10 m Yükseklikte Rüzgar hızı	231 W/m ² 4,76 m/s

Yüzer enerji santraline ait güneş enerji potansiyeli; güneş enerji panellerinin toplam kurulu gücünün ($P_{VGüç}$) hesaplandığı denklem (4) ve üretilen toplam güneş enerjisinin ($P_{Güneş}$) hesaplandığı denklem (5)' e göre bulunmuştur.

$$P_{VGüç} \text{ (kW)} = P_{Güç} \times P_{Adet} \quad (4)$$

$$P_{Güneş} \text{ (kWh/yıl)} = P_{VGüç} \text{ (kW)} \times [1.395.000 \text{ (kWh/yıl)} / 1.000 \text{ (kW)}] \quad (5)$$

Denklem (4)'e göre $P_{VGüç}$ hesaplanırken maksimum güç ($P_{Güç}$) değeri 450 Watt olan güneş panelinin (Çizelge 4), 12 adet kullanılması ile 5,4 kW elde edilmiştir. Denklem (5)'e göre üretilen toplam güneş enerjisi ($P_{Güneş}$), Çizelge 5'de verilen Global Solar Atlas yazılımı yıllık ortalama üretilen güç çıkışı değerinin (1.395.000 kWh/yıl) referans kurulu güce oranının (1.000 kW), güneş enerji panellerinin toplam kurulu güç değeri (5,4 kW) ile çarpımı sonucu 7.533 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır.

Yüzer enerji santraline ait rüzgar enerji potansiyeli; rüzgar türbininin toplam süpürme alanı (R_{TAlan}) denklem (6)'da, rüzgar anlık gücü ($P_{Güç}$) denklem (7)'de ve üretilen rüzgar enerjisi yıllık toplamı ise denklem (8)'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$R_{TAlan} \text{ (m}^2\text{)} = R_{SAlan} \text{ (m}^2\text{)} \times R_{Adet} \quad (6)$$

$$P_{Güç} = \text{Güç Yoğunluğu} \times R_{TAlan} \quad (7)$$

$$P_{Rüzgar} = P_{Güç} \text{ (kW)} \times 8.760 \text{ (h/yıl)} \quad (8)$$

Rotor çapı 2,85 m olan rüzgar türbininin (Çizelge 4) süpürme alanı (R_{SAlan}) πr^2 formülünden 6,38 m² bulunmuştur. Yüzer yapı üzerinde rüzgar türbininin 6 adet kullanılmasıyla toplam süpürme alanı (R_{TAlan}) denklem (6)'ya göre 38,28 m² olarak hesaplanmıştır. Rüzgar anlık gücü ($P_{Güç}$) ise 38,28 m²'lik toplam süpürme alanı (R_{TAlan}) ve Global Wind Atlas yazılımı 10 m yükseklikte 0,231 kWh/m² rüzgar ortalama güç yoğunluğu değerine (Çizelge 5) göre denklem (7)'de 8,84 kWh olarak hesaplanmıştır. Denklem (8)'de

üretilen rüzgar enerjisi yıllık toplamı ise 8.760 saat (bir yıl) için 77.438,4 kWh/yıl olarak bulunmuştur.

Güneş ve rüzgar enerjisi yıllık güç potansiyeli toplamı 84.971 kWh/yıl'dır. Yüzer enerji yapı sisteminin 6 adet kullanılmasıyla yıllık santral güç potansiyeli de 509.826 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır.

Bir evin günlük elektrik ihtiyacı 10 kWh [43] ise yıllık ihtiyacı 3.650 kWh'dir. Bu durumda toplam konut sayısı denklem (9)'a göre yaklaşık 140 ev olarak bulunmuştur.

$$\text{Toplam Konut Sayısı} = \frac{\text{Santral Toplam Güç Potansiyeli (kWh/yıl)}}{3.650 \text{ (kWh/yıl)}} \quad (9)$$

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Eğirdir hibrit yüzer enerji santralinin GZFT (SWOT) analizi değerlendirmesi

GZFT (SWOT) analizi bir projenin başarısını etkileyebilecek iç ve dış faktörlerin değerlendirildiği ve açığa çıkarıldığı analiz yöntemidir [44]. Bu yönü ile Eğirdir özelinde hibrit yüzer enerji santralinin gerekliliğinin ortaya konulması için güçlü (S) ve zayıf yönlerini (W), fırsatları (O) ve tehditlerini (T) ortaya çıkartan GZFT Analizi uygulanmıştır.

Güçlü Yönler

- Eğirdir yüzer enerji santrali 509.826 kWh/yıl potansiyele sahiptir. Bu sayede merkezi elektrik sistemine katkı sağlayarak yaklaşık 140 konutun enerji ihtiyacı karşılanabilecek durumdadır.
- Yüzer enerji santralinin tüm iklim koşullarına uyumlu olabilecek güneş, rüzgar ve dalga enerjisi hibrit sisteminden oluşması, enerji üretiminde sürekliliği mümkün hale getirmektedir.
- Tatlı su kaynaklarında, göl, gölet veya su depolama alanlarında yüzer fotovoltaik panellerin kullanımı, su buharlaşma oranının azaltılmasında olumlu bir etkiye sahiptir [45, 46]. Suyun buharlaşmasını yaklaşık % 70 oranında düşürmektedir [47]. Eğirdir Gölü için tasarlanan yüzer enerji yapısının da su yüzeyini kaplaması, buharlaşmanın ve yosun oranının azaltılmasında önemli bir faktör olmaktadır.
- Hava sıcaklığının ortalama 30°C-40°C arasında olması panelin verimliliğini düşürmektedir [48]. Yüzer PV santralleri ise geleneksel karatabanlı sistemlere göre % 10'dan fazla performans göstermektedir [45, 47]. Eğirdir Gölü'nün ortalama en yüksek su sıcaklığının 25 °C olması ise [8] güneş panellerinin soğutulması için yeterli koşulları sağlamaktadır.
- Yüzer enerji yapısının yol kenarına yakın konumda tercih edilmesi karadan ve su yolu ile ulaşımı kolaylaştırmakta aynı zamanda sistemin kontrollünün yapılmasını ve müdahaleleri hızlandırmaktadır.

- Yüzer enerji yapısının yerinde/sabit bir taşıma sistemine bağlı olmaması, taşınabilir ve yer değiştirilebilir olmasını kolaylaştırmaktadır. Bu sayede bol güneş ışığına sahip herhangi bir yere taşımak [45] ve acil durumlarda yer değiştirmek mümkün hale gelmektedir.
- Yerleşim yerlerinden uzak ve kıyının açığında konumlandırılması güvenliği arttırmakta ve insanlar üzerindeki gürültü algısını azaltmaktadır.
- Verimli araziler üzerinde kurulmaması, çevrenin korunması açısından önemlidir [45]. Yüzer enerji santralinin bulunduğu konumun ve kıyının flora ve fauna yaşamını tehdit edecek niteliklerinin bulunmaması da bu yönden önemli görülmektedir.
- Yüzer enerji yapısının küçük boyutlardaki tasarımı kurulum kolaylığı sağladığı için bulunduğu konumun enerji potansiyeline ve enerji ihtiyacına göre sayıca artırılabilir veya azaltılabilir hale gelmektedir.
- Merkezi elektrik dağıtım ağına bağlı olması, depolama yeri ihtiyacı ve ilave inşaat maliyeti oluşturmadan hızlı çözüm sağlamaktadır.
- Yüzer yapılar, ultraviyole ışınlara dayanabilen ve korozyona karşı dirençli, yüksek yoğunluklu polietilen kullanılarak % 100 geri dönüştürülebilir sistemlerdir [45]. Plastik duba üzerinde yüzer yapının tasarlanması da uzun vadede korozyon riskini düşürmektedir.
- Yüzer PV enerji santrallerinin güneş radyasyonunu düşürmesi, su kalitesini artırması ve alg büyümesini azaltması sayesinde [47], Eğirdir göl tabanında da aynı etki söz konusu olacaktır.
- Eğirdir'de güneş ışınım değerlerinin yüksek olması ve rüzgar hızının uygun olduğu alanların kıyıda açıkta bulunması, dışardan erişim seviyesini düşürmekte ve vandalizm etkisini azaltmaktadır.
- Kara kurulumlarına göre yüzer enerji santrallerinin daha az toz ve kirlenmeye maruz kalması aynı zamanda temizliğin daha kolay yapılabilmesi sayesinde [49], Eğirdir Gölü üzerinde kurulacak sistemi de avantajlı hale getirmektedir.
- Yüzer enerji santralinin kıyıda açıkta kurulması, daha geç gün batımına ve daha uzun sürede enerji üretimine katkı sağlamaktadır. Ayrıca karada gölge oluşturan ve kurulum alanındaki bitkilerin kesilmesini de önlemektedir.
- Yüzer enerji sistemi Eğirdir göl suyunun soğutucu etkisine maruz kaldığı için daha az ısı adası etkisi oluşturmaktadır.
- Enerji sisteminden üretilen elektrik doğrudan elektrik şebekesine/trafo merkezlerine bağlanması ile iletim kaybı azalmakta ve mevcut altyapı kullanılmaktadır.

Zayıf Yönler

- Eğirdir Gölü'nün iklim verilerine ait meteoroloji istasyonu bilgilerinin ücretli olması ve detaylı ölçümlerin yapıldığı bu bilgilerin temin edilememesi aynı zamanda dalga potansiyeline ait ölçümlere de ulaşılamaması santral toplam güç

potansiyelinin yaklaşık olarak hesaplanmasını gerektirmiştir.

- Yüzer enerji yapısının göl kıyısına yakın konumlandırılması bazı kişiler üzerinde manzarayı engellediği gerekçesiyle estetik kaygılar oluşturabilmektedir.
- Tatlı su alanlarında yüzer enerji santrali kurulumlarının ve hibrit sistemlere ilişkin teknolojilerin erken bir aşamada olması [45], kamu ve yerel çevre üzerinde güvenilirliği azaltmaktadır.
- Hibrit yüzer enerji santrallerinin model aşamada olması, tatlı sulara uygulanan örneklerin bulunmaması ve yerinde deneyimlenen bir teknoloji olmaması, tecrübe ve bilgi eksikliğini meydana getirmektedir.
- Yüzer enerji santralının uzun vadede bakım gereksinimleri ve dayanıklılığının henüz ölçülemediği olması [45], belirsizliğe sebep olduğu için talebi azaltmaktadır.
- Yerel elektrik dağıtım kuruluşları ile kamu ve özel sektörün işbirliği eksikliği [45], yatırım noktasında sorunlar oluşturmaktadır.
- Küresel iklim değişikliği ve sıcaklık artışından dolayı Eğirdir Gölü'nü besleyen kaynakların zayıflaması, göl seviyesinin kritik bir noktaya düşmesine ve su ihtiyacının birincil problem olarak görülmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı yüzer enerji yapılarının buharlaşma üzerinde ki etkisi üzerinde durulmamıştır.

Fırsatlar

- Eğirdir gölü ve çevresinin Hassas Koruma Alanı olması kıyı yapılaşmalarında engel oluşturmaktadır. Bu durum ise yüzer enerji yapılarının uygun kıyı bölgelerinde, göl üzerinde yaygınlaştırılmasını gerekli hale gelmektedir.
- Yüzer enerji sistemleri fosil kaynak tüketimine göre daha az çevresel kirlilik oluşturmaktadır [50]. Bu açıdan Eğirdir gölünde planlanan yüzer enerji santralının yerel ve bölgesel ölçekte temiz enerji üretimine katkı sağlaması, teşvik edici bir unsur olmaktadır.
- Eğirdir özelinde tasarlanan yüzer enerji santrali diğer tatlı su kaynaklarında kurulacak sistemler açısından teknoloji ve bilgi kazanımı hususunda fizibilite niteliği taşımaktadır.
- Eğirdir özelinde çalışılan projenin uygulanmasıyla, yüzer hibrit enerji sisteminin çevresel, sosyal ve ekonomik katkılarının incelenmesi ve karşılaştırılması mümkün yapısal problemlerin daha küçük yapı boyutunda gözlemlenmesi sağlanabilecektir.
- Küçük boyutta ki yüzer yapı üzerinde dalga enerji dönüştürücülerinin geliştirilmesi ve tek bir yapı üzerinde farklı enerji üretim teknolojilerinin birlikte kullanılmasıyla ihracat pazarına katkı sağlanabilecektir.
- Küçük ölçekte yüzer enerji santralının Eğirdir'de uygulanmasıyla Eğirdir'in destinasyon cazibesini ve istihdamı arttırmak mümkün olacaktır.

- Çevresel tahribatı ve ekolojik zararı en aza indiren aynı zamanda su kaynaklarını koruyan yüzer enerji üretiminin geliştirilmesiyle, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine ulaşılabilecektir [46].
- Yüzer enerji santralleri düşük karbon emisyonuna sahip teknolojilerdir [47, 50]. Bu yönü ile Eğirdir özelinde tasarlanan hibrit sistemin çevresel tüm boyutlarının ele alınması ve fosil kaynak kullanımını azaltacak çözümlerin Türkiye ölçeğinde geliştirilmesi mümkün olacaktır.
- Boş su üzeri alanların kullanımı arazi ihtiyacı ve hazırlığı gerektirmediği için [45, 49], coğrafik anlamda kara kurulumu zorluklarının önüne geçilmektedir.
- Avrupa Birliği'nin entegre açık deniz elektrik ağlarını geliştirilmesi [50], Türkiye'nin de fosil yakıt endüstrisine göre çevreyi kirletmeyen projeler üretmesi, yerel enerji üretimini arttırması ve daha hızlı sonuç alınması noktasında önünü açmaktadır.
- Yüzer güneş santralleri, kolay ve hızlı mühendislik, dağıtım ve kurulum avantajına sahiptir [45, 49]. Böylece tatlı su kaynakları üzerinde kurulacak sistemler kara kurulumlarına göre daha hızlı bir sonuç vermektedir.
- Eğirdir ve Türkiye genelinde yüzer enerji sistemlerinin geliştirilmesiyle yenilikçi iş modelleri oluşturmak ve yerli üretimi arttırmak mümkün hale gelecektir.
- Dalga enerjisi teknolojileri diğer enerji üretim teknolojilerine göre nispeten daha gelişmiştir [50]. Bu sayede Eğirdir'de geliştirilecek dalga dönüştürücüsü ile küçük dalga boyuna sahip göl yüzeylerinde ve diğer bölgelerde kullanımı söz konusu olacaktır.
- Yüzer enerji teknolojilerinde gelişen yeniliklerin bulunması [45] ve yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğin payının artırılmasına yönelik AB teşvikleri sayesinde [50] Türkiye'nin bu yönde girişimi artacaktır.

Tehditler

- Eğirdir Gölü ve çevresinin Hassas Koruma Alanı olması hibrit yüzer enerji sistemi kurulumunda yasal zorluklar yaşanmasına ve göl üzerinde/yakın çevresinde bu tür faaliyetlerin engellenmesine neden olmaktadır.
- Uzun vadede su altında ve kıyıda çevresel etki analizlerinin yapıldığı benzer çalışmaların bulunmaması, yüzer enerji sistemleriyle ilgili test ve standart prosedürlerin eksikliği [45], potansiyel artışı olumsuz etkilemektedir.
- Türkiye'de yüzer enerji santrallerinden üretilen elektriğin toplam kurulu güç kaynakları içerisinde henüz önemli bir payının bulunmaması, ihtiyaç oranını düşürmektedir.
- Yüzer enerji santrali tesis kurulum detaylarına ait yasa ve yönetmeliklerinin bulunmaması, projelerin belli standartlar dışında planlanmasına sebep olmaktadır.

- Türkiye yenilenebilir enerji teşvik programına göre yüzer santral kurulumlarına yönelik teşviklerin bulunmaması bu tür projelerin ilerlemesini yavaşlatmaktadır.
- Yüzer PV sistemlerinin kurulum maliyetinin geleneksel PV sistemlere göre daha yüksek olması [47] yatırımları azaltmaktadır.
- Güneş paneli ve rüzgar türbini fiyatlarının devamlı artışı, sistem maliyetinin yükselmesine ve ekonomik kaygılara sebep olmaktadır.
- Güneş yoğunluğu, ortam sıcaklığı, rüzgar hızı, su kütlesi, kir ve toz seviyesi ve PV modüllerinin eğim açısı gibi birçok çevresel ve operasyonel parametreye bağlı olarak elektrik üretiminin değişmesi [47], tüm hususların göz önünde bulundurulmasını zorunlu hale getirmektedir.
- Güneş panellerinin zahmetli bakım ve onarımı [45], ayrıca PV üzerinde kuşların yol açacağı kirlere

ve temizliğinin düzenli yapılmaması sorunu, üretilen enerji miktarının azalmasına neden olacaktır.

3.2. GZFT matrisi ve stratejik önerilerin geliştirilmesi

GZFT matrisi çeşitli sistem bileşenlerinin sürdürülebilirliğini değerlendirmek için kullanılan bir araçtır ve sistemi daha sürdürülebilir hale getirmek için iyileştirmelerin yapılabileceği alanları belirlemektedir [44]. Bu bölümde, Türkiye tatlı su alanlarında yüzer enerji sistemi projelerinin ilerlemesine de katkı sağlayacak, öneri olarak geliştirilen Eğirdir hibrit yüzer enerji santrali tasarımını en üst düzeye çıkarmak ve uygulanabilirliğini arttırmak için GZFT analizine dayalı GZFT Matrisi stratejik önerileri çıkartılmıştır.

Tablo 5. Eğirdir hibrit yüzer enerji santrali tasarımına ait GZFT Matrisi stratejik kararları

GZFT Matrisi	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler
Fırsatlar	<u>Strateji (GF)</u>	<u>Strateji (ZF)</u>
	GF-1 Eğirdir Gölü hassas koruma alanında yüzer yenilenebilir enerji üretimine yönelik tanıtımların yapılması,	ZF-1 İklim verilerinin ölçülmesi,
	GF-2 Teknolojik ilerlemelerin desteklenmesi,	ZF-2 Yüzer enerji santrali ve rekreasyon alanlarının ilişkilendirilmesi,
	GF-3 Yenilikçi iş kollarının oluşturulması,	ZF-3 Güvenilirliğin artırılması,
	GF-4 Ulusal kararların alınması,	ZF-4 Küresel ısınma etkilerinin belirlenmesi.
Tehditler	<u>Strateji (GT)</u>	<u>Strateji (ZT)</u>
	GT-1 Yerel farkındalığın artırılması,	ZT-1 Devlet teşviklerinin sağlanması,
	GT-2 Ulusal farkındalığın artırılması,	ZT-1 Yenilenebilir enerji üretim stratejilerinde yüzer enerji destek politikalarının geliştirilmesi,
	GT-3 ÇED Raporlarının sunulması,	ZT-1 Yasa ve yönetmeliklerin belirlenmesi,
	GT-4 İş birliğinin yapılması,	ZT-1 Mali kısıtlamaların giderilmesi.
	GT-5 Tam yüzer sistemlerin geliştirilmesi,	
GT-6 Operasyon ve bakımının yapılması.		

Strateji (GF)

GF-1: Eğirdir Gölü Hassas Koruma Alanında Yüzer Yenilenebilir Enerji Üretimine Yönelik Tanıtımların Yapılması: Tam yüzer sistemlerin teknolojik detaylarının, kullanım alanlarının, çevresel etkilerinin ve fosil kaynak kullanımına kıyasla avantajlarının ortaya konulduğu, Türkiye genelinde kurum bilgilendirmeleri yapılmalı ve Eğirdir özelinde kararların alındığı toplantılar düzenlenmelidir.

GF-2: Teknolojik İlerlemelerin Desteklenmesi: Eğirdir Gölü tatlı su alanının korunarak yüzer yapı üzerinde enerji üretiminin sağlanmasına ve Türkiye geneli gelişmelerin hızlandırılmasına yönelik üniversite çalışmaları ve ARGE projeleri desteklenmeli, özel sektör teşvik edilmeli, yerli hibrit yüzer enerji teknolojisinin geliştirilmesi sağlanmalıdır.

GF-3: Yenilikçi İş Kollarının Oluşturulması: Eğirdir Gölü ve çevresinde yerel ve bölgesel ekonominin desteklenmesi, yeni istihdam alanlarının oluşturulması, yenilenebilir enerji üretiminde yüzer sistemlerin arttırılmasına yönelik çalışmalar yapılmalıdır.

GF-4: Ulusal Kararların Alınması: Türkiye geneli yüzer enerji santrali tesis kurulumlarında su kaynaklarının korunmasını göz önünde bulunduran, iklim koşullarına uygun üst ölçekte plan kararları düzenlenmeli ve Eğirdir için özel hükümler geliştirilmelidir.

GF-5: İhracat ortamının oluşturulması: Tatlı su alanları için küçük boyuttaki yüzer yapı üzerinde enerji sistemlerine ait yerel üretim desteklenerek ülke içinde ve dışında ihracat sağlanmalıdır.

Strateji (GT)

GT-1: Yerel Farkındalığın Arttırılması: Eğirdir göl yüzeyinde kurulacak yüzer enerji santralinin buharlaşma üzerindeki olumlu çevresel etkilerinden bahsedildiği ve tatlı su alanları için faydalarının açıklandığı çalıştay ve toplantılar düzenlenmelidir.

GT-2: Ulusal Farkındalığın Arttırılması: Türkiye tatlı su kaynaklarında, uygun göl ve göletlerde yüzer enerji potansiyelinin ve yüzer enerji üretiminin gerekliliğinin ortaya konulduğu kongre ve sempozyumlar düzenlenmeli, basında kısa tanıtımları yapılmalıdır.

GT-3: ÇED Raporlarının Sunulması: Eğirdir hibrit yüzer enerji santral tasarımının uygulanarak uzun vadede çevresel etki boyutu gözlenmelidir.

GT-4: İş Birliğinin Yapılması: Dünyada yüzer enerji santral kuruluşlarının bulunduğu ülkeler ile iş birliği yapılmalı ve Türkiye’de teknolojik ilerleme sağlanmalıdır.

GT-5: Tam Yüzer Sistemlerin Geliştirilmesi: İklim değişkenlerine göre (güneşlenme, rüzgar yönü, dalga boyutu vb.) yer değiştirebilen, tüm koşullarda elektrik üretime devam eden, her büyüklüğe uygun tasarlanabilen ve tamamen yüzer yapı tipleri geliştirilmelidir.

GT-6: Operasyon ve Bakımının Yapılması: Yüzer enerji santralinde kirleticilerden dolayı elektrik üretiminin azalmaması, sistem kontrollerinin sürekli yapılması ve istihdam ortamının oluşturulması için devamlı çalışan bulundurulmalıdır.

Strateji (ZF)

ZF-1: İklim verilerinin ölçülmesi: Eğirdir hibrit yüzer enerji santraline ait toplam güç potansiyel hesaplarının yapılabilmesi için su üzerinde farklı noktalarda ölçüm istasyonları kurularak güneş, rüzgar ve dalga verileri elde edilmelidir. Ayrıca meteoroloji müdürlüklerinden uzun vadede iklim raporları temin edilmelidir.

ZF-2: Yüzer enerji santrali ve rekreasyon alanlarının ilişkilendirilmesi: Yüzer enerji santralinin Eğirdir’de ortam kullanıcıları tarafından benimsenmesi, Türkiye genelinde bu proje uygulamalarının artırılması için farklı fonksiyon alanları ile ilişkisi kurulmalıdır. Kıyı rekreasyon alanlarına yakın konumlandırılarak üretilen enerjinin kamu yararına kullanılması sağlanmalı veya yerel ve yabancı turisti çekecek eklenip çıkartılabilen yeşil alan yapıları tasarlanarak alternatif mekanlar oluşturulmalıdır.

ZF-3: Güvenilirliğin artırılması: Eğirdir özelinde planlanan yüzer enerji santralinin kurulumu yapılarak, uzun vadede gözlem ve incelemeler sonucunda diğer tatlı su alanları için hibrit enerji üretim tekniklerinin belirlendiği olumlu ve olumsuz sonuçlar raporlanmalıdır.

ZF-4: Küresel ısınma etkilerinin belirlenmesi: Yenilenebilir enerjinin fosil kaynak kullanımına göre çok daha az karbon salınımı özelliğine sahip olması, yüzer enerjinin gelişmesinde önemli bir etkidir. Bu nedenle Eğirdir hibrit yüzer enerji santralinin küresel boyutta çevresel etkilerinin değerlendirilmesi için çalışmalar yapılmalı ve faydalı yönleri ortaya konulmalıdır.

Strateji (ZT)

ZT-1: Devlet teşviklerinin sağlanması: Türkiye genelinde ve Eğirdir özelinde hibrit yüzer enerji

santrali kuruluşları için kamu teşvikleri artırılarak, karada ve su üzerinde yenilenebilir enerji teknolojilerindeki gelişmeler ilerletilmeli ve üretim boyutları ortaya konulmalıdır.

ZT-2: Yenilenebilir enerji üretim stratejilerinde yüzer enerji destek politikalarının geliştirilmesi: Türkiye’de yüzer enerji sistemlerinin yenilenebilir enerji üretiminde önemli bir konuma gelmesi için dünya örnekleri incelenerek bilgi eksikliğinin giderilmesi noktasında uluslararası proje ortaklığı başlatılmalı ve üniversiteler ile iş birliği yapılarak akademik çalışmalar desteklenmelidir.

ZT-3: Yasa ve yönetmeliklerin belirlenmesi; Türkiye’de yenilenebilir enerji firmalarının ve özel sektörün yüzer yenilenebilir enerji kuruluşlarına yönelik çalışmalarının ilerlemesinde mali kaygıları gideren kamu ortaklıkları oluşturulmalı, teşviklerin artırılması için yasa ve yönetmelikler hazırlanmalıdır.

ZT-4: Mali kısıtlamaların giderilmesi; Yenilenebilir enerji sektöründe artan fiyatların kontrolünün sağlanması ve kurulum maliyetlerinin azaltılması yönünde kurumlara fizibilite raporları sunulurken, bilgilendirmeler yapılmalıdır.

4. Sonuç

Türkiye’de, küresel iklim değişikliği etkisini en aza indirmek, enerji üretiminde fosil kaynak kullanımını azaltmak ve sürdürülebilir temiz enerji üretimini arttırmak için yenilenebilir enerji politikaları gelişme göstermektedir. Bu yönde genellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının kara kuruluşlarına yönelik stratejiler açıklanırken, yüzer enerji potansiyelinin önemi ise geri planda kalmaktadır. Türkiye İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı Raporu’nda da [6] toplam elektrik üretiminde kara kuruluşu sistemlerinden bahsedilirken yüzer enerji üretimi açıklanmamaktadır. Bu raporda aynı zamanda hidro-enerjinin önemli bir paya sahip olduğu ve rüzgar, güneş, jeotermal, biyokütlenin ise daha düşük oranda kaldığı görülmektedir.

Küresel iklim değişikliği, yağış rejiminin değişmesini ve kuraklık etkisiyle beraber hidroelektrik santrallerinin işleyişi olumsuz etkilenmektedir. Hidro elektrik santrallerinin göl havzalarını besleyen nehir akışını değiştirmesi de su kaynaklarının azalmasına ve önemli tatlı su kaynaklarından olan göl havzalarında su seviyesinin düşmesine sebep olmaktadır. Yüzer enerji sistemleri ise su kaynakları üzerinde inşaat gerektirmeden ve araziye ihtiyaç duyulmadan, hareketli, yer değiştirebilir yapılar olduğu için çevresel tahribat oluşturmamaktadır. Bunun yanı sıra su yüzeyini kaplayarak buharlaşmayı ve alg oluşumunu da engelleyerek, su kalitesini korumakta, suyun soğutma etkisiyle enerji verimliliğini arttırmakta ve sürdürülebilir temiz enerji üretimini

desteklemektedir. Bu nedenle Türkiye’de göl, gölet gibi tatlı su alanlarının korunarak, enerji üretiminde kontrollü kullanımını sağlamak amacıyla yüzer enerji potansiyeli dikkate alınmalıdır.

Eğirdir Gölü ise Isparta ve çevresi için su temini hususunda önemli olmakla birlikte balıkçılık, tarımsal faaliyetler, rekreasyonel etkinlikler, ulaşım gibi farklı ihtiyaçları da karşılamaktadır. Ancak küresel iklim değişikliği kaynaklı yağış rejiminin değişmesi, buharlaşmanın artması, gölü besleyen akarsu kaynakları üzerinde inşa edilen hidroelektrik santrallerinin bulunması ve yanlış tarımsal sulama gibi faktörlerden dolayı olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle Eğirdir Gölü ve çevresini koruyarak, sürdürülebilir kullanımını sağlamak amacıyla koruma kararları ilan edilmiştir. Kesin Korunacak Hassas Alan, Nitelikli Doğal Koruma Alanı ve Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı olarak belirlenen kıyı bölgelerinde inşa edilecek yapısal uygulamalara sınırlılıklar getirilerek, kontrollü kullanıma geçilmiştir.

Çalışmada, Türkiye’de enerji üretimi hususunda küresel iklim değişikliği ile ilgili stratejik kararlar göz önünde bulundurularak, Eğirdir Gölü hibrit yüzer enerji santrali tasarımı geliştirilmiştir. Bu sayede Eğirdir Gölü’nde koruma kararlarına uygun yenilenebilir enerji üretimi sağlanarak, buharlaşmayı azaltmak, su kalitesini korumak, verimli arazilerin veya yeşil alanların tahribatını önlemek mümkün hale gelmiştir. Aynı zamanda göl yüzeyinde güneş, rüzgar ve dalga enerji sistemlerinin hibrit kombinasyonu ile tepe değerlerinin sağlanamadığı iklim koşullarında dahi enerji üretiminin devamlılığı mümkün olmuştur. 509.826 kWh/yıl enerji potansiyeline sahip hibrit yüzer enerji santrali tasarımıyla yaklaşık 140 konutun enerji ihtiyacının karşılanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Yüzer enerji santrali tasarımının Eğirdir’de uygulanabilirliğini arttırmak veya Eğirdir Gölü üzerinde geliştirilecek bundan sonraki projelere fayda sağlamak için tüm yönlerinin değerlendirildiği stratejik kararlar çıkartılmıştır.

Sonuç olarak Eğirdir Gölü Türkiye’nin ikinci büyük tatlı su gölü olmakla birlikte, Isparta ve çevresi için yaşam kaynağı niteliğindedir. Bu denli önemli tatlı su kaynaklarının korunarak kullanılmasını sağlamak ve Türkiye’de küresel iklim değişikliğiyle mücadelede yenilenebilir enerji kaynaklarının artışına destek olmak amacıyla, yüzer enerji sistemleri gerekli olan teknolojilerdir. Ayrıca bu çalışmanın, Türkiye açık deniz potansiyeli değerlendirildiğinde uygun tüm kıyı alanları için de katkı sağlayacağı ortadadır.

Kaynakça

- [1] Tulan Işıldar, H., Yalçın Ercoşkun, Ö. 2021. Göller Yöresinde Sürdürülebilirlik ve Dirençlilik. *Journal of Management Theory and Practices Research*, 2(2), 89-116.
- [2] Gleick, P. 1993. Water and Conflict, Fresh Water Resources and International Security. *International Security*, 18(1), 79-112.
- [3] Göncü, S., Albek, E. A., Albek, M. 2017. Burdur, Eğirdir, Sapanca ve Tuz Gölleri Su Seviyelerinin Nonparametrik İstatistik Yöntemler İle Eğilim Analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(2), 555-570.
- [4] Kayaer, M., Çiftçi, S. 2018. ‘Su Sorunu’ ve Türkiye’nin Tatlısu Potansiyeli Çerçevesinde Türkiye’nin Sınırtaşan Sularının Stratejik, Etik ve Hukuki Boyutlarının Değerlendirilmesi. *PESA Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(3), 386-404.
- [5] Uyduranoğlu Öktem, A., Aksoy, A. 2014. Türkiye’nin Su Riskleri Raporu. *WWF Raporu* (Editör Berivan Dural), 53.
- [6] Çevre, Şehircilik Ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİ), 2024. İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030) https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/%C4%B0klim%20De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fine%20Uyum%20Stratejisi%20ve%20Eylem%20Plan_%202024-2030.pdf (Erişim Tarihi: 10.05.2024).
- [7] Cesur Durmaz, B., Üçgül, İ. 2023. Evaluation of Floating Renewable Energy Potential for Sustainable Energy in Türkiye. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(2), 1085-1100.
- [8] Özaltın, S., Binark, A. K. 2021. Eğirdir Gölü Çevresinde Yenilenebilir Enerji Uygulamaları. *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(2), 112-122.
- [9] Bulut, C., Kubilay, A. 2019. Eğirdir Gölü (Isparta/Türkiye) Su Kalitesinin Mevsimsel Değişimi. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 36(1), 13-23.
- [10] Beyhan, M., Kaçkoç, M. 2013. Eğirdir Gölü’nde Kirlilik Durumu ve Kirlilik Kaynakları Modelleme Çalışması Raporu (Yedi Renkli Göle Yedi Renkli Hayat Projesi). *WWF Raporu*, 35.
- [11] Gençer, M., Başayığıt, L., Akgül, M. 2015. Eğirdir Gölü Koruma Zonları CORINE Arazi Kullanım Sınıflaması. *Journal of Agricultural Sciences*, 21(1), 26-38.
- [12] Davraz, A., Şener, Ş., Şener, E. 2016. Su Kaynaklarının Kullanma ve Koruma Metodolojisinin Geliştirilmesi: Eğirdir Gölü Havzası Örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4(3), 227-238.
- [13] İhlas Haber Ajansı, 2023. Eğirdir Gölü’nde Su Seviyesi Son 3 Yılda 1.36 Metre Azaldı. <https://www.ih.com.tr/isparta-haberleri/-4307030> (Erişim Tarihi: 25.01.2024).

- [14] Eğirdir Kaymakamlığı, 2024. Eğirdir Gölü. <http://www.egirdir.gov.tr/egirdir-golu> (Erişim Tarihi: 12.02.2024).
- [15] Isparta Valiliği Çevre, Şehircilik Ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, 2021. Eğirdir Gölü Çevresi ve Gölcük Krater Gölü Çevresi Doğal Sit Statüler Yeniden Belirlendi. <https://isparta.csb.gov.tr/egirdir-golu-cevresi-ve-golcuk-krater-golu-cevresi-dogal-sit-statuler-yeniden-belirlendi-haber-257687> (Erişim Tarihi: 15.03.2024).
- [16] Kesici, E. 2012. Eğirdir Gölü'nün (Eğirdir-Isparta) Koruma-Kullanımındaki İnsan Etkinliklerinin Sonuçları. Tüketim Toplumu ve Çevre Sempozyumu, 16-17 Kasım, Karabük, 365-375.
- [17] Güner, S., Özgür, A. E. 2023. Eğirdir Gölü Üzerinde Yüzer Güneş Enerji Santrali Uygulanabilirliğinin Araştırılması. Yekarum, 8(2), 80-93.
- [18] Isparta Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, 2022. Isparta 2021 Yılı Çevre Durum Raporu. https://webdosya.csb.gov.tr/db/isparta/menu/2021-yili-il-cevre-durum-raporu_20221004041233.pdf (Erişim Tarihi: 12.02.2024).
- [19] Aktaş, S. 2018. Eğirdir Gölü beslenme havzası ve gölün geleceği. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 85s, Isparta.
- [20] Şener, E. 2021. Küresel iklim değişikliğinin Eğirdir Gölü havzasına etkileri ve kuraklık analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 425s, Isparta.
- [21] Weather Spark, 2024. Eğirdir Bölgesinde Yıl Boyu İklim ve Hava Durumu. <https://tr.weatherspark.com/> (Erişim Tarihi: 20.02.2024).
- [22] Şehnaz, Ş. 2010. Eğirdir göl suyu ve dip sedimanlarının hidrojeokimyasal incelemesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 369s, Isparta.
- [23] Tahan, Z. 2023. Eğirdir Gölü Ve Havzaya Bütüncül Bakmak Suyun Fotoğrafı (Akın Gazetesi). <https://www.egirdirakingazetesi.com.tr/haber/50858/EGIRDİR-GOLU-VE-HAVZAYA-BUTUNCUL-BAKMAK-6-Bolum> (Erişim Tarihi: 14.11.2023).
- [24] European Environment Agency, 2009. Europes Onshore and Offshore Wind Energy Potential: An Assessment of Environmental and Economic Constraints (Technical Report 6). <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7ba0881d-0278-4a55-b664-be215dba8a6e/language-en> (Erişim Tarihi: 25.01.2024).
- [25] Gökmener, S., Çiçek, D. D., Oğuz, E., Haspolat, E., Melek, A. B., Devenci, M. 2023. Yüzer Güneş Enerjisi Santralleri İçin Uygun Yer Seçiminde Kullanılan Kriterler. 10. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 16-17 Kasım, İzmir, 331-343.
- [26] Orman ve Su İşleri Bakanlığı (OSİB), 2012. Eğirdir Gölü Özel Hükümleri. <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/%C4%B0%C3%87ME%20SUYU%20KORUMA%20PLANLARI%2028.12.2022/E%C4%9Firdir%20G%C3%B6l%C3%BC%20%C3%96zel%20H%C3%BCK%3%BCmleri.pdf> (Erişim Tarihi: 15.03.2024).
- [27] Global Solar Atlas, 2024. <https://globalsolaratlas.info/map> (Erişim Tarihi: 15.03.2024).
- [28] Global Wind Atlas, 2024. <https://globalwindatlas.info/en> (Erişim Tarihi: 15.03.2024).
- [29] Cesur Durmaz, B. 2023. Sürdürülebilir yüzer kent park modeli: Fethiye örneği. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 317s, Isparta.
- [30] Dal, A. R. 2021. Investigation of the Potential of Using Lakes and Dams as Solar Power Plants: The Case of Yamula Dam. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9(4), 726-738.
- [31] Kaymak, M. K., Şahin, A. D. 2021. The First Design and Application of Floating Photovoltaic (FPV) Energy Generation Systems in Turkey with Structural and Electrical Performance. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 9, 827-839.
- [32] Yılmaz, E. 2023. Güneş Paneli Sıraları Arasındaki Minimum Mesafe Nasıl Hesaplanır? (Aydınlatma Portalı). <https://www.aydinlatma.org/gunes-paneli-siralari-arasindaki-minimum-mesafe-nasil-hesaplanir.html> (Erişim Tarihi: 22.02.2024).
- [33] Anchor by Panasonic, 2024. AE14HXXXVHC9B Modeli. <https://lsin.panasonic.com/solar/solar-pv-modules.html> (Erişim Tarihi: 20.03.2024).
- [34] Altech, 2024. Boreas 4 kW. <https://www.altechturbine.com/> (Erişim Tarihi: 20.03.2024).
- [35] Ding, S., Yan, S., Han, D., Ma, Q. 2015. Overview on Hybrid Wind-Wave Energy Systems. International Conference on Applied Science and Engineering Innovation, 30-31 Ağustos, China Jinan, 502-507.
- [36] Lee, M. D., Feng, E. L. K., Lee, P. S. 2020. Small Scale Low Height Wave Energy Seawater Pump for Achieving Environmental and Economic

- Sustainability. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 8(1), 14-20.
- [37] Guo, B., Wang, T., Jin, S., Duan, S., Yang, K., Zhao, Y. 2022. A Review of Point Absorber Wave Energy Converters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1534.
- [38] Marquis, L., Kramer, M., Frigaard, P. 2010. First Power Production Figures from the Wave Star Roshage Wave Energy Converter. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Energy (ICOE)*, 6 October, Bilbao, Spain, 1–5.
- [39] Leirbukt, A., Tubass, P. A. 2006. Wave of Renewable Energy. https://library.e.abb.com/public/1e2fadd298a58d14c12571d900412482/29-31%203M646_ENG72dpi.pdf (Erişim Tarihi: 10.07.2022).
- [40] Rusch, C. J., Green, D. R., Sager, D. S., McGarry, J. D., Morasch, J. T., Downs, J. A. Dynamics of a Point Absorber Wave Energy Converter. https://depts.washington.edu/pmec/docs/ME495_2015_SpringReport.pdf (Erişim Tarihi: 10.07.2022).
- [41] Joubert, J. R., Van Niekerk, J. L., Reinecke, J., Meyer, I. 2013. Wave Energy Converters (WECs). https://www.crses.sun.ac.za/files/technologies/ocean/WECs_2013_list.pdf (Erişim Tarihi: 11.08.2022).
- [42] Vervaeet, T., Stratigaki, V., Ferri, F., De Beule, L., Claerbout, H., De Witte, B., Troch, P. 2022. Experimental modelling of an Isolated Wecfarm Real-Time Controllable Heaving Point Absorber Wave Energy Converter. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*, 10(10), 1480.
- [43] TURECO. <https://tureco.com.tr/blog/gunespanelleri-elektrik-uretimi> (Erişim Tarihi: 10.02.2022).
- [44] Maity, R., Sudhakar, K., Abdul Razak, A., Karthick, A., Barbulescu, D. 2023. Agrivoltaic: A Strategic Assessment Using SWOT and TOWS Matrix. *Energies*, 16(8), 3313.
- [45] Sudhakar, K. 2019. SWOT Analysis of Floating Solar Plants. *MOJ Solar and Photoenergy Systems*, 3(1), 20-22.
- [46] Abdelgaied, M., Kabeel, A. E., Zeleňáková, M., Abd-Elhamid, H. F. 2023. Floating Photovoltaic Plants as an Effective Option to Reduce Water Evaporation in Water-Stressed Regions and Produce Electricity: A Case Study of Lake Nasser. *Egypt Water*, 15(4), 635.
- [47] Cuce, E., Cuce, P. M., Saboor, S., Ghosh, A., Sheikhnejad, Y. 2022. Floating PVs in Terms of Power Generation, Environmental Aspects, Market Potential, and Challenges. *Sustainability*, 14(5), 2626.
- [48] Mirzaei Omrani, M. 2023. Techno-economic and Environmental Analysis of Floating Photovoltaic Power Plants: A case Study of Iran. *Renewable Energy Research and Applications*, 4(1), 41-54.
- [49] Pouran, H. M., Lopes, M. P. C., Nogueira, T., Branco, D. A. C., Sheng, Y. 2022. Environmental and Technical Impacts of Floating Photovoltaic Plants as an Emerging Clean Energy Technology. *Iscience*, 25(11), 1-16.
- [50] Stingheru, C., Gasparotti, C., Raileanu, A., Rusu, E. 2018. A SWOT Analysis of the Marine Energy Sector at the European Level. *Acta Universitatis Danubius Œconomica (AUDŒ)*, 14(3), 213-237.

A Novel Method for Monitoring Notified Bodies Designated under The European Union Medical Device Regulation

Tuncay BAYRAK^{1*} 

Turkish Medicines and Medical Devices Agency, 06520, Ankara, Turkey
Atılım University, Engineering Faculty, Computer Engineering, 06830, Ankara, Turkey

(Alınış / Received: 01.07.2024, Kabul / Accepted: 23.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Keywords

Monitoring,
digitalization,
medical device,
conformity assessment,
legislation,
notified body

Abstract: Notified bodies (NBs), which perform conformity assessments, play a crucial role in protecting patient health and providing access to safety products on the market. The EU 2017/745 Medical Device Regulation (MDR) brings stricter rules and responsibilities for notified bodies. Designating authorities (DAs), who are also responsible for monitoring notified bodies, have not been provided with any guidance documents or written procedures. In this study, for the first time, we proposed a methodology aided by a digital system to monitor notified bodies effectively. We conducted a need analysis based on the MDR requirements and the relevant guidance documents, and we introduced a six-component technique for monitoring of the medical device notified bodies. Then, we identified the subcriteria of each component and created business activity diagrams for the main processes to monitor the notified bodies. There are now forty-nine notified bodies available under the MDR. Our monitoring approach consists of six steps that cover all NB-related activities, such as review of technical documentation assessment, personnel authorization, and surveillance of the certified product on the market. The proposed system complies with the MDR requirements and handles all critical performance indicators of NBs. The new MDR requirements for NBs also require an advanced monitoring system for DAs. This study focused on the critical points for monitoring NBs. Member states should implement the proposed methodology and the activity diagrams to have an efficient monitoring system in accordance with MDR requirements. A similar system can be used for monitoring of the other conformity assessment bodies.

Avrupa Birliği Tıbbi Cihaz Yönetmeliği Kapsamında Yetkilendirilen Onaylanmış Kuruluşların İzlenmesi için Yeni Bir Yöntem

Anahtar Kelimeler

İzleme,
dijitalleşme,
tıbbi cihaz,
uygunluk değerlendirmesi,
mevzuat,
onaylanmış kuruluş

Öz: Uygunluk değerlendirmesi gerçekleştiren onaylanmış kuruluşlar, hasta sağlığının korunmasında ve piyasadaki güvenli ürünlere erişimin sağlanmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. AB 2017/745 Tıbbi Cihaz Yönetmeliği (TCY), onaylanmış kuruluşlar için daha katı kurallar ve sorumluluklar getirmektedir. Onaylanmış kuruluşların izlenmesinden de sorumlu olan atama otoriteleri için herhangi bir rehber doküman veya yazılı prosedür yoktur. Bu çalışmada, ilk kez, onaylanmış kuruluşların etkin bir şekilde izlenmesi için dijital bir sistemle desteklenen bir metodoloji önerilmiştir. TCY gerekliliklerine ve ilgili rehber dokümanlara dayalı bir ihtiyaç analizi gerçekleştirilmiş ve tıbbi cihaz onaylanmış kuruluşlarının izlenmesi için altı bileşenli bir teknik ortaya koyulmuştur. Ardından, her bir bileşenin alt kriterleri belirlenmiş ve onaylanmış kuruluşların izlenmesine yönelik ana süreçler için iş aktivite diyagramları oluşturulmuştur. Şu anda TCY kapsamında kırk dokuz onaylanmış kuruluş bulunmaktadır. İzleme yaklaşımımız, teknik dokümantasyon değerlendirmesinin gözden geçirilmesi, personel yetkilendirmesi ve sertifikalı ürünün piyasada gözetimi gibi onaylanmış kuruluş ile ilgili tüm faaliyetleri kapsayan altı adımdan oluşmaktadır. Önerilen sistem TCY

gereklilikleriyle uyumludur ve onaylanmış kuruluşların tüm kritik performans göstergelerini ele alır. Onaylanmış kuruluşlar için yeni TCY gereklilikleri, atama otoriteleri için de gelişmiş bir izleme sistemi gerektirmektedir. Bu çalışma onaylanmış kuruluşların izlenmesi için kritik noktalara odaklanmıştır. Üye devletler, TCY gerekliliklerine uygun etkin bir izleme sistemine sahip olmak için önerilen metodolojiyi ve faaliyet diyagramlarını uygulamalıdır. Benzer bir sistem diğer uygunluk değerlendirme kuruluşlarının izlenmesi için de kullanılabilir.

1. Introduction

Medical devices are defined as various tools, apparatuses, software, machinery, and similar products that are used for the prevention, diagnosis, treatment, and prognosis of disease in humans and that show a mechanism of action electrically, physically, or mechanically, unlike medicines [1]. The EU 2017/745 Medical Device Regulation (MDR) aims to regulate the market in which high-quality and safe medical devices are available in place of the directives[2,3]. Conformity assessment is the main activity for accessing safe and quality products on the market. It is defined as the process of demonstrating whether the requirements of the MDR relating to a device have been fulfilled. Manufacturers shall apply to third parties (notified bodies in the MDR) for conformity assessment of higher risk class devices (class IIa, IIb and III). Designating authorities designate the notified bodies in accordance with MDR Art 38-42. Notified bodies should be independent, impartial and objective when assessing the conformity of devices [4]. Manufacturers and notified bodies are the primary actors in the market. Therefore, the EU released several guidelines for these actors after the MDR was published [5]. The number of notified bodies designated under the MDR is forty-eight [6]. The MDR defines new rules for manufacturers and notified bodies. Notified bodies assess many technical issues within conformity assessment procedures, as manufacturers of higher risk devices are under the supervision of notified bodies. Similarly, notified bodies are under the supervision of the relevant designating authority. According to MDR Art 46, designating authorities should effectively monitor notified bodies under their supervision. This monitoring activity plays an important role in ensuring continuity in the placement of safe products on the market. There are many parameters for monitoring the performance of notified bodies, but a limited number of personnel and written documents are available for designating authorities. Currently, no guidance documents are available for designating authorities, while the European Commission provides useful information for manufacturers and notified bodies through guidance documents. Designating authorities need to improve their assessment criteria because of the increased responsibilities of notified bodies and the proactive surveillance approach of the MDR.

2. Material and Method

In this study, first, we analysed the relevant requirements and performance indicators for monitoring notified bodies. Second, we conducted a needs analysis in which the necessary roles in the system were identified. Third, we identified the processes and the relevant documentation. We also created business activity diagrams of the activities in NB monitoring using DIA software [7]. Figure 1 shows the inputs that are used in the need analysis. MDR Chapter IV, which describes the rules for the designation authority and notified bodies, is the basis of the monitoring system. MDR Annex VII describes the requirements that notified bodies must meet. We determined the user profiles in the monitoring system based on this chapter, which also defines the relevant roles of notified bodies. The NBOG 2017-2 [8] describes the minimum qualifications of conformity assessment personnel of notified bodies. We reviewed the employment of new personnel of notified bodies in accordance with this guidance. Our digital-based model is able to notify personnel authorization to the designating authority. NBs carry out conformity assessment procedures in accordance with MDR Annexes IX, X, and XI and the conformity assessment routes explained in MDR Chapter V. We defined the relevant functions as receiving customer files prior to surveillance assessment, resource allocation, medical device technical files, consultation, and document sharing within the framework of the information in these annexes.

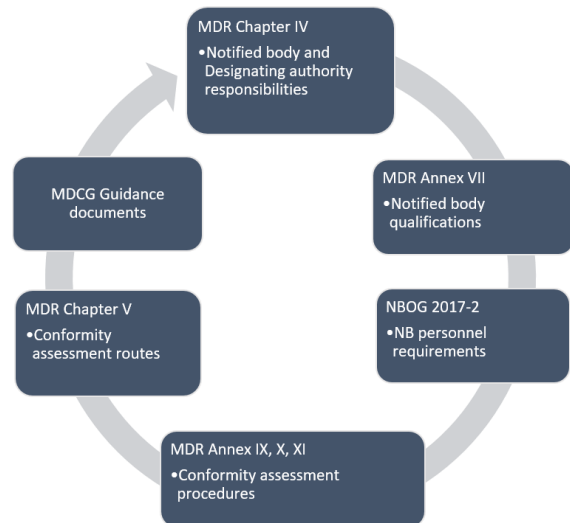


Figure 1. The inputs of the needs analysis for monitoring notified bodies

MDR Art 44 requires an annual plan for monitoring and evaluating notified body activities, and the designating authority (DA) shall provide this plan to the European Commission. This plan includes an observation of the NB's personnel during the quality management system audit at a manufacturer's facility. The DA also performs systematic follow-up for complaints, vigilance, postmarket surveillance by the manufacturer, and market surveillance. DA may conduct short-notice, unannounced or 'for-cause' reviews if needed to address a particular issue or to verify compliance. In addition, the DA reviews the assessments by notified bodies of manufacturers' technical documentation, including clinical evaluation documentation regarding MDR Art 45.

3. Results

3.1. The proposed system

We propose a system for monitoring MDR Art 44 in NBs that explains the main requirements for monitoring NBs explained in the previous section. Our monitoring system consists of six components: (1) project-based monitoring, (2) review of NB assessment of technical documentation, (3) analysis of data obtained from postmarket surveillance and vigilance, (4) outcomes of the other assessments (unannounced, short notice, etc.), (5) review of personnel authorization, and (6) annual on-site assessment activity. Figure 2 shows the components of the proposed monitoring system. The DA can report the results of these six subprocesses and make decisions such as suspending, restricting, or fully or partially withdrawing the designation, depending on the seriousness of the failure of the NB to comply with the MDR. The proposed system provides a systematic assessment scheme to report evidence and justification for NB decisions. The notified body competency is explained with a code system containing active medical devices (MDA), non-active medical devices (MDN), specific characteristics of the device (MDS) and technologies or processes (MDT). Conformity assessment personnel is authorized with

the appropriate codes according to some special requirements in educational background, training and work experience.

Project-based monitoring covers all main parts of a certification project carried out by NBs, such as receiving an application from the manufacturer, offering prices and making a contract between the NB and the manufacturer, planning, resource allocation, technical file assessment, assessment of a clinical evaluation report (CER), observation of site audits in the manufacturer's facility, specific procedures such as consultation (if applicable), final review and decision making. The conformity assessment process requires site auditors, product reviewers, special experts, final reviewers, and decision makers, who are the main roles described in the MDR and NBOG 2017-2. The performance of these personnel must be assessed in accordance with the conformity assessment body (CAB)'s procedures. The main activities are explained in MDR Art 52, Annex IX, Annex X, Annex XI and NBOG 2017-2. The DA assessor should have a control list and good knowledge about the legal requirements for these activities. A NB receives a formal application and signs an agreement with the manufacturer regarding MDR Annex VII Article 4.3. In notified body, project leader introduces an audit program and allocates the resources for the certification project of the proposed device that is defined with a basic unique device identification-device identifier (UDI-DI). Audit program includes surveillance and unannounced audits for those devices. In general, audit duration is determined using the International Accreditation Forum Mandatory Documents (IAF MD) 5:2019 [9]. Effective number of personnel and the manufacturing sites impact the audit duration. As a general rule, a lead auditor cannot lead audits of the same manufacturer for more than 3 consecutive years, or cannot participate in audits regarding MDR Annex VII Article 3.6. The personnel who makes the decision to grant certification and the conformity assessment personnel are different from each other. The DA assessor should control these rules.

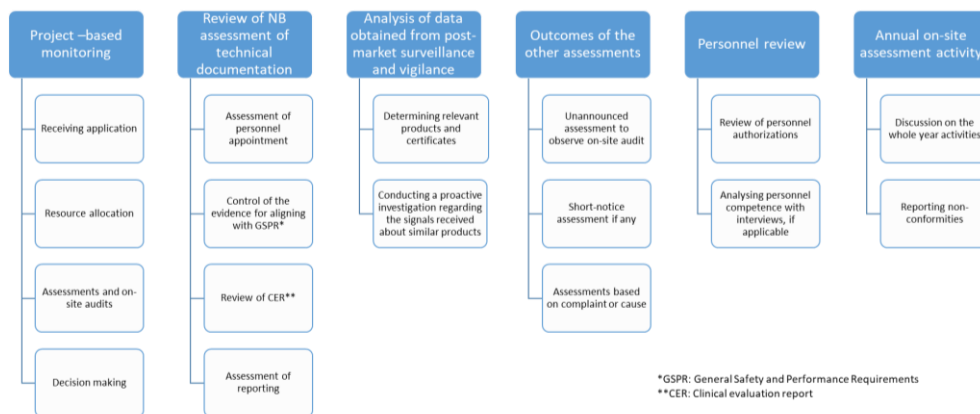


Figure 2. The proposed monitoring system components

The second component is a review of the NB's technical documentation assessment. This can be carried out within project-based monitoring. However, the DA should introduce a sampling plan for the review of technical documentation assessment based on risk classes. Thanks to the guidance documents (i.e., MDCG 2019-13 [10]) published for NBs, the DA can use this guidance to determine the critical points of the process to observe the performance of NBs. MDR requires two types of technical documentation regarding Annex-II and III. Annex II contains the relevant evidence demonstrating the conformity of the product in accordance with general safety and performance requirements, while Annex III requires a surveillance plan to be prepared by the manufacturer for the product after certification. The NB should assess both types of technical documentation. In this regard, the DA assessor should have sufficient technical background and complete at least some training programs, including biocompatibility, risk analysis, quality management systems and auditing principles. The third component is the analysis of postmarket surveillance data, including vigilance records. If there is any nonconformity that is related to the NB's activities, the DA may carry out unannounced or short-notice assessments. This may also include an observation of the quality management system (QMS) audit of the NB. During the one-year surveillance period, unannounced, short-notice or announced assessments for any reason may also be conducted. The DA should also review the personnel authorizations of the NB. It may sample or examine all of them. This depends entirely on the DA personnel capacity and workload. The MDR Annex VII explains the organizational, quality management, resource and process requirements for NBs. The DA should assess the NBs in accordance with this annex and combine the outcomes of steps 1-5 during the on-site assessment. After that, the NB has to implement a corrective and preventive action process to close the nonconformities, if any.

It is very important to ensure effective communication and document transfer between NBs and the DA

during monitoring. To this end, a digital-based system can be implemented by DAs. In this respect, we produced business activity diagrams for surveillance and an unannounced assessment of NBs. Figure 3 shows the activity diagram of the surveillance assessment process. The main actors defined in the system are responsible for triggering the assessment process in the DA, assessors and final reviewers in the DA, users from the PMS department of the DA and the NB user. The system should allow for the sharing of documents between the DA and the NB. A final reviewer in the DA is very important to check the whole flow in the process. Figure 4 shows the steps of the on-site observation of an audit carried out by the NB. We can define this process as short-notice or unannounced assessment. The DA should have a monthly audit calendar for the NB to select the appropriate audit that will be observed. For this purpose, the DA can request monthly audit calendars from the NB throughout the year. This notification should involve the product details (i.e., name, risk class), the relevant MDR codes, the auditors appointed and the audit dates. The DA should review or check the audit details and observe the audit process on-site. The diagrams in Figures 3 and 4 can be easily implemented for other countries. The first designation, reassessment or other assessment types can be designed in the same way. This digital system can be used for monitoring other conformity assessment bodies.

The DA first informs the notified body about the dates for the surveillance assessment and the date by which it has to submit the updated QMS documentation. The NB makes the official application and pays the relevant fees. The DA requests selected customer files from the NB and conducts an office review. The DA then shares the assessment plan with the NB, conducts the surveillance assessment at the NB facility and reports nonconformities, if any. The NB submits a corrective and preventive action (CAPA) plan for these nonconformities. The NB carries out its CAPA actions in accordance with the plan approved by the DA. The DA makes the final decision in the surveillance assessment of the NB after these activities.

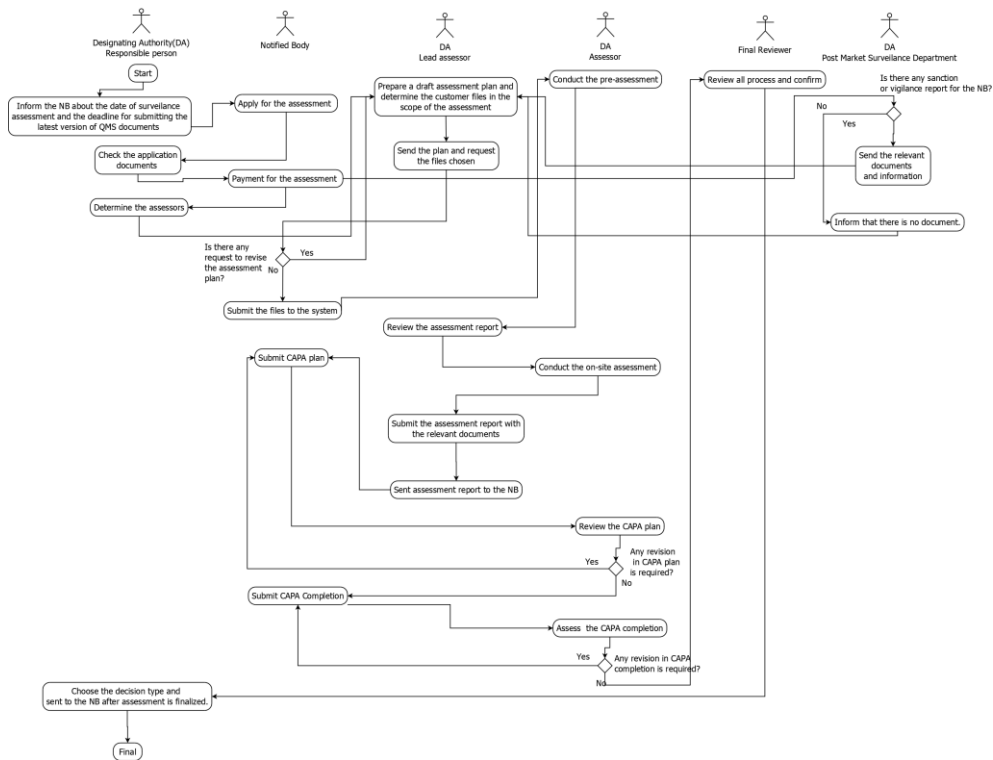


Figure 3. Surveillance assessment activity diagram

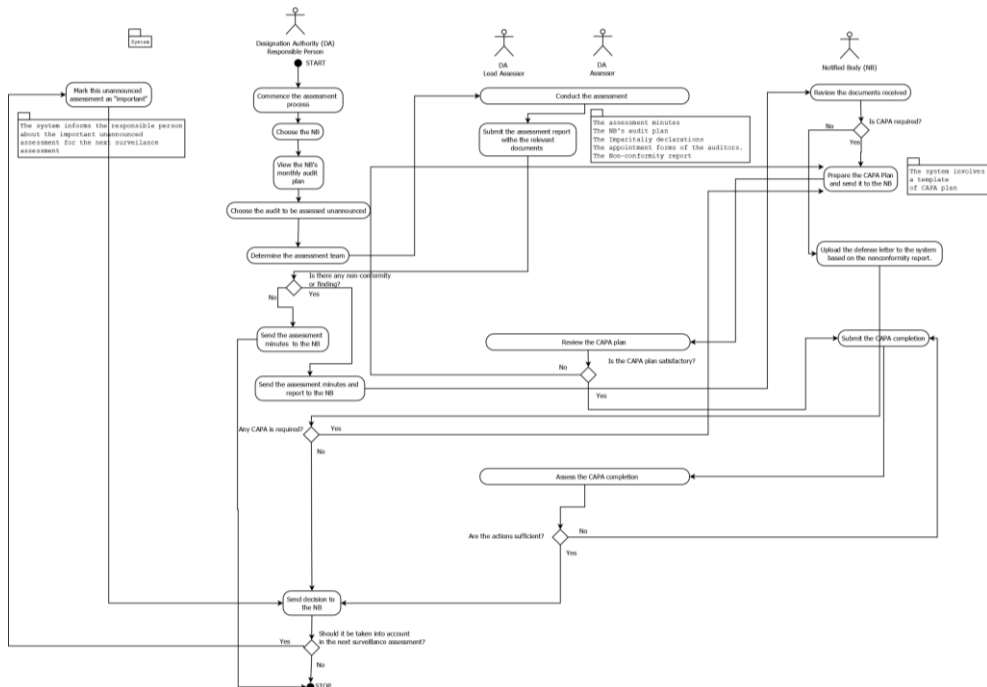


Figure 4. Activity diagram for unannounced/short-notice assessment

4. Discussion and Conclusion

Project-based monitoring can be an efficient method to observe the NB’s conformity assessment procedure within the selected project, and it provides a proactive approach. The DA can review all the steps from resource allocation to decision making and observe the performance of the conformity assessment personnel (CAP) in the project. The DA assessor should combine MDR Annex VII and the relevant conformity assessment routes to verify the CAP’s

actions. The DA assessor should have sufficient information to review the technical documentation of the NB. For this reason, ISO standards that are applicable for the product and preclinical studies should be reviewed in accordance with the general safety and performance requirements (GSPR) of the MDR. A clinician or other relevant personnel who is familiar with the clinical aspects of the product can conduct a review of the NB assessment on a clinical evaluation report. In this respect, MDCG 2020-5 [11], MDCG 2020-6[12] and MDCG 2020-7[13] can be used

to review CER assessments. There is a relationship between the technical file and the manufacturer's facility. According to the technical documentation, the product reviewer must understand the critical points that are related to the production site. Subsequently, product reviewers should inform site auditors about these special processes, such as packaging, sterilization, metal processing, chemical processing or plastic processing. Site auditors should assess these processes on the manufacturer's facilities. The DA assessor should review this cooperation. Personnel appointment is the main activity in resource allocation carried out by the project leader of the NB. For example, the final reviewer and decision maker must be different from the product reviewer and site auditors in the same project. In addition, every NB has a designation scope that consists of MDA/MDN codes that reflect the design and intended purpose of the device, MDS horizontal codes that reflect the specific characteristics of the device and MDT horizontal codes that describe technologies or processes. The MDCG 2019-14 explains the MDR codes with device examples [14]. The NB must employ a sufficient number of personnel for each code. Every personnel is authorized for the relevant codes. A competency matrix that includes the responsibilities and authorizations of the personnel in the NB should be established in accordance with the MDR Annex VII Art 3.3.2. This is a useful tool for viewing the personal capacity of the NB for DA assessors. The project leader must appoint these personnel due to their authorizations for each project. The DA should assess these appointments for the selected projects. This is an indicator of the project leader's competency and performance. The DA should verify these points in the selected projects. Another parameter is the determination of the audit time for the relevant project. In this case, the NB must use the approved procedures to calculate the audit time on the facility, which also depends on the number of effective personnel of the manufacturer. The DA assessor should review this time according to the NB's procedures and IAF MD 5 guidance document. As a result, the DA lead assessor should combine all findings to determine nonconformities, if any.

The capacity of the DA personnel is very important for achieving successful assessment of NBs. In the literature, there are no studies addressing this issue. The DA assessor should approach the technical files like a product reviewer. Considering the components of a medical technical file, many criteria can be determined to demonstrate compliance with the GSPR and special procedures.

MDR has new challenges for all stakeholders, including designating authorities, notified bodies and economic operators. Some studies have focused on the challenges of MDR [15-19] and the benefits of MDR [20]. The EU has also published many guidance documents for notified bodies and economic

operators. NBs play a critical role in the medical device market, so monitoring NBs becomes crucial for patient safety. On the other hand, in the literature, very few studies address the designation of notified bodies. Farrugia proposed a methodology that consists of four phases for the designation of notified bodies, but this methodology does not involve monitoring NBs and provides sufficient detail about the assessment of notified bodies. The author reported general guidance for the designation and reassessment of NBs [21]. In contrast, our study, for the first time, proposes a monitoring approach aided by a digital framework. There are many data types for monitoring NBs, such as customer files, technical documentation of products, clinical evidence, and product design. Data security is another important issue, and the DA system should comply with the General Data Protection Regulation, which involves limitations on many data-based activities. Users should be informed about the DA's policy on data management.

The MDR imposes strict rules on conformity assessment processes for the safe supply of medical devices to the market. In the implementation of these rules, manufacturers, notified bodies and designating authorities with oversight responsibility for notified bodies have important responsibilities. Therefore, it is critical to establish methodologies and information sources that can be used by designating authorities to effectively monitor the processes of notified bodies. The methodology and digital-based monitoring approach proposed in this study can be applied by other countries.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Anonym, 2017. (EU) 2017/745 Medical Device Regulation. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32017R0745> (Accessed date: 20.05.2024).
- [2] Anonym, 1990. Council Directive 90/385/EEC concerning active implantable medical devices. Official Journal of The European Communities, Luxembourg. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31990L0385> (Accessed date: 20.05.2024).
- [3] Anonym, 1993. Council Directive 93/42/EEC concerning medical devices. Official Journal of The European Communities, Luxembourg.

- <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31993L0042> (Accessed date: 20.05.2024).
- [4] Anonym, The NANDO website. https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/goods/building-blocks/notified-bodies_en (Accessed date: 20.05.2024).
- [5] Anonym, MDCG Guidance documents. https://health.ec.europa.eu/medical-devices-sector/new-regulations/guidance-mdcg-endorsed-documents-and-other-guidance_en (Accessed date: 20.05.2024).
- [6] Anonym, The list of notified bodies under the MDR. <https://webgate.ec.europa.eu/single-market-compliance-space/#/notified-bodies/notified-body-list?filter=legislationId:34,notificationStatusId:1> (Accessed date: 20.05.2024).
- [7] Medvidovic, N., Rosenblum, D.S., Redmiles, D.F., Robbins, J.E. 2002. Modelling software architectures in the Unified Modelling Language [TOSEM]. *ACM Trans Softw Eng Methodol*;11(1):2-57.
- [8] Anonym, NBOG 2017-2 Guidance on the Information Required for Conformity assessment bodies' Personnel Involved in Conformity Assessment Activities. https://health.ec.europa.eu/system/files/2020-09/md_mdcg_2017_2_nbog_bpg_en_0.pdf (Accessed date: 20.05.2024).
- [9] Anonym, 2019. IAF MD 5:2019, International Accreditation Forum. https://iaf.nu/iaf_system/uploads/documents/IAF_MD5_Issue_4_Version_2_11112019.pdf (Accessed date: 20.05.2024).
- [10] Anonym, MDCG 2019-13 Guidance on sampling of MDR Class IIa / Class IIb and IVDR Class B / Class C devices for the assessment of the technical documentation. 2019. https://health.ec.europa.eu/system/files/2020-09/md_mdcg_2019_13_sampling_mdr_ivdr_en_0.pdf (Accessed date: 20.05.2024).
- [11] Anonym, MDCG 2020-5 Clinical Evaluation – Equivalence. 2020. https://health.ec.europa.eu/system/files/2020-09/md_mdcg_2020_5_guidance_clinical_evaluation_equivalence_en_0.pdf (Accessed date: 20.05.2024).
- [12] Anonym, MDCG 2020-6 Regulation (EU) 2017/745: Clinical evidence needed for medical devices previously CE marked under Directives 93/42/EEC or 90/385/EEC. 2020. https://health.ec.europa.eu/system/files/2020-09/md_mdcg_2020_6_guidance_sufficient_clinical_evidence_en_0.pdf (Accessed date: 20.05.2024).
- [13] Anonym, MDCG 2020-7 Post-market clinical follow-up (PMCF) Plan Template. 2020. https://health.ec.europa.eu/system/files/2020-09/md_mdcg_2020_7_guidance_pmcf_plan_template_en_0.pdf (Accessed date: 20.05.2024).
- [14] Anonym, MDCG 2019-14 Explanatory note on MDR codes. 2019. https://health.ec.europa.eu/system/files/2020-09/md_mdcg_2019_14_mdr_codes_en_0.pdf (Accessed date: 20.05.2024).
- [15] Smith, J., Jones, K., Brown, M. 2023. European manufacturers' understanding of the Medical Device Regulation: A gap analysis. *Medical Device Law Review*, 32(2), 123-135.
- [16] Garcia, P., Lopez, A., Sanchez, R. 2021. Financial impact of the Medical Device Regulation on European manufacturers: A comparative study. *Health Economics*, 40(5), 821-834.
- [17] Davis, T., Miller, D. 2023. Challenges in conducting clinical investigations for novel medical devices under the new regulations. *ClinicalTrials*, 20(5), 456-470.
- [18] Kearney, B., McDermott, O. 2023. The Challenges for Manufacturers of the Increased Clinical Evaluation in the European Medical Device Regulations: A Quantitative Study. *Therapeutic Innovation & Regulatory Science*, 1-14.
- [19] Baines, R., Hoogendoorn, P., Stevens, S., Chatterjee, A., Ashall-Payne, L., Andrews, T., & Leigh, S. 2023. Navigating medical device certification: a qualitative exploration of barriers and enablers amongst innovators, notified bodies and other stakeholders. *Therapeutic Innovation & Regulatory Science*, 57(2), 238-250.
- [20] Green, M., Williams, K. 2022. The potential benefits of new medical device regulations for patient safety: An analysis of the enhanced oversight and data collection requirements. *International Journal of Technology Assessment in Healthcare*, 38(2), 312-325.
- [21] Farrugia, K. 2023. Designation and oversight of notified bodies in medical device regulatory sciences (Doctoral dissertation), 151s, Malta.

Şıkıştırılmış Kil Zeminlerin Şişme Basıncının Belirlenmesinde Bulanık Mantık Yaklaşımı

Ömür ÇİMEN^{1*}, S. Nilay KESKİN²

^{1,2}Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, 32200, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 01.07.2024, Kabul / Accepted: 06.10.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Kil zeminler,
Şişme basıncı,
Bulanık mantık

Öz: Bu çalışmada kil zeminlerde önemli bir mühendislik problemi olan şişme basıncının belirlenmesinde bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla kilin şişme basıncını etkileyen parametrelerden olan plastisite indisi, başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri dikkate alınmıştır. Öncelikle şişme basıncı ve etki eden parametreler bulanık alt kümelerle ayrılmıştır. Bulanık kural tabanı oluşturulmuş ve Fortran dilinde programlanmıştır. Daha sonra şişme potansiyeli yüksek olan üç kil numunesi üzerinde sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Şişme deneyleri için altı farklı başlangıç su muhtevası ve yedi farklı kuru birim hacim ağırlıkta numuneler kompaksiyonla hazırlanmıştır. Deneyden elde edilen şişme basıncı değerleri ile bulanık mantık modelinden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Şişme basıncının yüksek olduğu durumlarda, bulanık mantık modelinden elde edilen şişme basınçları ile deneysel sonuçlar arasındaki maksimum hata yaklaşık %10 iken, çok düşük şişme basıncı değerlerinde maksimum hatanın %30'u aştığı görülmüştür. Şişme basıncı tahmininde ortalama hata miktarı ise %9.73 olarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile bulanık mantık yönteminden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında; sıkıştırılmış killerde şişme basıncının tahmininde bulanık mantık yönteminin kullanılabilirliği görülmektedir.

Fuzzy Logic Approach in Determining Swelling Pressure of Compacted Clay Soils

Keywords

Clay soils,
Swelling pressure,
Fuzzy logic

Abstract: In this study, the fuzzy logic method was used to determine the swelling pressure, which is an important engineering problem in clay soils. For this purpose, plasticity index, initial water content and dry unit volume weight values, which are among the parameters affecting the swelling pressure of clay, were taken into consideration. First of all, swelling pressure and affecting parameters are divided into fuzzy subsets. The fuzzy rule base was created and programmed in Fortran language. Then, constant volume swelling experiments were performed on three clay samples with high swelling potential. For swelling experiments, samples with six different initial water contents and seven different dry unit volume weights were prepared by compaction. The swelling pressure values obtained from the experiment were compared with the values obtained from the fuzzy logic model. In cases of high swelling pressure, the maximum error between the swelling pressures obtained from the fuzzy logic model and the experimental results was around 10%, while it was observed that the maximum error exceeded 30% at very low swelling pressure values. The average amount of error in inflation pressure estimation was obtained as 9.73%. When the experimental results are compared with the results obtained from the fuzzy logic method, it is seen that the fuzzy logic method can be used in estimating the swelling pressure in compacted clays.

* Sorumlu yazar: omurcimen@sdu.edu.tr

1. Giriş

Killi zeminlerin su emerek hacimlerinin artması ya da hacim artışının engellenmesi durumunda, aşırı basınç göstermeleri zeminlerin şişme özelliği olarak bilinir. Şişen zeminler, karayolu, havaalanı kaplamalarında, su kanallarında, az katlı yapılarda büyük zararlar ortaya çıkarabilen bir problemdir [1-4]. Killi zeminlerin şişme mekanizmasını etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler üç grupta toplanabilir: Birinci grup, zeminin kütlesi ve danelerin fiziksel özellikleri ile ilgilidir. Başlangıç su muhtevası, danelerin tipi vb. özellikler bu grupta düşünülür. İkinci grup, yerleşim koşullarını veya çevresel koşulları göstermektedir. Uygulanan basınç, sınır koşulları, zemin tabakasının jeolojik tarihi vb. bu gruba girer. Üçüncü grup ise ıslanmada kullanılan suyun özellikleri ile ilgilidir. Suyun elektro kimyasal özellikleri, su-kil ilişkisi gibi özellikler bu grupta ele alınır [5-8].

Chen [9], su muhtevastaki küçük bir değişikliğin bile (yaklaşık %1-2 oranında dahi) ciddi bir şişmeye neden olabileceğini, şişen zeminlerin başlangıç su muhtevastının şişmenin miktarını kontrol ettiğini belirtmiştir. Tabii su muhtevası %15 'in altında olan killerin, şişme açısından tehlikeli olduğunu, böyle killerin %35 oranından daha fazla suyu kolaylıkla adsorbe edebildiklerini, su muhtevası %30 'un üzerindeki killerde şişmenin daha önceden meydana geldiğinin anlaşıldığını ve daha düşük oranlarda bir şişme beklenildiğini belirtmiştir. Ayrıca, başlangıç su muhtevası ile direk ilişkili olan kilin kuru birim hacim ağırlığının şişmenin bir belirleyicisi olduğunu ve 17.62 kN/m^3 'den daha yüksek kuru birim hacim ağırlıklı zeminlerin yüksek şişme potansiyeli gösterebileceklerini belirtmiştir. Geoteknik mühendisliğinde sıkıştırılmış zeminlerin kullanıldığı dolgularda, genellikle $16.0-20.83 \text{ kN/m}^3$ aralığındaki kuru birim hacim ağırlıkların kullanıldığını ve şişmeye dikkat edilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Aynı kuru birim hacim ağırlıktaki numuneler için başlangıç su muhtevastının artmasıyla, şişmenin azaldığı gösterilmiştir. Bu duruma uygunluk derecesinin artmasıyla adsorbe çekim kuvvetinin azalmasının neden olduğu belirtilmiştir. Rötne limitine ulaşana kadar, başlangıç su muhtevastının, şişme ve şişme basıncı üzerinde çok küçük etkiye sahip olduğu, rötne limitinin üzerindeki su muhtevalarında ise, şişmenin ve şişme basıncının başlangıç su muhtevastının artmasından daha çok etkilendiği belirtilmiştir. Sabit su muhtevastında, başlangıç kuru birim hacim ağırlığının artmasıyla şişme basıncının arttığı gösterilmiştir [5, 10].

Şişme karakteristiklerini oluşturan şişme basıncı ve şişme potansiyelinin belirlenmesi için pek çok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler üç grup halinde düşünülebilir:

1. Mineralojik yöntemler: X-Ray difraksiyonu, diferansiyel termal analiz, boya adsorbsiyonu, kimyasal analiz, elektron mikroskop yöntemi.
2. Dolaylı yöntemler: Kilin kıvam limitleri özellikleri, PVC yöntemi, aktivite yöntemi, emme basıncı yöntemi, ampirik bağıntılar.
3. Doğrudan ölçüm: Bir kilin şişme yüzdesi ve şişme basıncının deneysel olarak belirlendiği en iyi yöntemdir. En yaygın olarak kullanılan doğrudan ölçüm tekniği odometre yöntemidir. Odometre deneyleri uzun zaman gerektirdiği için literatürde şişme probleminin tahmini ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda, araştırmacılar odometre deney sonuçlarını kullanarak, numunelerin fiziksel ve indeks özellikleri ile korelasyonlar oluşturmaktadırlar [11-12].

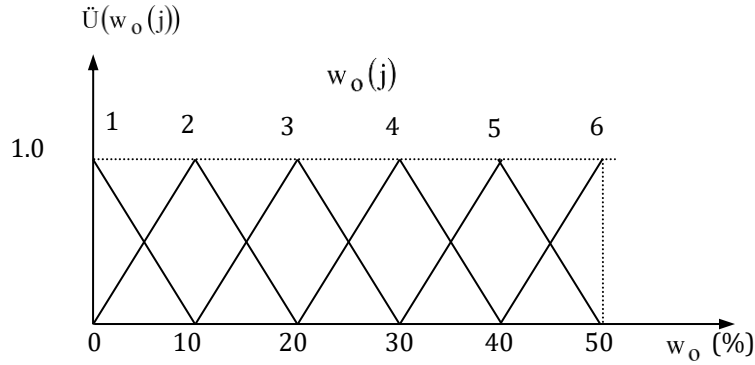
Üç fazlı bir malzeme olan zemin, homojen ve izotrop olmayan bir yapıya sahiptir. Bu özelliğinden dolayı zeminler, birçok belirsizlikler taşımaktadır. Kil zeminlerin şişme davranışı da birçok belirsizlikler içermektedir. İlk olarak, Zadeh (1965) tarafından kullanılan bulanık mantık metodu farklı disiplinlerde geniş uygulama alanlarına sahiptir [13]. Zeminle ilgili konulara da uygulanabilmektedir [14-22]. Zeminlerde şişme basıncının tahmin edilebilmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yanal ve düşey şişme basınçlarının tahmini için yapay sinir ağları (ANN) ve uyarlanabilir nöro bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanılmıştır [23]. Zemin su tutma eğrileri kullanılarak şişme basıncının tahminini araştırmışlardır [24]. Sabit hacimli şişme basıncının emme deney metodları yardımıyla ampirik bir şekilde tahmin edildiği çalışmalar mevcuttur [25, 26]. Bazı fiziksel zemin özelliklerini kullanarak şişme basıncının tahmin edildiği çalışmalar yaygındır [27-28]. Şişme basıncının tahmininde kıvam limitleri ve kil miktarı girdi olarak kullanılarak bulanık mantık yöntemi uygulanmıştır [29]. Şişen zeminlerin sınıflandırılmasında bulanık sınıflandırma aşamaları önerilmiştir [30]. Sıkıştırılmış kilin serbest şişme basıncı ve şişme yüzdesinin tahmininde ampirik yöntemlerden yararlanılmıştır [31]. Yapay sinir ağları modeli şişme basıncının tahmin edilmesinde ve şişme basıncı ile serbest basınç mukavemetinin belirlenmesinde kullanılmıştır [32-34]. Bu çalışmada ise, sabit hacimli şişme basıncının belirlenmesinde bulanık mantık yöntemi uygulanmıştır. Şişme basıncının tahmin edilmesi ile ilgili çalışmalar incelendiğinde kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası ve plastisite indisi kullanılarak bulanık mantık yönteminin uygulandığı bir çalışma olmadığı görülmüştür. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farklı yönü kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası ve plastisite indisi girdi parametrelerini kullanarak bulanık mantık yönteminin uygulanmasıdır.

2. Materyal ve Metot

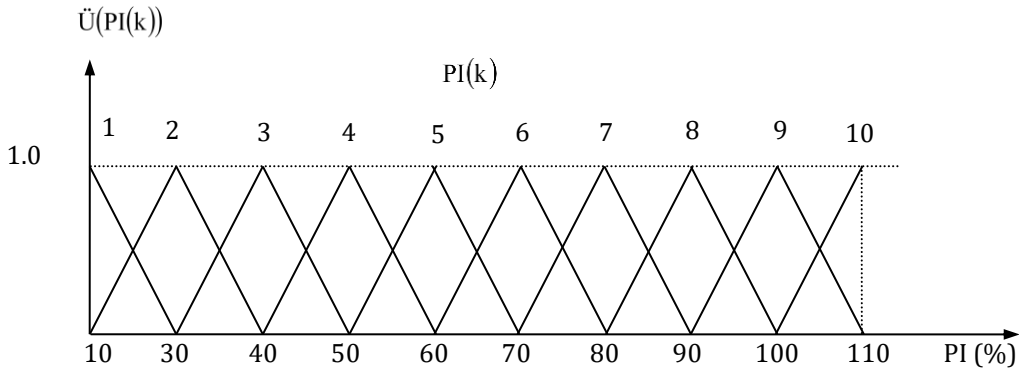
2.1. Bulanık model parametreleri

Zadeh 'in geliştirdiği bulanık mantık modellemesinde, belirsizliklerin ortaya koyulduktan sonra daha güvenilir olarak dikkate alınabilecekleri bu tekniğin ana fikrini oluşturmaktadır. Bulanık mantık metodu sözel verileri işlemekte etkin bir metottur [13]. Bu metotta, sözel bilgileri bilgisayarlara kurallar yardımıyla tanıtarak bulanık işlemler yapılmaktadır. Genel olarak, klasik küme şeklinde ortaya çıkan değişim aralıklarının bulanıklaştırılması, bulanık kümenin, mantık ve sistem işlemleri için gereklidir. Bunun için, bir aralıkta bulunabilecek öğelerin hepsinin 1 üyelik derecesine sahip olması yerine, 0 ile 1 arasında değişik değerlere sahip olması düşünülür. Böylece, bazı öğelerin belirsizlik içerdikleri kabul

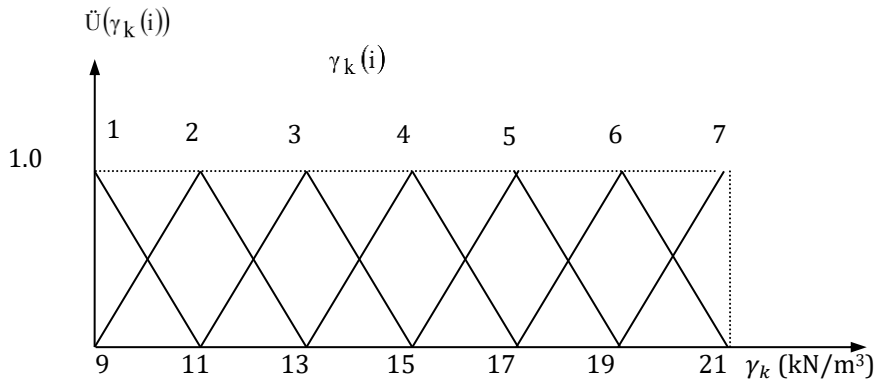
edilir. Alt kümelerin fonksiyonları da birbirinden farklı olabilmektedir. Literatürde işlem kolaylığı sebebiyle en çok üçgen alt kümeler kullanılmaktadır [35]. Bu çalışmada da üçgen alt kümeler kullanılmıştır. Şişme basıncına etki eden 3 girdi parametresi (kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi) dikkate alınmıştır. Bu girdi parametrelerinin seçilmesinde bunların şişme basıncı üzerinde çok etkili olmaları, uygulama aşamasında her zeminde belirlenen parametreler olması gibi sebepler düşünülmüştür. Kuru birim hacim ağırlık alt kümeleri Şekil 1'de, başlangıç su muhtevası alt kümeleri Şekil 2'de ve plastisite indisi alt kümeleri ise Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 1. Kuru birim hacim ağırlık alt kümeleri [20]



Şekil 2. Başlangıç su muhtevası alt kümeleri [20]



Şekil 3. Plastisite indisi alt kümeleri [20]

Kuru birim hacim ağırlık için sınır şartları 9-21 kN/m³, başlangıç su muhtevası için sınır şartları %0-

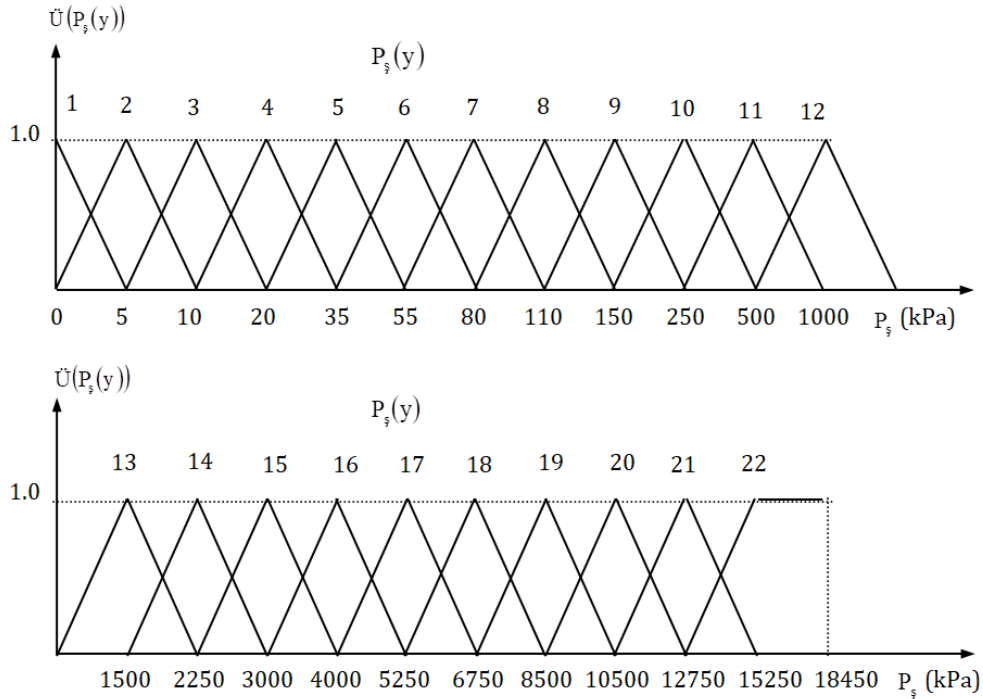
%50, plastisite indisi için sınır şartları %10-%110 olarak dikkate alınmıştır. Bu sınır şartlarına göre kuru birim hacim ağırlık 7, su muhtevası 6, plastisite indisi ise 10 alt kümeye ayrılmıştır. Alt küme sayılarının belirlenmesinde şişme konusundaki çalışmalardan yararlanılmıştır. Çıktı olarak bulunması hedeflenen şişme basıncı alt kümeleri Şekil 4 de verilmiştir. Sabit hacimli şişme basıncı için sınır şartları 0-18450 kPa olarak dikkate alınmıştır. Sabit hacimli şişme basıncı bulanık kümesi 22 alt kümeye ayrılmıştır.

Bu şekillerde $\tilde{U}(\gamma_k(i))$, $\tilde{U}(w_o(j))$, $\tilde{U}(PI(k))$ ve $\tilde{U}(P_s(y))$, sırasıyla, kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası, plastisite indisi ve şişme basıncı bulanık kümelerinin üyelik derecelerini gösterirken, $\gamma_k(i)$, $w_o(j)$, $PI(k)$ ve $P_s(y)$ ilgili parametrelerin bulanık küme gruplarını ve i , j , k ve y değişkeni ise, ilgili bulanık kümenin ait olduğu alt kümeyi göstermektedir.

Bu üç parametrenin rastgele değerleri için şişme basıncının tahmini olarak belirlenebildiği bir bilgisayar programı yazılmıştır. Programda kullanılan $7 \times 6 \times 10 = 420$ adet kuraldan bir tanesi aşağıda örnek olarak verilmiştir:

$$\text{EĞER } \gamma_k(i) = \gamma_k(3) \text{ ve } w_o(j) = w_o(4) \text{ ve } PI(k) = PI(5) \\ \text{İSE } P_s = EB|P_s(7), P_s(8), P_s(9)| \quad (1)$$

Denklem (1) 'de $\gamma_k(i)$ kuru birim hacim ağırlık bulanık alt kümesini, $w_o(j)$ başlangıç su muhtevası bulanık alt kümesini, $PI(k)$ plastisite indisi bulanık alt kümesini ve $P_s(z)$ şişme basıncı bulanık alt kümesini göstermektedir. Denklem (1), kuru birim hacim ağırlık değerinin 3 no'lu kuru birim hacim ağırlık bulanık alt kümesinde, başlangıç su muhtevası değerinin 4 no'lu su muhtevası bulanık alt kümesinde ve plastisite indisinin de 5 no'lu plastisite indisi bulanık alt kümesinde olması durumunu göstermektedir. Şişme basıncı ise 7, 8 ve 9 no'lu şişme basıncı bulanık alt kümelerinden oluşmaktadır. "EĞER-İSE" kural tablosu Bulgular kısmında verilmiştir.



Şekil 4. Şişme basıncı alt kümeleri [20]

2.2. Deneylerde kullanılan numunelerin tanıtılması

Bu çalışmada, farklı bölgelerden temin edilen üç farklı yüksek plastisiteli örselenmiş kil numunesi kullanılmıştır. Numuneler üzerinde elek analizi ve kıvam limitleri deneyleri yapılarak numunelerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre zemin sınıfları tespit edilmiştir. Standart kompaksiyon deneyleri yapılarak numunelerin en iyi şartlarda sıkılaşabileceği optimum su muhtevaları ve

bu su muhtevalarında elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Deneylerde ASTM Standartları uygulanmıştır [36-41]. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 1 'de verilmiştir.

Özellikleri belirlenen numuneler üzerinde ASTM D4546 [37] 'da önerilen sabit hacimli şişme deneyi yapılmıştır. Deneylerde kullanılan zemin numuneleri No.40 eleğinden elenmiştir. Elenen numuneler 24 saat etüvde bekletildikten sonra, optimum su

muhtevasının kuru ve ıslak tarafında olacak şekilde, önceden belirlenen farklı başlangıç su muhtevalarında (%15, %20, %25, %30, %35, %40) karıştırılarak hazırlanmışlardır. Numuneler üzerinde yapılan deneylerin her aşamasında saf su kullanılmıştır. Farklı su muhtevalarında olacak şekilde hazırlanan numuneler, çapı 7.10-7.50 cm ve yüksekliği 1,60-2,00 cm arasında değişen ödometre ringlerine farklı kuru birim hacim ağırlıklarda (11.5

kN/m³, 13.0 kN/m³, 14.0 kN/m³, 15.0 kN/m³, 16.0 kN/m³, 17.0 kN/m³) olacak şekilde sıkıştırılmışlardır. Deneyler öncelikle, sabit bir kuru birim hacim ağırlıkta ve farklı başlangıç su muhtevaları için daha sonra, sabit bir su muhtevasında ve farklı kuru birim hacim ağırlıklar için ayrı ayrı yapılmıştır. Sıkıştırma sırasında, numunelerin su muhtevalarının değişmemesine ve homojen bir sıkışma sağlanmasına özen gösterilmiştir.

Tablo 1. Zemin numunelerinin özellikleri [20].

Özellikler	Numune 1	Numune 2	Numune 3
Likit limit (%)	75	73	66
Plastik limit (%)	21	26	28
Plastisite indisi (%)	54	47	38
Rötre limiti (%)	7	13	10
Özgül ağırlık	27.4	27.7	28.1
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	16.1	16.0	15.2
Optimum su muhtevası (%)	23	23	27
Çakıl (%)	1	1	0
Kum (%)	6	3	2
Silt + Kil (%)	93	96	98
Renk	Dark grey	Red	Red
Zemin Sınıfı	CH	CH	CH

Başlangıç su muhtevası %40 olduğunda numuneleri 16.0 kN/m³ kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırmak mümkün olamamıştır. Aynı şekilde 17.0 kN/m³ kuru birim hacim ağırlıkta da, sadece %15 ve %20 su muhtevalarındaki numuneler sıkıştırılabildiği görülmüştür.

Hazırlanan sıkıştırılmış numunelerin altına ve üstüne poroz kağıt ve poroz taş yerleştirilerek ödometre hücresine konulmuştur. Hücreye yerleştirilen numuneye alt poroz taş seviyesine kadar saf su ilave edilerek, numunenin kapiler yolla su alması sağlanmıştır. Şişme deneylerinde, numune su alırken ödometre hücresi üzerindeki deformasyon saatinin sıfırda kalmasını sağlayacak şekilde sürekli yükleme yapılmıştır. Şişme olmayacak şekilde numuneye uygulanan basınç sürekli artırılmış ve düşey deformasyon saatinin ibresi sıfırda sabit tutulmuştur. Şişmenin engellendiği nihai basınç, şişme basıncı olarak alınmıştır. Deney sonuçları Bulgular kısmında verilmiştir.

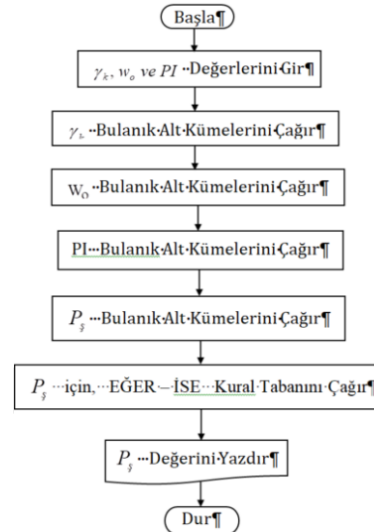
3. Bulgular

Kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası ve plastisite indisinin girdi, sabit hacimli şişme basıncının ise çıktı olarak bulunacağı bulanık mantık modellemesinden oluşturulan EĞER-İSE kuralları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2'de killerin kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi değerleri için hazırlanmış, toplam 7x6x10=420 adet kural mevcuttur. Bu kurallar ve bulanık mantık hesaplama kuralları, Fortran programlama dilinde yazılarak, sıkıştırılmış bir kil numunesinin sahip olduğu kuru birim hacim ağırlığı, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisine göre şişme basıncının tahmini

mümkün olmaktadır. Hazırlanan programın akış şeması ise Şekil 5 'de görülmektedir.

Bulanık mantık kuralları uygulanarak belirlenen çıktının durulaştırılması gerekmektedir. Durulaştırma işlemi, bulanıklaştırma işleminin tersidir. Yani, bulanık ifadelerden kesin ifadelere geçiş yapılmaktadır. Bulanık çıkarımdan tek sayılı bir tasarım büyüklüğünün elde edilmesi istenilirse, bunun için durulaştırma işlemi uygulanmalıdır. Durulaştırma işlemleri için literatürde birçok yöntem kullanılmaktadır [31].

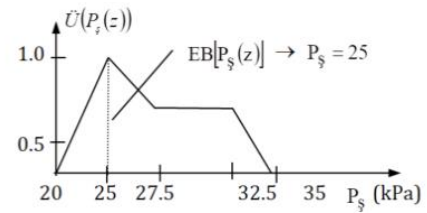


Şekil 5. Sıkıştırılmış killi zeminlerin şişme basınçlarının tahmini için Fortran dilinde yazılmış programın akış şeması [20]

Tablo 2. Şişme basıncı tahmini için oluşturulmuş bulanık model kuralları [20]

γ_k alt küme numarası	w_o alt küme numarası	PI alt küme numarası									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21
	2	1	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	3	1	1-4	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19
	4	1	1-3	1-5	3-6	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17
	5	1	1-2	1-3	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
	6	1	1	1-2	1-3	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14
2	1	1	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
	2	1	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21
	3	1	2-4	4-5	6-7	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	4	1	1-4	2-5	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18
	5	1	1-2	1-4	2-5	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17
	6	1	1	1-2	1-4	2-5	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15
3	1	1	6-7	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22
	2	1	5-6	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21
	3	1	3-5	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20
	4	1	1-5	3-6	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19
	5	1	1-3	1-4	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17
	6	1	1-2	1-3	1-4	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15
4	1	1	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20	19-22	21-24
	2	1	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19	18-21	20-22
	3	1	3-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20	19-22
	4	1	2-4	4-6	6-7	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	5	1	1-3	2-4	4-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18
	6	1	1	1-2	2-4	4-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16
5	1	1	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22
	2	1	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-22
	3	1	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
	4	1	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21
	5	1	1-3	3-5	5-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19
	6	1	1-2	1-3	3-5	5-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17
6	1	1	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19	18-21	20-22	22
	2	1	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20	19-22	21-22
	3	1	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19	18-21	20-22
	4	1	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
	5	1	1-4	3-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20
	6	1	1-2	1-4	3-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18
7	1	1	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-22	22
	2	1	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22
	3	1	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-22
	4	1	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22
	5	1	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	6	1	1-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18

Bu çalışmada birkaç durulaştırma uygulaması örnek olarak verilmiştir. En büyük üyelik ilkesi kullanılarak yapılan durulaştırmanın diğer bir adı yükseklik yöntemidir. Bu yöntemin kullanılması için tepeleri olan çıkarımlara gerek vardır. Şekil 6 'da gösterilen bu çalışmadaki probleme uygulanan, durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için Denklem (2) kullanılmaktadır. Kısaca ifade etmek gerekirse, en büyük üyelik derecesine sahip olan değer, bulanık işlemler sonucunda elde edilen şişme basıncı değeri olarak alınır.

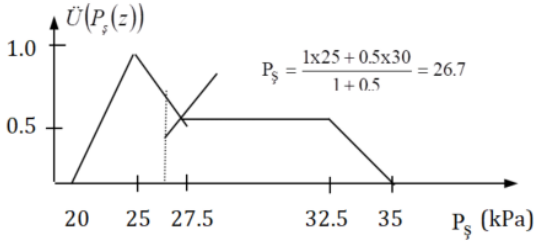


Şekil 6. En büyük üyelik derecesi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması [20]

$$P_s = EB|P_s(z)| \quad (2)$$

Ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılarak yapılacak durulaştırmada simetrik bir üyelik fonksiyonunun bulunması gereklidir. Böylece, çıkışı oluşturan bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarının her biri sahip oldukları en büyük üyelik derecesi değeri ile çarpılarak, ağırlıklı ortalamaları alınır. Şekil 7 'de gösterilen durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için Denklem (3) kullanılmaktadır.

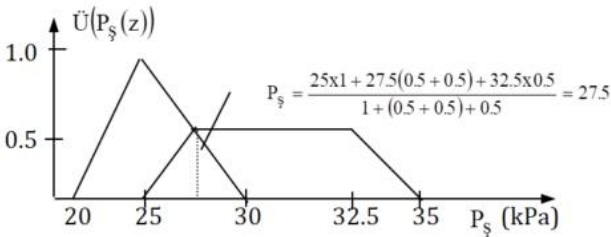
$$P_s = \frac{\sum \bar{U}(P_s(z))P_s(z)}{\sum \bar{U}(P_s(z))} \quad (3)$$



Şekil 7. Ağırlıklı ortalama yöntemi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması [20]

Kullanılan durulaştırma işlemleri arasında en hızlı olan yöntem toplamların merkezi (COS) yöntemidir. Bu yöntemde iki bulanık kümenin birleşimi yerine, kümelerin alanlarının cebirsel toplamları kullanılır. Bu hesaplama tarzı ağırlıklı ortalama durulaştırmasına benzemektedir. Ancak toplamların merkezi yönteminde ağırlıklar ilgili üyelik fonksiyonlarının alanlarıdır. Ortalama ağırlıklar yönteminde ise bu her bir üyelik derecesidir. Toplamların merkezi yönteminin dezavantajı, örtüşen kısımların iki defa toplama girmesidir. Şekil 8 'de gösterilen durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için Denklem (4) kullanılmıştır.

$$P_s = \frac{\int P_s(z) \cdot \sum_{i=1}^n \bar{U}(P_s(z)) dP_s(z)}{\sum_{i=1}^n \bar{U}(P_s(z)) dP_s(z)} \quad (4)$$



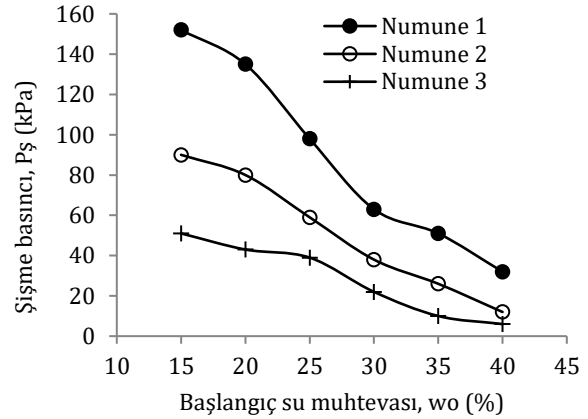
Şekil 8. Toplamların merkezi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması [20]

Bütün bulanıklık işlemlerinin sonucunda, ulaşılan harmanlanmış çıkarımların durulaştırılması ile sayısal değerlerin elde edilmesi, mühendislerin tasarım, kontrol ve planlama işlemlerinde kullanabilmeleri için gereklidir. Burada sunulan durulaştırma yöntemlerinden hangisinin en iyi olduğu, kullanıcının ilgilendiği sorunla ilişkili olarak, bazı durumları önceden bilmesine bağlıdır. İncelenen olayın sürekli olup olmadığı, durulaştırmadan sonra

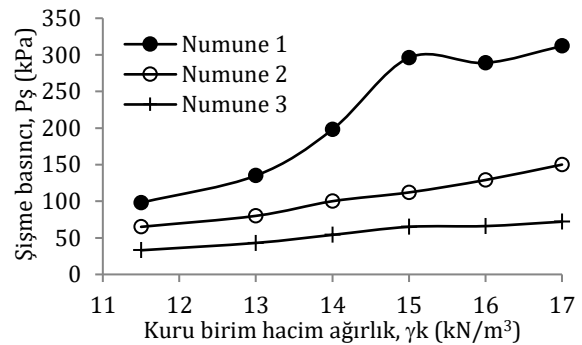
varılan sonucun belirsiz, ikilemlili veya çok cevaplı olmaması, basit olması, sonuçların makul ve mantıklı olması önemlidir. Ayrıca, en önemli şart, durulaştırma sonucunda elde edilen tek değer, ölçülmüş verilerle uyum sağlaması önemlidir. Bu çalışmada şişme basınçlarının durulaştırma hesaplanmasında en büyük üyelik derecesi yöntemiyle elde edilen şişme basıncı değerleri kullanılmıştır.

Sıkıştırılmış bir kilin şişme basıncının tahmin edilmesi için oluşturulmuş bulanık modelden elde edilen tahmini şişme basıncı değerleri ile deneylerden elde edilen şişme basıncı değerleri ve aralarındaki yüzde hata miktarları Tablo 3 'de verilmiştir.

Tablo 3 'de verilen deney sonuçlarına göre, örnek olması açısından, sabit bir kuru birim hacim ağırlık için farklı su muhtevalarına göre değişen şişme basınçlarına ve sabit bir su muhtevası için farklı kuru birim hacim ağırlıklara göre değişen şişme basınçlarına ait ilişkiler, sırasıyla, Şekil 9 ve Şekil 10 'da çizilmiştir. Şekil 9 'a göre başlangıç su muhtevası artarken şişme basıncının azaldığı, Şekil 10 'a göre ise kuru birim hacim ağırlık artarken şişme basıncının arttığı görülmektedir.



Şekil 9. $\gamma_k=13.0 \text{ kN/m}^3$ için başlangıç su muhtevası ile şişme basıncı ilişkileri



Şekil 10. $w_0=\%20$ için kuru birim hacim ağırlık ile şişme basıncı ilişkileri

Tablo 3 'de gösterilen hata miktarları, Denklem (5) kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, tüm deney

sonuçlarına göre ortalama karesel hataların karekök (RMSE) değeri Denklem (6) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\text{Hata}(\text{şişme}) = \frac{P_s^* - P_s}{P_s} \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_s^* - P_s)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

Burada, P_s^* bulanık mantık modelinden elde edilen sabit hacimli şişme basıncı değerlerini, P_s deneysel çalışmalardan elde edilen şişme basıncı değerlerini ve n ise toplam veri sayısını göstermektedir.

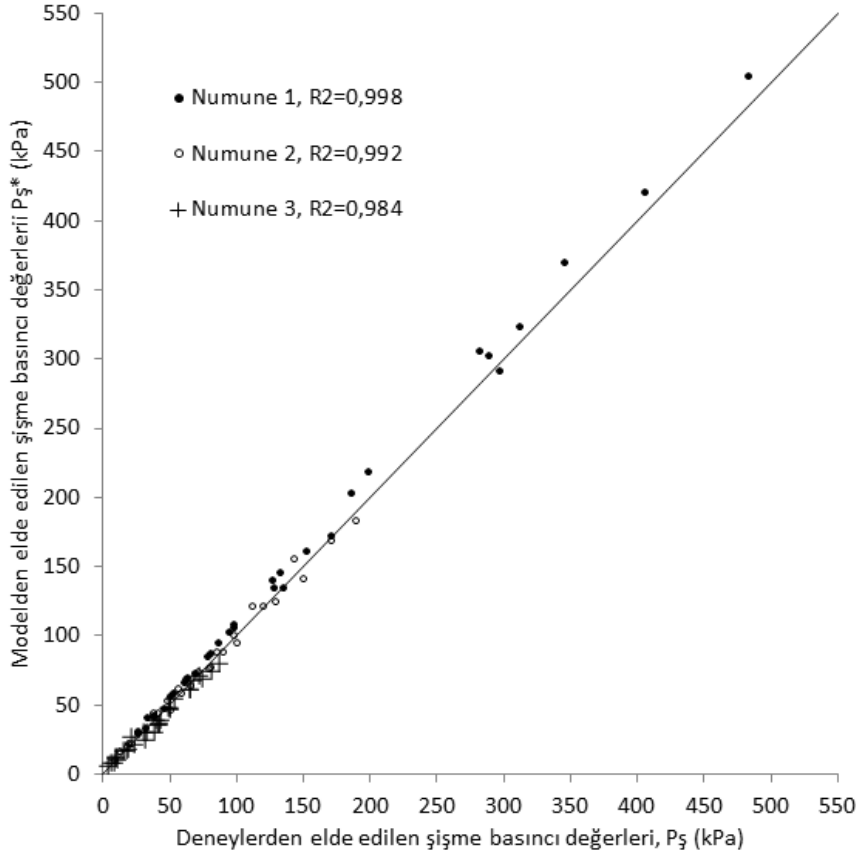
Tablo 3. Deney sonuçları, bulanık modelden tahmin edilen sonuçlar ve hata miktarları [20]

γ_k kN/m ³	Wo %	Numune 1			Numune 2			Numune 3		
		P_s kPa	P_s^* kPa	Hata %	P_s kPa	P_s^* kPa	Hata %	P_s kPa	P_s^* kPa	Hata %
11.5	15	126	140.6	11.59	79	76.1	-3.67	42	36.2	-13.81
	20	98	108.0	10.2	65	64.3	-1.08	33	29.4	-10.91
	25	86	95.4	10.93	50	46.7	-6.60	24	20.5	-14.58
	30	53	58.5	10.38	26	30.7	18.08	18	16.6	-7.78
	35	33	41.1	24.55	19	22.5	18.42	10	11.5	15.00
	40	26	30.3	16.54	8	10.7	33.75	4	5.5	37.50
13.0	15	152	161.0	5.92	90	88.1	-2.11	51	46.9	-8.04
	20	135	134.6	-0.30	80	77.9	-2.62	43	38.9	-9.53
	25	98	106.0	8.20	59	58.7	-0.51	39	29.5	-24.36
	30	63	69.5	10.32	38	42.7	12.37	22	25.8	17.27
	35	51	56.0	9.80	26	29.6	13.85	10	12.3	23.00
	40	32	33.5	4.69	12	16.7	39.17	6	7.8	30.00
14.0	15	281	306.0	8.90	120	121.9	1.58	68	67.6	-0.59
	20	198	219.0	10.60	100	94.5	-5.50	54	53.7	-0.56
	25	132	145.6	10.30	71	73.7	3.80	42	35.5	-15.48
	30	78	85.1	8.97	48	52.9	10.21	31	29.3	-5.48
	35	61	66.0	8.20	26	29.5	13.46	15	16.7	11.33
	40	37	41.7	12.70	18	20.1	11.67	9	8.1	-10.00
15.0	15	345	370.1	7.28	143	155.8	8.95	74	68.3	-7.70
	20	296	291.7	-1.45	112	122.2	9.11	65	60.5	-6.92
	25	170	172.6	-1.53	85	88.7	4.35	51	46.5	-8.82
	30	94	102.7	9.26	56	62.1	10.2	40	38.5	-3.75
	35	69	73.2	6.09	38	43.5	14.47	19	18.0	-5.26
	40	45	47.6	5.78	21	22.6	7.62	11	9.9	-10.00
16.0	15	405	420.3	3.78	171	169.5	-0.88	82	74.0	-9.76
	20	289	302.2	4.57	129	124.8	-3.26	66	60.8	-7.88
	25	186	203.6	9.10	98	100.0	2.04	49	48.2	-1.63
	30	128	135.0	5.47	62	68.3	9.70	41	35.5	-13.41
	35	81	87.2	7.65	41	44.1	7.56	32	23.8	-25.63
	40	45	47.6	5.78	21	22.6	7.62	11	9.9	-10.00
17.0	15	483	504.7	4.49	189	183.2	-3.07	88	79.8	-9.32
	20	312	324.1	3.88	150	141.4	-5.73	72	71.1	-1.25

93 adet deneyden elde edilen şişme basıncı sonuçlarının aritmetik ortalaması 86,9 kPa iken, modelden elde edilen şişme basınçlarının aritmetik ortalaması 89,7 kPa olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçlarının medyan değeri 61,0 kPa, model sonuçlarının ise 60,8 kPa'dır. Şişme basınçlarının Denklem (5) 'e göre hesaplanan ortalama hata değeri %9,73 olarak ve Denklem (6) 'ya göre RMSE değeri 7,76 kPa olarak belirlenmiştir.

Bulanık mantık modelinden elde edilen tahmini şişme basıncı değerleri ile deneylerden elde edilen şişme

basıncı değerlerinin karşılaştırılması, ayrıca Şekil 11 'de grafik olarak gösterilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere, bulanık modelden elde edilen tahmini şişme basıncı değerleri ile deneylerden elde edilen şişme basıncı değerleri uyum içerisindedir. Her bir numune için R^2 değerleri şekil üzerinde verilmiş, tüm deney sonuçlarına ait R^2 değeri ise 0,996 olarak elde edilmiştir. Ayrıca deney sonuçları ile model sonuçlarının 1:1 doğrusu üzerinde saçılımları da teklif edilen bulanık mantık modelinin uygulanabilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. Deneylerden elde edilen şişme basıncı değerleri ile bulanık mantık modelinden elde edilen şişme basıncı değerlerinin karşılaştırılması [20]

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, killi zeminlerin şişme basınçlarının bulanık mantık yöntemi kullanılarak tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Killi zeminlerin şişme davranışları üzerinde zemin cinsi, mineralojik yapısı, kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası, doygunluk derecesi, permeabilite, tabii veya sıkıştırılmış zemin olması, gerilme tarihçesi gibi birçok parametre etkili olmaktadır. Şişme basıncı değerinin tahmininde, bu parametrelerden; kilin plastisite indisi, kuru birim hacim ağırlığı ve başlangıç su muhtevası gibi etkenler dikkate alınmıştır. Farklı plastisite indisine sahip kil numuneleri, farklı kuru birim hacim ağırlıkta ve farklı başlangıç su muhtevasında olacak şekilde kompaksiyonla hazırlanmışlardır. Bu numuneler üzerinde, ödometre deney sistemi kullanılarak sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır.

Yapılan şişme deneylerinden, sabit su muhtevasında ve sabit kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış zeminlerin plastisite indisi arttıkça, zeminin şişme basıncının arttığı görülmüştür. Sabit kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış numunelerde ise, başlangıç su muhtevasının artmasıyla şişme basıncının azaldığı görülmüştür. Aynı su muhtevasında, fakat farklı kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış numuneler üzerinde yapılan şişme basıncı deney sonuçlarına göre, kuru birim hacim

ağırlığın artmasıyla şişme basıncının arttığı belirlenmiştir.

Şişme basıncı deneyleri oldukça uzun zaman alan deneylerdir. Bu çalışmada, sıkıştırılmış killi zeminlerin sabit hacimli şişme basıncının tahmin edilmesinde bulanık mantık yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Şişme basıncının yüksek olduğu durumlarda, bulanık mantık modelinden elde edilen şişme basınçları ile deneysel sonuçlar arasındaki maksimum hata miktarı %10 dolaylarındayken, çok düşük şişme basıncı değerlerinde maksimum hata miktarının %30 'un üzerine çıktığı görülmüştür. Şişme basıncı tahmininde ortalama hata miktarı ise %9,73 olarak elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen şişme basıncı sonuçlarının aritmetik ortalaması 86,9 kPa iken, modelden elde edilen şişme basınçlarının aritmetik ortalaması 89,7 kPa olarak hesaplanmıştır. Şişme basıncının ortalama karesel hataların karekök (RMSE) değeri 7,76 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılmasından R^2 değeri 0,996 olarak elde edilmiştir. Şişme basıncının tahmininde yüksek şişmenin olduğu durumlarda bulanık mantık modelinin kullanılabileceği görülmüştür. Daha düşük şişme basınçları için şişme basıncı alt kümelerinin sayısının artırılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, “Killi Zeminlerin Şişme ve Emme Özelliklerinin Belirlenmesinde Bulanık Model (Fuzzy Logic) Yaklaşımı” başlıklı 310 nolu projeden üretilmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederler.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Petry, T.M., Little, D.N. 2002. Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures—history, Practice, and Future, J. Mater. Civ. Eng., 14 (6), 447-460.
- [2] Bell, F.G. 2007. Engineering Geology, 2nd edition, Butterworth-Heinemann.
- [3] Al-Mukhtar, M., Khattab, S., Alcover, J.F. 2012. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil, Eng. Geol., 139-140, 17-27.
- [4] Jamsawang, P., Abdulyamet, B., Voottipruex, P., Jongpradist, P., Likitlersuang, S., Tantayopin, K. 2023. The free swell potential of expansive clays stabilized with the shallow bottom ash mixing method, Engineering Geology, 315, 107027.
- [5] El-Sohby, M.A., Rabba, E.A. 1981. Some factors affecting swelling of clayey soils, Geotech. Engineering, 12, 19-39.
- [6] Nelson, J.D. and Miller, D.J. 1992. Expansive Soils Problem and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Wiley & Sons, 253 p.
- [7] Elsharief, A.M., Zumrawi, M.E., Salam, A.M. 2014. Experimental Study of Some Factors Affecting Swelling Pressure, University of Khartoum Engineering Journal, 4(2), 1-7.
- [8] Smaida, A., Mekerta, B., Gueddouda, M.K. 2021. Physico-mechanical stabilization of a high swelling clay, Construction and Building Materials, 289, 123197.
- [9] Chen, F.H. 1988. Foundations on Expansive Soil, American Elsevier Science Publ., New York, 280p.
- [10] Komine, H., Ogata, N. 1994. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, Can. Geotech. J., 31, 478-490.
- [11] Erol, O., Dhowian, A.W. 1990. Swell behaviour of arid climate shales from Saudi Arabia, Quaterly journal of Engr. Geology, 23, 243-254.
- [12] Basma, A.A. 1993. Prediction of Expansion Degree for Natural Compacted Clays, Geotech. Test. J., 16(6), 542-549.
- [13] Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 338-353.
- [14] Juang C.H., Wey, J.L., Elton, D.J. 1991. Model for capacity of single piles in sand using Fuzzy sets, J. Geotechnical Engineering, 17(12), 1920-1931.
- [15] Juang, C.H., Lee, D.H., Sheu, C. 1992. Mapping slope failure potential using Fuzzy sets, J. Geotechnical Engineering, 118(3), 475-494.
- [16] Juang, C.H., Huang, X.H., Holtz, R.D., Chen J.W. 1996. Determination relative density of sands from CPT using Fuzzy sets, J. Geotechnical Engineering, 122(1), 1-6.
- [17] Nawari, N.O., Liang, R. 2000. Fuzzy-based approach for determination of characteristic values of measured geotechnical parameters, Can. Geotech. J., 37, 1131-1140.
- [18] Zhang, Z. and Tümay, M.T. 1999. Statistical to fuzzy approach toward CPT soil clasification, J. Geotechnical and Geoenviromental Engineering, 125(3), 179-186.
- [19] Çimen, Ö., Keskin, S.N. 2001. Emme kapasitesinin zamana bağlı ilerleyişinin bulanık mantıkla belirlenmesi, Mühendislikte Modern Yöntemler Sempozyumu, İstanbul, 64-71.
- [20] Çimen, Ö. 2002. Killi Zeminlerin Şişme ve Emme Özelliklerinin Belirlenmesinde Bulanık Model (Fuzzy Logic) Yaklaşımı, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 175s.
- [21] Avci, Y., Ekmen, A.B. 2023. Artificial intelligence assisted optimization of rammed aggregate pier supported raft foundation systems based on parametric three-dimensional finite element analysis, Structures, 56, 105031.
- [22] Ekmen, A.B., Avci, Y. 2024. Development of novel artificial intelligence functions based on 3D

- finite element method using February 6 Kahramanmaraş Seismic Records for earthquake effects prediction in various soils, *Engineering Geology*, 336, 107570.
- [23] İkizler, B., Vekli, M., Doğan E., Aytekin, M., Kocabaş F. 2014, Prediction of swelling pressures of expansive soils using soft computing methods, *Neural Comput. Applic.*, 24, 473-485.
- [24] Hu, H., Vanapalli, S.K. 2016. Prediction of the variation of swelling pressure and 1-D heave of expansive soils with respect to suction using the soil water retention curve as a tool, *Can. Geotech. J.*, 53, 1-22.
- [25] Erzin, Y., Erol, O. 2007. Swell pressure prediction by suction methods, *Engineering Geology*, 92(3-4), 133-145.
- [26] Ikechukwu A.F., Mostafa, M.M.H, 2022. Swelling Pressure Prediction of Compacted Unsaturated Expansive Soils, *International Journal of Engineering Research in Africa*, 59,119-134.
- [27] Elbadry, H. 2017. Simplified reliable prediction method for determining the volume change of expansive soils based on simply physical tests, *HBRC Journal*, 13,353-360.
- [28] Agbelele, K.J., P’Kla, A., Houanou, K.A., Dara, K.S., Degan, G., Gbaguidi Aisse G. 2020. Estimation of the Swelling Pressure of the Clayey Soils of the TCHI Depression in Benin for the Good Holding of the Equipment’s, *Journal of Scientific and Engineering Research*, 7(4), 183-190.
- [29] Gokceoglu, C. 2021. A practical linguistic fuzzy inference system for indirect determination of swelling pressure of expansive soils, *Academia Letters*.
- [30] Hozatlıoğlu, D.T., Yılmaz, I. 2023. A Fuzzy Classification Process for Swelling Soils, 10, 474-487.
- [31] Çimen, Ö., Keskin S.N., Yıldırım, H. 2012. Prediction of Swelling Potential and Pressure in Compacted Clay, *Arab J Sci Eng.*, 37, 1535-1546.
- [32] Taherdangkoo, R., Tyurin, V., Shehab, M., Ardejani, F.D., Tang, A.M., Narmandakh, D., Butscher, C. 2023. An efficient neural network model to determine maximum swelling pressure of clayey soils, *Computers and Geotechnics*, 162, 105693.
- [33] Jalal, F.E., Iqbal, M., Khan, W.A., Jamal, A., Onyelowe, K. 2024. ANN-based swarm intelligence for predicting expansive soil swell pressure and compression strength, *Scientific Reports*, 14, 14597.
- [34] Aneke, F., Onyelowe, K.C., Ebid, A.M. 2024. AI-Based Estimation of Swelling Stress for Soils in South Africa, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11, 1049-1072.
- [35] Sen, Z. 2001. Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, Publications of Water Foundation, Turkey (in Turkish).
- [36] ASTM D854, 2010. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania.
- [37] ASTM D1140, 2017. Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Soils by Washing, West Conshohocken, PA, A.B.D.
- [38] ASTM D422, 2014. Standard Test Method for Particle- Size Analysis of Soils, West Conshohocken, PA, A.B.D.
- [39] ASTM D4318, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- [40] ASTM D698, 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, Pennsylvania.
- [41] ASTM D4546. Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils, West Conshohocken, PA, A.B.D.

Çok Katmanlı Gömülü Arkeolojik Kalıntıların Araştırılmasında Elektrik Özdirenç Yöntemi: Aydın Küçüktepe Höyük Örneği

Hasan KARAASLAN^{1*} 

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

(Alınış / Received: 03.07.2024, Kabul / Accepted: 04.09.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Arkeojeofizik,
Özdirenç Tomografi,
Jeoarkeoloji,
Höyük,
Aydın

Öz: Yer altında gömülü arkeolojik alanların görüntülenmesinde, sağladığı yüksek çözünürlük ve tahribatsız uygulama yetenekleriyle jeofizik yöntemlerden olan elektrik özdirenç yöntemi kanıtlanmış etkinliğe sahiptir. Bu çalışma, elektrik özdirenç verileri kullanılarak Aydın İli'nin Koçarlı ilçesinde yer alan Küçüktepe Höyük alanında gömülü arkeolojik yapıların görüntülenmesini amaçlamaktadır. . İnceleme alanında paralel 29 profilde Wenner elektrot dizilimine göre ölçülen iki- ve üç-boyutlu özdirenç verilerinin hem iki hem de üç-boyutlu ters çözümleri yapılarak yeraltı özdirenç dağılımı belirlenmiştir. Daha sonra, özdirenç kat haritaları veya başka bir deyişle üç-boyutlu derinlik kesitleri ile görselleştirme yapılarak, yeraltındaki gömülü arkeolojik kalıntılara karşılık gelen özdirenç belirtiler yorumlanmıştır. Bunların 0,5 m derinlikte başlayan 30x40x4 metrelik boyutlarda dikdörtgen şekilli yapı ile 6 metre seviyesinde 13x20x3 metrelik duvar türü D-B uzanımlı prizmatik bir yapıya karşılık geldiği anlaşılmıştır. Sonuç olarak, kesitlerdeki yüksek özdirenç belirtiler, Höyük alanındaki katmanlı yapının varlığını ortaya çıkarmıştır. Dolayısıyla jeofiziğin elektriksiz özdirenç tomografi yöntemi, çok katmanlı bir arkeolojik alanda bile yapıya hasar vermeden etkili sonuçlar ortaya çıkarmıştır.

Electrical Resistivity Method in the Investigation of Multi-Layered Buried Archaeological Remains: Aydın Küçüktepe Höyük Example

Keywords

Archaeogeophysics,
Resistivity Tomography,
Geoarchaeology,
Ancient Settlement (Höyük),
Aydın

Abstract: The electrical resistivity method, one of the geophysical methods that can be applied in the field non-destructively, has high resolution and proven effectiveness in investigating archaeological sites. In this study, electrical resistivity tomography research was conducted to determine the buried structures in the Aydın Küçüktepe Höyük area. Underground resistivity distribution was determined by performing both two- and three-dimensional inverse solutions of two- and three-dimensional resistivity data measured according to the Wenner electrode array in 29 parallel profiles in the study area. Then, by visualizing resistivity floor maps, or in other words, three-dimensional depth sections, resistivity anomalies corresponding to buried archaeological remains underground were interpreted. These remains correspond to a rectangular structure with dimensions of 30x40x4 meters starting at 0.5 m depth and a wall-type E-W extending prismatic structure with dimensions of 13x20x3 meters at the 6-meter depth. Therefore, the electrical resistivity tomography method of geophysics has produced effective results even in a multi-layered archaeological site.

1. Giriş

Günümüzde arkeolojik prospeksiyonda kullanılan jeofizik yöntemler sağladıkları önemli avantajlar nedeniyle öne çıkmaktadır [1,2]. Uygulanması ucuz, kolay ve hızlı olan jeofizik yöntemler, arkeolojik

kalıntılara herhangi bir zarar vermeden bu yapıları tespit edilebilir ve kazı çalışmalarına yön verebilir [3]. Bu nedenlerden dolayı jeofizikte "arkeojeofizik" kavramı dahi ortaya çıkmıştır. Ek olarak, son yarım asırda jeofizik yöntemlerde yaşanan muazzam teknolojik ve bilimsel ilerlemeler, yeraltı

*İlgili yazar: hkaraaslan@sakarya.edu.tr

araştırmalarında daha güvenilir sonuçlara ulaşmayı mümkün kılmıştır. Buna paralel olarak jeofizik yöntemler çevresel problemler, maden aramaları, zemin etütleri gibi birçok alanda sıklıkla başvurulan bir araç haline gelmiştir.

İnsan-çevre-kültür ilişkisinin doğrudan konu edildiği mevzulardan biri olan gömülü arkeolojik yapıların bulunduğu alanlar bu tür çevre problemlerinden birini teşkil etmektedir. Bahsedilen jeofizik ilerlemeler, arkeolojik çalışmalarda da önemli bir dönüşüme yol açmıştır. Arkeolojik alanlarda yapılan incelemeler, çeşitli disiplinlerin bir araya geldiği karmaşık çalışmalardır. Bu disiplinler arasında hava fotoğrafları, uydu görüntüleri, coğrafi bilgi sistemleri, jeofizik, jeomorfoloji ve jeokimya gibi alanlar bulunmaktadır. Yüzeyle uygulanabilen jeofizik yöntemlerin kullanılmaya başlamasıyla birlikte, arkeolojik kazı çalışmaları yeni bir boyut kazanmıştır.

Gömülü yapılar ile gömülü oldukları jeolojik ortam arasında yapay veya doğal olarak fiziksel bir farklılığın mevcut olması jeofizik tekniklerin cevap üretmesini sağlayan esas sebeptir. Anomali kavramı ile ifade edilen bu olgu, temel uygulamalı jeofizik paradigmasını da açıklamaktadır. Buna göre çevresel faktörlere göre değişen bu fiziksel belirti (elektrik özdirenç, manyetik süseptibilite, sismik dalga hızı vb.) bir takım jeofizik teknikler ile yüzeyden ölçülebilir ve gömülü yapıların tespitine imkan verebilir [1, 4, 5,6].

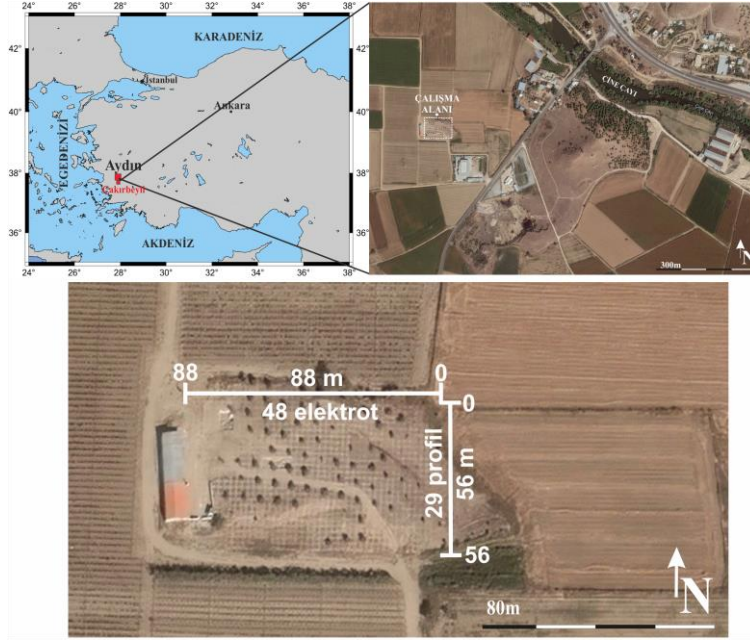
Kayaçalarda özdirenç çeşitliliği gözeneklilik, su içeriği, kil içeriği, çatlak yapısı vb. özelliklerin farklılığından kaynaklanır. Gömülü arkeolojik yapıların bulunduğu alanlarda bina yapıtaşı blokları ile onları örten toprak arasındaki bariz özdirenç farklılıkları oluşmaktadır. Bundan ötürü arkeojeofizikte en yaygın kullanılan yöntemlerden biri elektrik özdirenç (rezistivite) yöntemidir. Gömülü arkeolojik yapıların çoğunluğu 0,5 ile 2 metre derinliğinde yer alırlar. Fakat farklı zamansal dönemlere ait yapı bulundurabilen çok katmanlı yerleşimlerde, farklı seviyelerde farklı fiziksel ve geometrik özelliklerde gömülü arkeolojik yapılar mevcut olabilir. Elektrik özdirenç yöntemiyle, gömülü bu tür yapılar kazılmadan önce yeryüzünde

yapılan ölçümlerle görüntülenebilir. Yöntem, arkeolojik alanlarda duvarların, boşlukların ve diğer yapıların aydınlatılmasında oldukça sık bir şekilde kullanılmaktadır [7, 8, 9, 10]. Yöntemin başarısı, gömülü arkeolojik hedeflerin (duvarlar, yollar, binalar vb.) elektrik direnç özellikleri ile çevre ortamın özdirenç özellikleri arasındaki farka bağlıdır. Jeofizik donanımlardaki teknolojik ilerlemelere bağlı olarak, çok elektrotlu sistemler aracılığıyla bir alandaki verilerin daha hızlı ve kolay bir şekilde elde edilmesine olanak tanıyan elektrik özdirenç tomografisi (ERT) ölçümleri arkeolojik alanlarda yeraltına ait elektrik özdirenç dağılımlarının elde edilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır [6, 7, 11, 12, 13].

Bu çalışma, ERT tekniğini kullanarak Aydın İli Koçarlı ilçesinde 88x56 metrelik bir boyutta yer alan çok katmanlı bir arkeolojik yerleşim (Höyük) modellemesini sunmaktadır. Gömülü yapıların derinlik ve geometrik yapı bilgisi, çok katmanlı arkeolojik yapıların anlaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır ve bu çalışmanın amacı, bu karmaşık arkeolojik yapıyı ana hatlarıyla tanımlamaktır. Bu sayede ortaya çıkarılmasına katkı sunulacak yapının literatüre kazandırılması ve jeofizik yöntemin çevre-arkeoloji araştırmalarında kullanımının önemi de ortaya konacaktır.

2. Çalışma Alanı Tarihsel Arka Planı ve Genel Jeolojisi

Tüm Batı Anadolu'da olduğu gibi Aydın ve yakın çevresindeki yerleşme yapısında meydana gelen asıl değişmelerin başlangıcı, M.Ö. 1200 yıllarında Balkanlarda oluşan Kavimler göçüyle başlamıştır [14]. Balkanlarda yaşayan Traklar, boğazlar yoluyla ya da daha güneyde Ege Denizi'nden geçerek Batı Anadolu'ya ulaşmışlardır [15]. Trak kabileleri göçebe olmalarına rağmen, Büyük Menderes Ovası'nın kenarlarına yerleşmeler kurarak göçebelikten vazgeçmiş ve buradaki tarıma uygun şartların da yardımıyla tarla kültürüne yönelmişlerdir [16]. Aydın'ın temelini oluşturan Tralleis antik şehri de bu yerleşmelerden biri olmuştur.



Şekil 1. Yer bulduru haritası ve çalışma alanı (Google Earth' den düzenlenerek)

Küçük Tepe Höyük, Aydın ilinin Koçarlı ilçesi Çakırbeyli Köyü sınırları içerisinde Çine Çayı' nın hemen yakınında yer alan bir höyüktür (Şekil 1). Aydın il merkezine uzaklığı yaklaşık 11 km'dir [17,18]. Aydın ve çevresinde birçok Antik kent bulunmaktadır. Anadolu'nun iç kısımlarını Ege Denizi limanlarına ve Menteşe yöresini Menderes Ovası'na bağlayan kavşak noktasında stratejik bir konumda olması ve etki alanında çok zengin bir tarımsal potansiyelin bulunması Aydın'ı tarih boyunca önemli kılmıştır. Yeraltında gömülü yaklaşık 30x40m boyutlarında bir yapının varlığı araştırılan bu çalışma alanı, yaklaşık 5000 m²'lik bir alanı kapsamaktadır. Alanın hakim jeolojik unsuru Menderes Masifi temelinde yer alan paleozoyik yaşlı gnays birimidir [19]. Bu metamorfik kayaların üzerinde uyumsuzluk dokanakları ile Neojen ve Kuvaterner yaşlı örtü birimleri yer almaktadır. Alüvyon örtü yüzeyde toz haline gelmiş gnays zerrecikleri ve çakıl boyutlarında kalsit, kuvars, granit parçalarından oluşmaktadır. Alanın bu özellikleri düşünüldüğünde gömülü yapıya ait yapıtaşlarının bölgede var olan bu jeolojik birimlerden elde edildiği görülecektir. Dolayısıyla bu yapı taşlarından oluşan Höyük yapısı ile gömülü yapıları kaplayan örtü birimi arasında yeterli oranda özdirenç farkının oluşması jeofizik tekniklerin güvenilir sonuçlar üretmesine imkan tanıyacaktır.

3. Materyal ve Yöntem

Çalışma alanında yeraltında gömülü olabilecek arkeolojik yapıların geometrisi ve yeraltı yapısının incelenmesinde jeofizik yöntemlerden ERT yöntemi kullanılmıştır. Alandaki gömülü yapıları tanımlamak için iki-boyutlu (2-B) veri toplama düzeneğinde birbirine paralel olarak toplanan ERT profilleri ile üç-boyutlu (3-B) veri elde edilmesi de sağlanmıştır. Bu şekilde paralel olarak gerçekleştirilen 2-B ERT ölçümlerinden 3-B modele ulaşılması yarı-tam 3-B

özdirenç veri seti olarak adlandırılmakta ve sıklıkla kullanılmaktadır [1, 7, 12, 20].

Çalışma alanında ERT verisi ölçümü arazi şartları dikkate alınarak muhtemel gömülü yapıları dik kesecek doğrultuda 45 elektrotlu bir sistem (ARES GF çok kanallı rezistivite cihazı) ile Wenner dizilimi kullanılarak 29 profil üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1-2). Çalışma alanında oluşturulan karelejlarda profiller arası uzaklık 2 m olarak uygulanmıştır. Burada profiller arası uzaklığın en küçük elektrot aralığından düşük olmaması [21] sağlanarak 3-B veri oluşumuna yönelik imkan sağlanmıştır. Fakat yöntemin doğası gereği yatay veri kapsamının derinlikle azalmasından dolayı üretilen 3-B veride derinlik arttıkça tanımlanabilen bölge daralmaktadır. Wenner elektrot dizilimi arkeojeofizik araştırmalarda en çok kullanılan dizilimlerden biridir [3]. Açılışın tam orta noktasına denk gelen kısımda yeraltına ilişkin maksimum çözünürlük üretebilen dizilimin sinyal gücü diğer bütün dizilimlerden daha yüksek olması sebebiyle iyi çözünürlük üretmektedir [22]. Bu tür bir özellik gürültünün çok fazla olduğu alanlarda (arkeolojik alanlar gibi) etkili çözümler üretmeye oldukça katkı sunabilir.



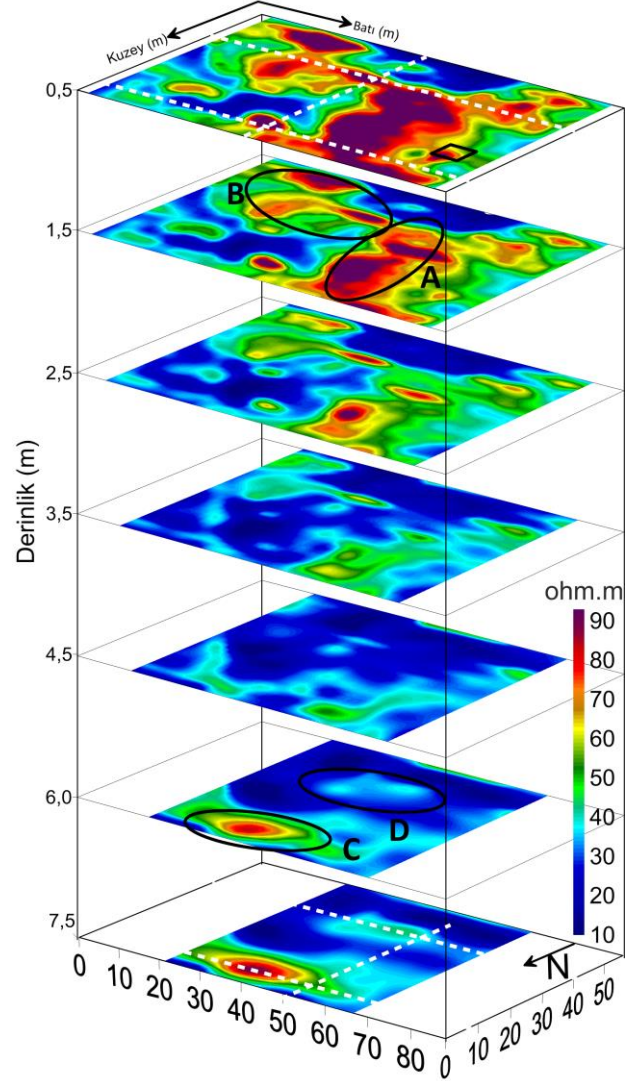
Şekil 2. Üstte - Küçüktepe Höyük' te jeofizik araştırma için oluşturulan kareyaj ve boyutları (Her bir kare 2x2 m boyutlarındadır). Altta - Şekil 5' te yer alan 3-B perspektif için oluşturulan hatlar, bakış yönleri (a)-(b) ve arkeolojik kazı alanı (Siyah dörtgen).

2 m elektrot aralığı ile toplamda her biri 88 metrelik D-B yönlü elektrik profiller üzerinde özdirenç değişimleri kaydedilmiştir (Şekil 2). Her bir profilde 315 adet veri olacak şekilde toplamda 9135 adet özdirenç verisi kaydedilmiştir. Elektrot aralığının 2 m olarak tercih edilmesiyle gömülü yapıları bir bütün olarak görüntüleyip yapılarla ilişkin ana hatları tespit etme yetkinliği amaçlanmıştır. Ölçülen veriler en küçük kareler ters çözüm yöntemini esas alan Res2Dinv ve Res3Dinv [23, 24] yazılımlarıyla değerlendirilmiştir. Ters çözümde gözlenen ve hesaplanan özdirenç değerleri arasındaki hata farkının mutlak değerinin (ABS) yinelemeli bir şekilde en aza indirilmesi amaçlanmaktadır [25, 26]. Birçok araştırmacı model sınırlarının keskin-köşeli sınırlardan oluştuğu durumlarda robust ters çözüm (L1 norm) ile daha doğru sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir [1, 2, 11, 20].

4. Araştırma Bulguları ve Tartışma

Çalışma alanında Höyük üzerinde gerçekleştirilen 29 adet 2B ERT profilinden elde edilen 3-B veriye ait ters-çözüm sonucu Şekil 3'te derinlik seviye haritaları şeklinde verilmiştir. 3-B ters çözüm süreci en fazla 5 yineleme ile tamamlanırken mutlak hata değeri %3.00 ile sonuca varılmıştır. Elde edilen 3B ERT seviye haritaları ile yaklaşık 8 metreye kadar karşılaşılan özdirenç değişimler gözlenmiştir. Buna göre

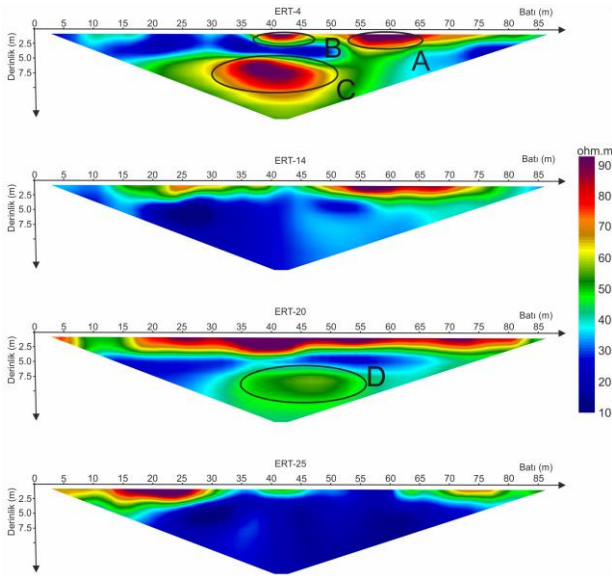
arkeolojik yapılara işaret edebilecek özdirenç farklılıkları tespit edilmiştir. Özellikle seviye haritalarında görece yüksek özdirençler ile temsil edilen alanların, bölgesel jeolojiye uygun olan kayalardan elde edilen arkeolojik yapı taşlarına dair bir tanımlama gösterdiği ilk bakışta göze çarpmaktadır. Şekil 3' te yer alan ve özdirenç değerleri 10-150 ohm.m arasında yer alan seviyeler 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m, 3.5 m, 4.5 m, 6 m ve 7.5 m derinliklerine ait özdirenç değişimlerini göstermektedir.



Şekil 3. 3-B ters çözüm sonuçlarından elde edilen 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m, 3.5 m, 4.5 m, 6 m ve 7.5 m derinliklere ait özdirenç seviye haritaları (Şekil üzerindeki beyaz kesikli çizgiler ile gösterilen hatlar 3-B perspektif görünüşü için oluşturulan hatları temsil etmektedir. Ayrıca A, B, C ve D ile verilen siyah elipsler, gömülü yapılara ait anomalileri temsil etmektedir. 0.5 m kesitindeki siyah dikdörtgen Şekil 2' de gösterilen arkeolojik kazı alanını temsil etmektedir.)

Bahsedilen özdirenç değişim karakterlerinden 12-32 ohm.m ile belirlenen düşük özdirenç dağılımı, arkeolojik yapı kalıntılarını saran ve örten doğal alüvyon toprağı temsil etmektedir. Özdirenç değerlerinin genel olarak düşük düzeyde elde edilmesinde Çine Çayı'nın oluşturduğu havzada yer alan çalışma alanındaki su içeriğinin etkili olduğu

söylenbilir. Çevresine göre göreceli yüksek özdirenç gösteren alanların (>32 ohm.m) olası arkeolojik yapı kalıntılarına karşılık geldiği düşünülmektedir. Bu alanlar A, B, C ve D harfleriyle isimlendirilerek siyah elipsler ile gösterilmiştir. 0.5 m derinlikli haritada süreksizlik sergileyen özdirenç dağılımı arkeolojik alanlarda karşılaşılan moloz yapılara işaret etmektedir. Bununla beraber bu derinlikten 2.5 m derinliğine kadar devam eden yüksek özdirenç sahip alanlar (A, B, C ve D alanları) gömülü arkeolojik yapılara karşılık gelmektedir. 0.5-2.5 metrelerdeki haritaların kuzey sınırında tespit edilen yüksek özdirençli A ve B alanlarıyla sınırlanan K-G uzanımlı yapı, kesitlerin ortasında doğuya doğru devam etmiş ve devamında D-B uzanımlı bir yönelim sergilemiştir. Yaklaşık 30 m eni, 40 m boyu ve 4 m yüksekliği ile tipik bir arkeolojik duvar yapısını andıran bu özdirenç karakteri ilerleyen derinliklerden 3.5 m ve 4.5 m seviyelerinde ortadan kaybolmaya başlamıştır.

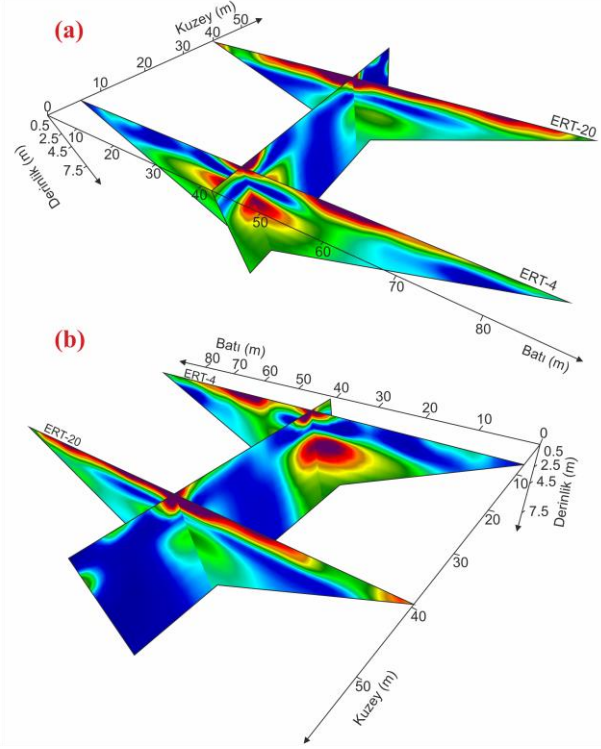


Şekil 4. ERT-4, 14, 25 ve 29 profillerinden elde edilen 2B özdirenç kesitleri. (A, B, C ve D elipsleri ile Şekil 3'teki alanlar gösterilmiştir.)

6 m derinliğe ait kesitte alanın kuzey kenarında C alanı ile gösterilen yüksek özdirençli bir yapı belirmiştir. Yaklaşık 13 m eni, 20 m boyu ve 3 m yüksekliği ile tespit edilen ve höyük tipi yapılarda sıklıkla karşılaşılan bu tür bir alanın [1, 9], yüzeydeki yerleşimden farklı bir katmana ait ikinci bir yerleşimin gömülü arkeolojik yapılarına ait olduğu düşünülebilir. Bu yapının hemen güneyinde beliren göreceli özdirenç yükselimi (D alanı) düzgün yapısal bir şekle işaret etmekle beraber net bir özdirenç kontrastı oluşturmadığı için muhtemel yapısal alan olarak bahse konu edilebilir.

Bahse konu olan anomaliler Şekil 4' te alanda genel özdirenç karakterini özetleyebilecek şekilde seçilen 2-B özdirenç kesitleri üzerinde de gösterilmiştir. Buna göre ERT-4 kesitinde ilk katmanda yer alan A ve B anomalileri ile ikinci katmanda yer alan C anomalisi açık bir şekilde görülmektedir. ERT-20 kesitine doğru

ERT-14 te yatayda kaybolan C anomalisi dikkat çekerken ERT-20 kesitinde D anomalisi belirlemektedir. Yüzeyde ise A ve B anomalilerinin birleştiği görülmektedir. ERT-25 kesitinde ise D anomalisi de kaybolmuş ve yapı ile ilgili anomalilerden ziyade örtü toprağa ilişkin özdirenç değerleri baskın hale gelmiştir.



Şekil 5. 3-B ERT perspektif diyagramları. (a) ve (b) Şekil 2' de yer alan bakış yönlerine göre farklı açılardan oluşturulmuştur.

Özdirenç kesitlerinde yorumlanan bu yapılar, Şekil 3' te yer alan kesikli çizgiler üzerindeki hatlardan elde edilen 3-B ERT perspektif (fence) diyagram üzerinde ayrıca modellenmiştir (Şekil 5). Bu model ERT ile ortaya çıkarılan yapıların birbirleriyle tutarlı olduğunu ve kesişme noktalarında birbirlerine uyum sağladığını göstermektedir. Yüzeyde tespit edilen yapılardan sonra aşağıdaki katmanlarda kuzey kenarda beliren ve bu yapının güneyinde tespit edilen özdirenç yükselimi alanları net bir şekilde görülmektedir. Bununla beraber tüm kesitlerde belirlenen yapıların, 2 m elektrot aralığından dolayı ayrıntılı olarak değil de bütünsel olarak tespit edildiğine dikkat edilmelidir. Buna göre tespit edilen bu alanlar aslında birçok küçük yapının bütünsel birleşimini temsil eden anomaliler olabilirler.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, gömülü yapıların aranmasında yer elektrik özdirenç parametresini esas alan jeofizik yöntem ile bir alanın yer altı modelinin aydınlatılmasını konu edinmiştir. Elde edilen yer elektrik kesitleri ve seviye haritalarıyla tespit edilen gömülü yapıların yer altındaki geometrik

uzanımlarının 3-B kestirimleri sunulmuştur. Höyük alanlarında sıklıkla karşılaşılan farklı katmanlı yapı modelleriyle örtüşen özdirenç karakterleri ortaya çıkarılmıştır. İlk katmana ait yapıların boyutu 30x40x4 m olarak tespit edilirken ikinci katmanda gömülü olan yapının boyutu ise 13x20x3 m olarak belirlenmiştir.

Çalışma sonuçları, tahribatsız olarak uygulanabilen jeofizik yöntemlerden elektrik özdirenç çalışmalarının arkeolojik alanlarda gömülü olduğu düşünülen yapıların fiziksel ve geometrik özelliklerinin belirlenmesinde sağladığı faydaları açık bir şekilde göstermektedir. Alanda yapılan jeofizik tespitler arkeolojik gerçekliğe imkan tanıyacak kazı çalışmalarını ile kanıtlanmalıdır. Sonuçlara göre alanda seçilen kısımlarda daha küçük elektrot aralıkları ile gerçekleştirilecek çalışmalar daha detaylı gömülü yapı analizleri sağlayacaktır. Ayrıca, tarım alanları arasında kalan bölgenin statüsünün belirlenmesi çevresel olarak ekonomik alanların belirlenmesini ve zaman-ışgücü ve maliyet kaybını ortadan kaldıracaktır.

Teşekkür

Araştırma sırasında arazi çalışmalarında destek olan rahmetli hocam Dr. Can Karavul' a ve tüm kazı ekibine teşekkür ederim.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederim.

Kaynakça

- [1] Berge, M. A., Drahor, M. G. 2011. Electrical Resistivity Tomography Investigations of Multilayered Archaeological Settlements: Part II – A Case from Old Smyrna Höyük, Turkey. *Archaeological Prospection* 18(4), 291-302.
- [2] Karaaslan, H., Karavul, C. 2018. Usefulness of electrical and magnetic methods in finding buried structure of the Alabanda Ancient Cistern in Çine Town, Aydın City, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences* 11, 178.P. 2008.
- [3] Karavul, C., Karaaslan, H., Demirkol, A. 2016. Investigation of structures in the Alabanda Bouleuterion by electrical resistivity method. *Arabian Journal of Geosciences* 9, 511.
- [4] Candansayar, M. E., Başokur, A. T. 2001. Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: application to an archaeological survey. *Geophysical Prospecting*, 49(1), 13-25. 2004.

- [5] Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., Şeren, A., Kaya, M. A., Lightfoot, C. S. 2014. Geomagnetic and geoelectrical prospecting for buried archaeological remains on the Upper City of Amorium, a Byzantine city in midwestern Turkey. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11(1), 015012.
- [6] Papadopoulos, N. G., Tsourlos, P., Papazachos, C., Tsokas, G. N., Sarris, A., Kim, J. H. 2011. An algorithm for fast 3D inversion of surface electrical resistivity tomography data: application on imaging buried antiquities. *Geophysical Prospecting*, 59(3), 557-575.
- [7] Karaaslan, H. 2020. Edge detection for the buried archaeological structures with the geophysical image processing method in the Alabanda Ancient Cistern in Turkey. *Archaeological Prospection*, 27(3), 275-284.
- [8] Papadopoulos, N. G., Tsourlos, P., Tsokas, G. N., Sarris, A. 2006. Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeological Prospection*, 13(3), 163-181.
- [9] Tonkov, N., Loke, M. H. 2006. A resistivity survey of a burial mound in the 'Valley of the Thracian Kings'. *Archaeological Prospection*, 13(2), 129-136.
- [10] Drahor, M. G., Berge, M. A., Kurtulmuş, T. Ö., Hartmann, M., Speidel, M. A. 2008. Magnetic and electrical resistivity tomography investigations in a Roman legionary camp site (Legio IV Scythica) in Zeugma, Southeastern Anatolia, Turkey. *Archaeological Prospection*, 15(3), 159-186.
- [11] Drahor, M. G., Kurtulmuş, T. Ö., Berge, M. A., Hartmann, M., Speidel, M. A. 2008b. Magnetic imaging and electrical resistivity tomography studies in a Roman military installation found in Satala archaeological site, northeastern Anatolia, Turkey. *Journal of Archaeological Science*, 35(2), 259-271.
- [12] Rabbal, W., Erkul, E., Stümpel, H., Wunderlich, T., Pasteka, R., Papco, J., Niewönher, P., Barış, Ş., Çakın, O., Pekşen, E. 2015. Discovery of a byzantine Church in Iznik/Nicaea, Turkey: an educational case history of geophysical prospecting with combined methods in urban areas. *Archaeological Prospection* 22, 1-20.
- [13] Yılmaz, S., Balkaya, Ç., Cakmak, O., Oksum, E. 2019. GPR and ERT explorations at the archaeological site of Kılıç village (Isparta, SW Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 170, 103859.
- [14] Uğur, A. 2003. Aydın Şehrinin Kuruluşu ve Gelişme Evreleri. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 1(2), 41-62.

- [15] Mansel, A. M. 1995. Ege ve Yunan Tarihi, Türk Tarih Kurumu Basımevi, Ankara.
- [16] Tunçdilek, N. 1986. Türkiye’de Yerleşmenin Evrimi, İstanbul Üniversitesi Yayınları, No: 3367, İstanbul.
- [17] Yaylalı, S., Akkan, Y., Tütüncüler, Ö., Erdan, E. 2015. Çakırbeyli-Küçüktepe Höyük 2014 Yılı Kazı Çalışması. 37. Uluslararası Kazı, Araştırma ve Arkeometri Sempozyumu, 11-15 Mayıs, Erzurum, 417-432.
- [18] Yaylalı, S., Akkan, Y., Tütüncüler Bircan, Ö., Erdan, E. 2017. Çakırbeyli-Küçüktepe Höyük 2015-2016 Çalışmaları. 39. Uluslararası Kazı, Araştırma ve Arkeometri Sempozyumu, 22-26 Mayıs, Bursa, 113-132.
- [19] Dora, O. Ö., Kun, N., Candan, O. 1992. Menderes Masifi’nin metamorfik tarihçesi ve jeotektonik konumu. Türkiye Jeoloji Bülteni, 35, 1-14.
- [20] Yılmaz, S., Oksüm, E., Cakmak, O., Dogan, O., Tekelioglu, E. 2018. Preliminary results of an integrated archaeo-geophysical survey on the basis of ancient finds unearthed by an illegal excavation at Kılıç Ören site (Isparta, Turkey). Archaeological Prospection, 25, 197-207.
- [21] Loke, M. H. 2010. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. <https://www.geotomosoft.com/downloads.php> (Erişim Tarihi: 28.06.2020)
- [22] Zhou, B., Dahlin, T. 2003. Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying. Near surface geophysics, 1(3), 105-117.
- [23] Loke M. H., Barker R. D. 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131-152.
- [24] Loke M. H., Barker, R. D. 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques. Geophysical Prospecting, 44, 499-524.
- [25] Loke, M. H., Acworth, I., Dahlin, T. 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys. Exploration Geophysics 34: 182-187.
- [26] Olayinka, A. I., Yaramanci, U. 2000. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. Journal of Applied Geophysics, 45, 63-81.

Karotis Sinüs Baroreseptörlerinin Kronik Uyarılmasının Arter Basıncı Üzerine Etkisinin Matematik Model Kullanılarak Analizi

Sibel CAYMAZ¹, Fatih KARAASLAN^{2*}

^{1,2}Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Medikal Modelleme ve Simülasyon Anabilim Dalı, 34668, İstanbul, Türkiye

(Alınış / Received: 07.07.2024, Kabul / Accepted: 19.09.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Kan basıncı,
Baroreseptörler,
Matematik Model,
Simülasyon

Öz: İnsan vücudunda arteriyel kan basıncı arttığında ya da azaldığında; arter duvarlarında yerleşmiş halde bulunan baroreseptörler gerilerek, merkezi sinir sistemine arter basıncını düşürecek ya da yükseltecek sinyaller gönderirler. Karotis sinüs baroreseptörlerinin elektriksel olarak uyarılmasıyla kan basıncının azaldığı deneysel çalışmalar mevcuttur ancak bunun gerçekleşmesini sağlayan mekanizmalar tam olarak tanımlanmamıştır. Böbrek Sempatik Sinir Aktivitesi (BSSA)'nin azalması ile idrardan sodyum atılımının arttığı ve arter basıncının düştüğü bilinmektedir. Fakat, karotis baroreseptörlerinin uyarılması ile idrar sodyum debisinin azalması sebebi açık değildir. BSSA'nın renin sekresyonu, tübül sodyum geri emilimi ve böbrek damar direnci üzerine olan etkilerini içeren uzun dönemli dolaşım sistemi matematik modeline, bu çalışmada BSSA'nın tübül su geri emilimi üzerine etkisi eklenmiştir. Böylece geliştirilen bu modele göre, karotis baroreseptörlerinin kronik uyarılmasında böbrekten sodyum atılımının azalmasının sebebi, glomerüler filtrasyon hızının azalmasıdır.

Analysis of The Effect of Chronic Stimulation of Carotid Sinus Baroreceptor on Arterial Pressure by Using a Mathematical Model

Keywords

Blood pressure,
Baroreceptors,
Mathematical model,
Simulation

Abstract: When arterial blood pressure increases or decreases baroreceptors that have placed arterial walls stretch and send signals to the central nervous system will increase or decrease arterial pressure. There are experimental studies that reduced the blood pressure by chronic stimulation of carotid sinus baroreceptors but the mechanisms by which this makes happen are not fully defined. It is known that a decrease in urinary sodium excretion and a decline in arterial pressure is due to inhibiting renal sympathetic nerve activity (RSNA). However, the reason for the decrease in urinary sodium flow with stimulation of carotid baroreceptors is not clear. In this study, the effect of RSNA on tubular water reabsorption was added to the long-term cardiovascular system model including the effects of RSNA on renal vascular resistance, renin secretion and tubular sodium reabsorption. According to the model developed in this way, the reason for the decrease in sodium excretion from the kidney in the stimulation of carotid sinus baroreceptors is declining in the glomerular filtration rate.

1. Giriş

Vücutta kan basıncı başlıca 3 mekanizma ile kontrol edilerek, yaklaşık olarak sabit tutulur. Bunlar; uzun dönemde (günler) böbreklerin kendisi aracılığıyla, orta süreli (saatler) dönemde renin-anjiyotensin-aldosteron sistemiyle, kısa süreli dönemde (dakikalar, saniyeler) etki baroreseptörler aracılığı

ile refleks olarak oluşur. Baroreseptörler, yoğun olarak karotis sinüsü olarak adlandırılan bölgede ve aort kavisinin duvarında bulunurlar. Arter basıncında artış meydana geldiğinde; baroreseptörler gerilir ve merkezi sinir sistemine afferent sinirler ile sinyal gönderilir. Bu sinyaller, beyinde bulunan dolaşım merkezinde işlenerek, kan basıncını normal seviyeye indirecek uyarınları efferent sinirler aracılığı ile

*İlgili yazar: fatih.karaaslan@sbu.edu.tr

dolaşıma iletirler. Arter kan basıncı azaldığında ise tersi olaylar gelişir [1,2].

Baroreseptörler, uzun süreli uyarılma durumunda adaptasyon gösterirken böbreğe giden efferent renal sinirlerde bu adaptasyon görülmez. Karotis baroreseptörlerin kronik olarak elektriksel uyarılması, böbrek sempatik sinir aktivitesi (BSSA) ve arter basıncında sürekli bir azalma sağlar [16,17,21,24].

Karotis baroreseptörlerin kronik uyarılmasının, arter basıncını azalttığını gösterir deneysel çalışmalar olmasına rağmen bunu sağlayan mekanizmalar tam olarak açıklanmamıştır [21,22]. Bu çalışmanın amacı, karotis sinüs baroreseptörlerinin uyarılmasının, arter basıncı üzerine etkisini, matematik model kullanılarak analiz etmektir.

2. Materyal ve Metot

Kullanılan uzun dönemli dolaşım sistemi matematik modeli [8], Guyton [4], Uttamsingh [5] ve Coleman'ın [6] dolaşım sistemi modellerinin, ilgili kısımları birleştirilerek ve renin salınımı, tübülöglomerüler geri besleme mekanizmasına makula densa sodyum debisinin etkisi, böbrek sinirlerinin böbrekten sodyum geri emilimine ve renin salınımına etkilerinin eklenmesiyle [7] geliştirilmiştir. Tek böbrek kabulü ile geliştirilen bu model, fizyolojiye daha yakın olması amacıyla, daha sonra iki böbrekli hale getirilmiştir [8].

Böbrek sinirlerinin böbrek tübüllerinden su geri emilimi üzerine doğrudan etkisi olduğu bilinmektedir [1,2,9-12]. Fakat Karaaslan ve ark. modelinde [8] BSSA'nın tübül su geri emilimine etkisi bulunmamaktadır. Bu sebeple, böbrek sempatik sinir aktivitesinin tübül su geri emilimine etkisi, ilgili deneysel veriler [25-34] kullanılarak, Karaaslan ve ark. modeline eklenmiştir. Böylece geliştirilen model bu çalışmada kullanılmıştır.

Model, Matlab/Simulink 2021/9.10'da kurulmuş ve modele ait denklemler Runge-Kutta 4 [14] sayısal yöntemi ile 1 dakika (dk) adım genişliği ile çözülmüştür.

2.1. Matematik modelde kullanılan denklemler

Modele ait denklemlerin değişkenleri, sembolleri ve normal değerleri Ek A'da yer almaktadır. Modeldeki ilgili değişken ve parametrelerin birbirleriyle ilişkisi Ek B'de gösterilmektedir. Ek B'de bulunan blokların açıklamaları ve denklemleri aşağıdadır.

Blok 1: Efferent böbrek sempatik sinir aktivitesinde, arter kan basıncı ve sağ atriyum basıncı etkilidir [1,2,9-11]. Bu etkiler değerlendirildiğinde; böbrek sempatik sinir aktivitesi (BSSA), normalize edilmiş böbrek sempatik sinir aktivitesi (N_{bssa}), sağ atriyum

basıncının böbrek sempatik sinir aktivitesi üzerine etkisi (α_{sab}) ve arter basıncının böbrek sempatik sinir sistemi aktivitesine etkilerinin (α_{oab}) çarpımı olarak modellenir [8].

$$BSSA = N_{bssa} \times \alpha_{oab} \times \alpha_{sab} \quad (1)$$

$$\alpha_{oab} = 0.5 + \frac{1.05}{1 + e^{(B_{oa}-100)/15}} \quad (2)$$

$$\alpha_{sab} = 1 - 0.08 \times B_{sa} \quad (3)$$

Blok 2: Böbrek damar direnci (D_b), afferent arteriyoler direnç (D_{aa}) ve efferent arteriyoler direncin (D_{ea}) toplamı olarak hesaplanır. Afferent arteriyoler direnç (D_{aa}), etkili olan mekanizmaların ve afferent arteriyoler direncin normal değeri (D_{aa-ss}) ile çarpımı olarak denklem 5' teki gibi modellenmiştir. Afferent arteriyoler direnç üzerine etkili mekanizmalar; miyojenik yanıt (M_{aac}), nitrik oksit (Ω_{NO}), anjiyotensin etkisi (ζ_{ata}), tübülöglomerüler geri bildirim sinyali etkisi (Σ_{tgg}) ve BSSA'nın afferent arteriyoler direnci üzerine etkisidir (β_{bssa}). Efferent arteriyoler direnç (D_{ea}); normal değeri (D_{ea-ss}) ve anjiyotensin etkisinin (ζ_{ate}) çarpımıyla modellenmiştir. Anjiyotensin konsantrasyonunun (K_{at}), efferent arteriyoler direnç üzerine etkisi (ζ_{ate}), denklem 8'de konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak, afferent arteriyoler direnç üzerine etkisi (ζ_{ata}), denklem 9'da konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak modellenmiştir [8].

$$D_b = D_{aa} + D_{ea} \quad (4)$$

$$D_{aa} = D_{aa-ss} \times \beta_{bssa} \times \Sigma_{tgg} \times \zeta_{ata} \times M_{aac} \times \Omega_{NO} \quad (5)$$

$$\beta_{bssa} = 1.5 \times (BSSA - 1) + 1 \quad (6)$$

$$D_{ea} = D_{ea-ss} \times \zeta_{ate} \quad (7)$$

$$\zeta_{ate} = 0.9432 + \frac{0.1363}{0.2069 + e^{3.108 - 1.785 \times \log_{10} K_{at}}} \quad (8)$$

$$\zeta_{ata} = 0.9854 + \frac{0.03658}{0.2215 + e^{3.115 - 1.7864 \times \log_{10} K_{at}}} \quad (9)$$

Blok 3: Ortalama afferent arteriyoler basınç (B_{aa}), denklem 10'daki gibi renal arter basıncı (B_{ba}) ve glomerüler hidrostatik basınç (B_{gh}) toplamının ortalaması olarak hesaplanır. Miyojenik yanıt (M_{aac}), denklem 13'te belirtildiği şekilde arter basıncı (B_{aa}) ile adaptif arter basıncı (B_{aad}) farkı olan; afferent arteriyoler basınçtaki değişikliğin (B_{aac}) bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır [8].

$$B_{aa} = \frac{B_{ba} + B_{gh}}{2} \quad (10)$$

$$B_{aad}(t) = \frac{1}{240} \int (B_{aa} - B_{aad}) dt \quad (11)$$

$$B_{aac} = B_{aa} - B_{aad} \quad (12)$$

$$M_{aac} = 2.094 - \frac{8.355}{5.734 + e^{\frac{B_{aac} + 15.87}{24.66}}} \quad (13)$$

Blok 4: Afferent arteriyollerden nitrik oksit salınımı (S_{NO}), böbrek kan akımının (Φ_{bka}) bir fonksiyonu olarak denklem 14'teki, NO salınımı ile afferent arteriyollerdeki NO etkisi (Ω_{NO}) denklem 15'teki gibi modellenmiştir [8].

$$S_{NO} = 1.228 - \frac{0.04802}{0.1079 + e^{\frac{\Phi_{bka} - 0.8661}{0.115}}} \quad (14)$$

$$\Omega_{NO} = -0.3 \times S_{NO} + 1.3 \quad (15)$$

Blok 5: Böbrek kan akımı (Φ_{bka}) ortalama arter basıncının (B_{oa}) böbrek damar direncine (D_b) bölünmesiyle hesaplanmaktadır [8].

$$\Phi_{bka} = \frac{B_{oa}}{D_b} \quad (16)$$

Blok 6: Net filtrasyon basıncı (B_f);filtrasyona pozitif yönde etki eden glomerül kapillerdeki hidrostatik basınç (B_{gh}) ve negatif yönde etki eden glomerüler kapiller onkotik basınç (B_{go}) ve Bowman kapsülü hidrostatik basınçtır (B_B). Afferent arteriyoler basınç (B_{aa}) böbrek kan akımı (Φ_{bka}) ve afferent arteriyoler direnç (D_{aa}) çarpımıyla hesaplanır ve glomerüler hidrostatik basınç (B_{gh}) ortalama arter basıncı (B_{oa}) ve afferent arteriyoler basınç arasındaki fark olarak denklem 19'a göre modellenmiştir. Glomerüler filtrasyon hızı (Φ_{gfilt}) net filtrasyon basıncı (B_f) ve glomerüler kapiller filtrasyon katsayısı (K_{gcf}) çarpımı ile hesaplanmaktadır [8].

$$\Phi_{gfilt} = B_f \times K_{gcf} \quad (17)$$

$$B_f = B_{gh} - (B_B + B_{go}) \quad (18)$$

$$B_{gh} = B_{oa} - (\Phi_{bka} \times D_{aa}) \quad (19)$$

Blok 7: Tübüloglomerüler geri besleme sinyali (Σ_{tgg}), makula densa sodyum debisinin (Φ_{md-sod}) bir fonksiyonu olarak modellenmiştir [8].

$$\Sigma_{tgg} = 0.3412 + \frac{0.06296}{0.07079 + e^{-2.064 \times \Phi_{md-sod}}} \quad (20)$$

Blok 8: Her böbrek için nefronda glomerülden proksimal tübüle filtre edilen sodyum debisi (Φ_{filsod}), sodyum konsantrasyonu (K_{sod}) ve glomerüler filtrasyon hızı çarpımıyla (Φ_{gfilt}) modellenmiştir [8].

$$\Phi_{filsod} = \Phi_{gfilt} \times K_{sod} \quad (21)$$

Blok 9: Mutlak proksimal tübül sodyum geri emilimi ($\Phi_{pt-sodgeri}$) filtrelenen sodyum (Φ_{filsod}) ve fraksiyonel proksimal sodyum geri emilimi ($\eta_{pt-sodgeri}$) çarpımı ile denklem 22'deki gibi hesaplanır. Fraksiyonel proksimal tübül sodyum geri emilimi ($\eta_{pt-sodgeri}$); fraksiyonel proksimal tübül sodyum geri emiliminin normal değeri (η_{n-pt}) ile filtrelenen sodyum miktarının, BSSA'nın ve anjiotensinin, fraksiyonel proksimal sodyum geri emilimi üzerine olan etkilerinin çarpımı olarak denklem 23'te hesaplanmaktadır. Filtrelenen sodyum miktarının (Φ_{filsod}) fraksiyonel proksimal tübül sodyum geri emilimi üzerine olan etkisi (γ_{filsod}) denklem 24'te, anjiotensin hormonunun (K_{at}) fraksiyonel proksimal tübül sodyum geri emilimi üzerine etkisi (γ_{at}) denklem 25'te, BSSA'nın fraksiyonel proksimal tübül sodyum geri emilimi üzerine etkisi (γ_{bssa}) denklem 26'da hesaplanmaktadır [8].

$$\Phi_{pt-sodgeri} = \Phi_{filsod} \times \eta_{pt-sodgeri} \quad (22)$$

$$\eta_{pt-sodgeri} = \eta_{n-pt} \times \gamma_{filsod} \times \gamma_{at} \times \gamma_{bssa} \quad (23)$$

$$\gamma_{filsod} = 0.7953 + \frac{2.167}{4.063 + \frac{e^{(\Phi_{filsod} - 5.663)}}{4.448}} \quad (24)$$

$$\gamma_{at} = 0.95 + \frac{0.12}{1 + e^{2.6 - 1.8 \times \log_{10} K_{at}}} \quad (25)$$

$$\gamma_{bssa} = 1.1916 + \frac{0.4762}{1.064 + e^{(BSSA - 0.9034)/0.3697}} \quad (26)$$

Blok 10: Makula densa sodyum debisi (Φ_{md-sod}); filtre edilen sodyum debisi (Φ_{filsod}) ile proksimal tübülden geri emilen sodyum debisi ($\Phi_{pt-sodgeri}$) arasındaki fark ile hesaplanmaktadır [8].

$$\Phi_{md-sod} = \Phi_{filsod} - \Phi_{pt-sodgeri} \quad (27)$$

Blok 11: Mutlak distal tübül sodyum geri emilimi ($\Phi_{dt-sodgeri}$); makula densa sodyum debisi (Φ_{md-sod}) ve fraksiyonel distal tübül sodyum geri emilimi ($\eta_{dt-sodgeri}$) çarpımı ile denklem 28'deki gibi modellenmiştir. Aldosteron hormonunun fraksiyonel distal tübül sodyum geri emilimi üzerine etkisi (ψ_{al}) denklem 30'daki gibi aldosteron hormonunun konsantrasyonunun (K_{al}) bir fonksiyonu olarak modellenmiştir [8].

$$\Phi_{dt-sodgeri} = \Phi_{md-sod} \times \eta_{dt-sodgeri} \quad (28)$$

$$\eta_{dt-sodgeri} = \eta_{\varepsilon-dt} \times \psi_{al} \quad (29)$$

$$\psi_{al} = 0.17 + \frac{0.94}{1 + e^{(0.48-1.2 \times \log_{10} K_{al})/0.88}} \quad (30)$$

Blok 12: Distal tübül sodyum çıkışı (Φ_{dt-sod}); makula densa sodyum debisi (Φ_{md-sod}) ile distal tübülde filtre edilen sodyum geri emiliminin ($\Phi_{dt-sodgeri}$) farkıyla hesaplanmaktadır [8].

$$\Phi_{dt-sod} = \Phi_{md-sod} - \Phi_{dt-sodgeri} \quad (31)$$

Blok 13: Mutlak toplayıcı kanal sodyum geri emilimi ($\Phi_{cd-sodgeri}$) distal tübül sodyum çıkışı (Φ_{dt-sod}), fraksiyonel toplayıcı kanal sodyum geri emilimi ($\eta_{cd-sodgeri}$) çarpımı ile denklem 32'deki gibi modellenmiştir. Fraksiyonel toplayıcı kanal sodyum geri emilimi ($\eta_{cd-sodgeri}$), normal değeri ($n_{\eta-cd} = 0.93$) ve atriyal natriüretik peptid konsantrasyonunun (K_{anp}) fraksiyonel toplayıcı kanal sodyum geri emilimi üzerine etkisi (λ_{anp}) ve distal tübül sodyum çıkışının (Φ_{dt-sod}) fraksiyonel toplayıcı kanal sodyum geri emilimi üzerine etkisi (λ_{dt}) çarpımı ile denklem 33'te hesaplanmaktadır [8].

$$\Phi_{cd-sodgeri} = \Phi_{dt-sod} \times \eta_{cd-sodgeri} \quad (32)$$

$$\eta_{cd-sodgeri} = n_{\eta-cd} \times \lambda_{dt} \times \lambda_{anp} \quad (33)$$

$$\lambda_{dt} = 0.796 + \frac{0.4778}{1.222 + \frac{e^{(\Phi_{dt-sod} - 0.8801)}}{0.9194}} \quad (34)$$

$$\lambda_{anp} = -0.1 \times K_{anp} + 1.1 \quad (35)$$

Blok 14: İdrar sodyum debisi (Φ_{id-sod}) distal tübül sodyum debisinden (Φ_{dt-sod}), toplayıcı kanal sodyum geri emiliminin ($\Phi_{cd-sodgeri}$) çıkarılması ile hesaplanmaktadır [8].

$$\Phi_{id-sod} = \Phi_{dt-sod} - \Phi_{cd-sodgeri} \quad (36)$$

Blok 15: ADH salınımı vücutta su tutulmasını artırıcı yönde etki gösterir susamayı artırır [1,2]. Böylece su içimi (Φ_{su}) antidiüretik hormon konsantrasyonunun (K_{adh}) bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır [8].

$$\Phi_{su} = 0.01 \times \left[0.37 + \frac{0.8}{1 + e^{(0.6-3.7 \times \log_{10} K_{adh})}} \right] - 0.0094 \quad (37)$$

Blok 16: Hücre dışı sıvı hacmi (H_{hds}), toplam su içimi (Φ_{su}) ve toplam idrar çıkışı (Φ_{id-top}) farkının integrali alınarak modellenmiştir. Hücre dışı sıvı hacminin başlangıç değeri ($H_{hds}(0)$) 15 litre olarak alınmıştır [1,2,8].

$$H_{hds}(t) = H_{hds}(0) + \int_0^t [\Phi_{su} - \Phi_{id-top}] dt \quad (38)$$

Blok 17: Kan hacmi (H_{kan}) hücre dışı sıvı hacminin (H_{hds}) bir fonksiyonu olarak hesaplanır [8].

$$H_{kan} = 4.560227 + \frac{2.431217}{1 + e^{-\frac{H_{hds} - 18.11278}{2.10806}}} \quad (39)$$

Blok 18: Ortalama doluş basıncı (B_{ort}); kan hacmi (H_{kan}) ve otonom sinir sisteminin etkisi (ε_{oto}) ile modellenmiştir [8].

$$B_{ort} = (7.436 \times H_{kan} - 30.18) \times \varepsilon_{oto} \quad (40)$$

Blok 19: Venöz geri dönüş (Φ_{vgeri}); ortalama doluş basıncıyla (B_{ort}), sağ atriyum basıncı (B_{sa}) farkının venöz geri dönüş direncine (D_{vg}) bölünmesiyle hesaplanmaktadır [8].

$$\Phi_{vgeri} = \frac{B_{ort} - B_{sa}}{D_{vg}} \quad (41)$$

Blok 20: Kardiyak output (Φ_{KO}) venöz geri dönüşe eşit kabul edilmiştir [8].

$$\Phi_{KO} = \Phi_{vgeri} \quad (42)$$

Blok 21: Sağ atriyum basıncı (B_{sa}) kardiyak outputun bir fonksiyonu olarak hesaplanır [8].

$$B_{sa} = 0.2787 \times e^{0.2281 \times \Phi_{KO}} - 0.879 \quad (43)$$

Blok 22: Kardiyak outputun düzenlenmesinde kalbin yanı sıra periferik faktörlerin de etkili olduğunu gösterir deneysel çalışmalar bulunmaktadır [3,4]. Modelde kardiyak outputa bağlı olarak damarlanma yapım hızı (dmr_f) denklem 45'e göre, damarlanma yıkımı (dmr_d), damarlanmanın sabit bir fraksiyonu olarak denklem 46'da modellenmiştir. Damarlanma (dmr) ise denklem 44'te, damarlanma yapım hızı (dmr_f) ile damarlanma yıkım hızı (dmr_d) arasındaki fark olan net damarlanma hızının integrali olarak hesaplanmaktadır. Damarlanmanın başlangıç değeri $dmr(0)$ 1 olarak alınmıştır [8].

$$dmr(t) = dmr(0) + \int_0^t [dmr_f - dmr_d] dt \quad (44)$$

$$dmr_f = \frac{11.312 \times e^{\Phi_{KO} \times 0.4799}}{100,000} \quad (45)$$

$$dmr_d = dmr \times K_{vd} \quad (46)$$

$$K_{vd} = 0.00001$$

Blok 23: Arter direnci (D_a) temel arter direnci (D_{ta}) ile otonom sinir sisteminin damar direnci üzerine olan etkisinin (ε_{oto}) çarpımı ile denklem 47'deki gibi hesaplanır. Temel arter direnci (D_{ta}) damarlanma (dmr) ile ters orantılı olarak denklem 48'deki gibi modellenmiştir [8].

$$D_a = D_{ta} \times \varepsilon_{oto} \quad (47)$$

$$D_{ta} = \frac{K_{bar}}{dmr} \quad (48)$$

Blok 24: Venöz geri dönüş direnci (D_{vg}), temel venöz geri dönüş direnci (D_{tv}) ve temel arter direncinin (D_a) bir fonksiyonu olarak modellenmiştir [8].

$$D_{vg} = \frac{(8 \times D_{tv} + D_a)}{31} \quad (49)$$

Blok 25: Toplam periferik direnç (D_{tp}); arter direnci (D_a) ve temel venöz geri dönüş direncinin (D_{tv}) toplamı olarak hesaplanmaktadır [8].

$$D_{tp} = D_a + D_{tv} \quad (50)$$

Blok 26: Ortalama arter basıncı (B_{oa}) üzerinde etkileri olan toplam periferik direnç (D_{tp}) ve kardiyak output (Φ_{KO}) çarpımı ile modellenmiştir [8].

$$B_{oa} = \Phi_{KO} \times D_{tp} \quad (51)$$

Blok 27: Otonom sinir sisteminin damar direnci üzerine etkisi (ε_{oto}) kemoreseptör (a_{kemo}) ve baroreseptör (a_{baro}) aktivitelerinin toplamı ile denklem 52'deki gibi hesaplanmaktadır. Denklem 53'te ortalama arter basıncıyla (B_{oa}) ilişkili olan ortalama bir değişken (a_{oto}) modellenmiştir. Kemoreseptör aktivite (a_{kemo}), (a_{oto})'nun bir fonksiyonu olarak denklem 54'te modellenmiştir. Baroreseptör aktivite (BA) (a_{baro}) de (a_{oto})'nun bir fonksiyonu olarak denklem 55'te modellenmiştir [8].

$$\varepsilon_{oto} = a_{kemo} + a_{baro} \quad (52)$$

$$a_{oto} = 3.079e^{-B_{oa} \times 0.011} \quad (53)$$

$$a_{kemo} = \frac{1}{4} a_{oto} \quad (54)$$

$$a_{baro}(t) = \frac{3}{4} a_{oto} - \frac{1}{2000} \int_{\tau=0}^t [a_{baro}(\tau) - \frac{3}{4}] d\tau \quad (55)$$

Blok 28: Antidiüretik hormon konsantrasyonu (K_{adh}) hormonun normal değeri (K_{adh-ss}) ve denklem 58'de modellenen normalize ADH konsantrasyonu (\hat{K}_{adh}) çarpımıyla denklem 59'daki gibi modellenmiştir. Normalize edilmiş ADH salınımı (\hat{S}_{adh}), sodyum konsantrasyonu (K_{sod}), otonom sinir sistemi etkisi (ε_{oto}) ve denklem 57'de hesaplanan sağ atriyum basıncının antidiüretik hormon salgılanması üzerine etkisi (δ_{sa}) ile denklem 56'daki gibi hesaplanmaktadır [8].

$$\hat{S}_{adh} = \frac{1}{3} [(K_{sod} - 141) + (\varepsilon_{oto} - 1) - \delta_{sa}] \quad (56)$$

$K_{sod} > 141 \frac{mU}{l}$ ve $\varepsilon_{aum} > 1$ için geçerli

$$\delta_{sa}(t) = 0.0007 \times \int_0^t (0.2 \times B_{sa} - \delta_{sa}) d\tau \quad (57)$$

$$\dot{K}_{adh}(t) = \dot{K}_{adh}(0) + \frac{1}{T_{adh}} \int_0^t [\hat{S}_{adh} - \dot{K}_{adh}] d\tau \quad (58)$$

$$K_{adh} = K_{adh-ss} \times \dot{K}_{adh} \quad (59)$$

Blok 29: Böbrek tübüllerinden su geri emilimine ($\Phi_{t-sugeri}$) aldosteron hormonu, ADH ve BSSA doğrudan etki ederler [1,2]. Modelde ADH (μ_{adh}) ve aldosteron hormon (μ_{al}) etkileri denklem 61 ve 62'deki gibi hesaplanmaktadır [8]. BSSA arttığında tübüler su geri emilimini artarken azaldığında tübüler su geri emilimi azalır [9,10,11,12]. Bu yönde yapılan deneysel çalışmalarda verilerin kullanılması ile BSSA'nın tübüler su geri emilimine etkisi (μ_{bssa}) denklem 63'teki gibi modellenmiştir [25,26,27,28,29,30,31,32,33,34].

$$\Phi_{t-sugeri} = \frac{1}{2} \left(0.025 - \frac{0.001}{\mu_{al} \times \mu_{adh} \times \mu_{bssa}} \right) + 0.8 \times \Phi_{gfilt} \quad (60)$$

$$\mu_{al} = 0.17 + \frac{0.94}{1 + e^{\frac{0.48 - 1.2 \log_{10} K_{al}}{0.88}}} \quad (61)$$

$$\mu_{adh} = 0.37 + \frac{0.8}{1 + e^{0.6 - 3.7 \log_{10} K_{adh}}} \quad (62)$$

$$\mu_{bssa} = 0.4431 + \frac{0.0134}{0.0048 + e^{-3.9496 \times BSSA}} \quad (63)$$

Blok 30: İdrar debisi (Φ_{id}) glomerüler filtrasyon hızı (Φ_{gfilt}) ve tübüler su geri emiliminin ($\Phi_{t-sugeri}$) farkı olarak modellenmiştir [8].

$$\Phi_{id} = \Phi_{gfilt} - \Phi_{t-sugeri} \quad (64)$$

Blok 31: Toplam idrar debisi (Φ_{id-top}) sağ ve sol böbrek idrar debilerinin toplamı olarak hesaplanmaktadır [8].

$$\Phi_{id-top} = \Phi_{id-sol} + \Phi_{id-sag} \quad (65)$$

Blok 32: Toplam böbrek sodyum atılımı ($\Phi_{sod-top}$) sağ ve sol böbrekten atılanların toplamı olarak hesaplanmaktadır [8].

$$\Phi_{sod-top} = \Phi_{sod-sol} + \Phi_{sod-sag} \quad (66)$$

Blok 33: Sodyum alımı bağımsız değişken olarak normal değerinde kabul edilmiştir [8].

$$\Phi_{sodal} = 0.126 \text{ meq/dk}$$

Blok 34: Toplam sodyum miktarı (M_{sod}) net sodyum alım hızının integrali olarak modellenmiş olup net sodyum alımı hızı; sodyum alımı (Φ_{sodal}) ile sodyum atılımı ($\Phi_{sod-top}$) farkı olarak hesaplanmaktadır. Başlangıç değeri ($M_{sod}(0)$) normal değeri olarak kabul edilmiştir [8].

$$M_{sod}(t) = M_{sod}(0) + \int_0^t [\Phi_{sodal} - \Phi_{sod-top}] d\tau \quad (67)$$

Blok 35: Sodyum konsantrasyonu (K_{sod}) toplam sodyum miktarının (M_{sod}) hücre dışı sıvı hacmine (H_{hds}) bölümü olarak modellenmiştir [8].

$$K_{sod} = \frac{M_{sod}}{H_{hds}} \quad (68)$$

Blok 36: Renin sekresyonu (S_r) makula densa sodyum debisinin (Φ_{md-sod}) renin sekresyonu üzerine olan etkisi (v_{md-sod}) ve BSSA'nın renin sekresyonu üzerine olan etkisinin (v_{bssa}) çarpımı ile denklem 69'da hesaplanmaktadır. Makula densa sodyum debisinin renin sekresyonu üzerine etkisi (v_{md-sod}), denklem 70'de makula densa sodyum debisinin (Φ_{md-sod}) bir fonksiyonu olarak modellenmiştir [8].

$$S_r = v_{md-sod} \times v_{bssa} \quad (69)$$

$$v_{md-sod} = 169.9 + \frac{335}{0.1843 + e^{(\Phi_{md-sod} - 2.085)/0.3024}} \quad (70)$$

$$v_{bssa} = 1.89 - \frac{2.056}{1.358 + e^{(BSSA - 0.8667)}} \quad (71)$$

Blok 37: Sağ böbrekten salınan renin (S_{r-sag}) ve sol böbrekten salınan renin (S_{r-sol}) toplamının iki böbrekten salınan toplam renin sekresyonu normal değerine ($S_{r-ss-top}$) bölünmesi ile normalize edilmiş toplam renin sekresyon hızı (\hat{S}_{r-top}) denklem 72'deki gibi hesaplanmaktadır. Normalize edilmiş renin konsantrasyonu (\hat{K}_r) da normalize edilmiş toplam renin sekresyon hızının (\hat{S}_{r-top}) integrali olarak hesaplanmıştır. Normalize renin konsantrasyonunun başlangıç değeri ($\hat{K}_r(0)$) 1 olarak alınmıştır [8].

$$\hat{S}_{r-top} = \frac{S_{r-sag} + S_{r-sol}}{S_{r-ss-tot}} \quad (72)$$

$$\hat{K}_r(t) = \hat{K}_r(0) + \frac{1}{T_r} \int_0^t (\hat{S}_{r-top} - \hat{K}_r) dt \quad (73)$$

Blok 38: Anjiyotensin konsantrasyonu (K_{at}); normalize renin konsantrasyonu (\hat{K}_r) ve anjiyotensin konsantrasyonunun normal değeri (K_{at-ss}) çarpımıyla modellenmiştir [8].

$$K_{at} = \hat{K}_r \times K_{at-ss} \quad (74)$$

Blok 39: Sodyum ve potasyumun aldosteron sekresyonu üzerine etkileri ($\xi_{k/sod}$), denklem 76'deki gibi hesaplanmıştır. Modelde kan basıncının normal değerinin (100 mmHg) altına indiği durumda aldosteron sekresyonu olduğu kabul edilmiştir. Bu durum denklem 77 ile modellenmiştir. Anjiyotensinin aldosteron sekresyonu üzerine olan etkisi (ξ_{at}) anjiyotensin konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak denklem 78'de modellenmiştir. Normalize

edilmiş aldosteron konsantrasyonunun başlangıç değeri ($\hat{K}_{al}(0)$) 1 olarak alınmıştır. Normalize edilmiş aldosteron sekresyon hızı (\hat{S}_{al}); denklem 76'da hesaplanan potasyum-sodyum konsantrasyon oranı etkisi ($\xi_{k/sod}$), denklem 77'de hesaplanan ortalama arter basıncı etkisi (ξ_{boa}) ve denklem 78'de hesaplanan anjiyotensin konsantrasyonu etkisi (ξ_{at}) çarpımı ile denklem 75'te hesaplanmaktadır. Normalize edilmiş aldosteron konsantrasyonu (\hat{K}_{al}) denklem 79'da hesaplanmaktadır. Aldosteron konsantrasyonu (K_{al}), normalize edilmiş aldosteron konsantrasyonu (\hat{K}_{al}) ve aldosteron konsantrasyonunun normal değeri (K_{al-ss}) çarpımıyla denklem 80'deki gibi hesaplanmıştır [8].

$$\hat{S}_{al} = \xi_{k/sod} \times \xi_{boa} \times \xi_{at} \quad (75)$$

$$\xi_{k/sod} = \frac{K_k/K_{sod}}{0.00347} - 9 \quad (76)$$

$$\xi_{oab} = \begin{cases} 69.03 \times e^{-0.0425 \times B_{ma}}, & b_{ma} \leq 100 \\ 1, & b_{ma} > 100 \end{cases} \quad (77)$$

$$\xi_{at} = 0.4 + \frac{2.4}{1 + e^{(2.82 - 1.5 \times \log_{10} K_{at})/0.8}} \quad (78)$$

$$\hat{K}_{al}(t) = \hat{K}_{al}(0) + \frac{1}{T_{al}} \int_0^t (\hat{S}_{al} - \hat{K}_{al}) dt \quad (79)$$

$$K_{al} = \hat{K}_{al} \times K_{al-ss} \quad (80)$$

Blok 40: Normalize edilmiş atriyal natriüretik peptid konsantrasyonu (\hat{K}_{anp}); sağ atriyum basıncının (B_{sa}) bir fonksiyonu olarak modellenmiştir [8].

$$\hat{K}_{anp} = 7.4052 - \frac{6.554}{1 + e^{(B_{sa} - 3.762)}} \quad (81)$$

Blok 41: Potasyum konsantrasyonu (K_k) normal değerinde sabit olarak alınmıştır [8].

$$K_k = 5 \text{ mEq/L} \quad (82)$$

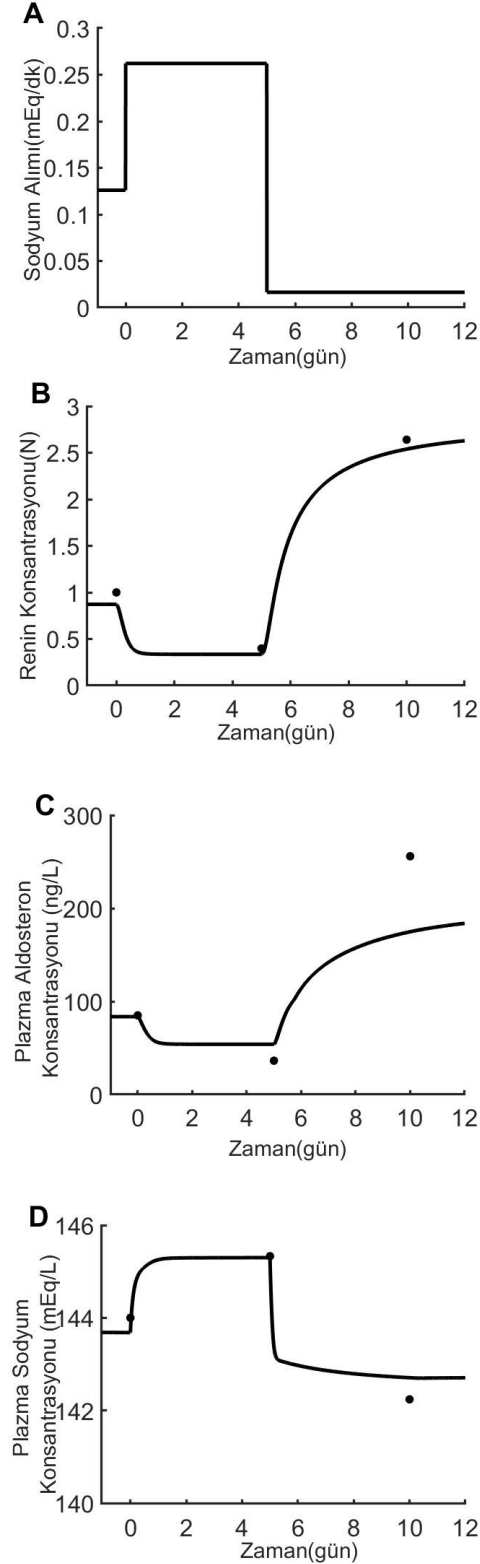
3. Bulgular

Bu bölümde model sonuçları gerçek verilerle karşılaştırılmıştır.

A. Sodyum alımının sodyum konsantrasyonu, renin konsantrasyonu ve aldosteron konsantrasyonu üzerine etkileri [13]

Yapılan deneysel çalışma ile benzer şekilde sodyum alımı (blok 33, normal sodyum alımı parametresi) Şekil 1.A'daki gibi ilk 5 gün normal değerinin %208 katına çıkarılmış sonraki 5 gün ise normal değerinin %13'üne indirilmiştir [13]. Sodyum konsantrasyonu, renin konsantrasyonu ve aldosteron konsantrasyonundaki değişiklikler deneysel verilerle

karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara benzer şekilde plazma renin ve aldosteron konsantrasyonu ilk 5 gün azalmış sonraki 5 gün artmıştır (Şekil 1B,1C). Deneysel sonuçlara benzer şekilde sodyum alımı artışına bağlı olarak plazma sodyum konsantrasyonu ilk 5 gün artmış sonraki 5 gün boyunca azalmıştır (Şekil 1D) [13,36].

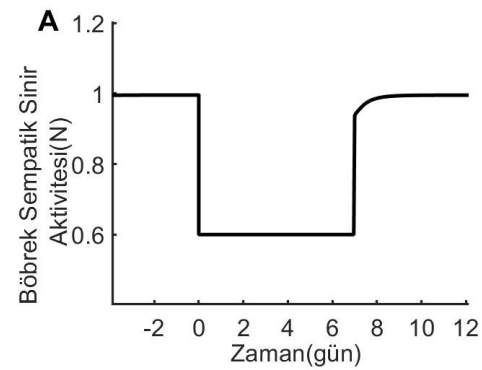


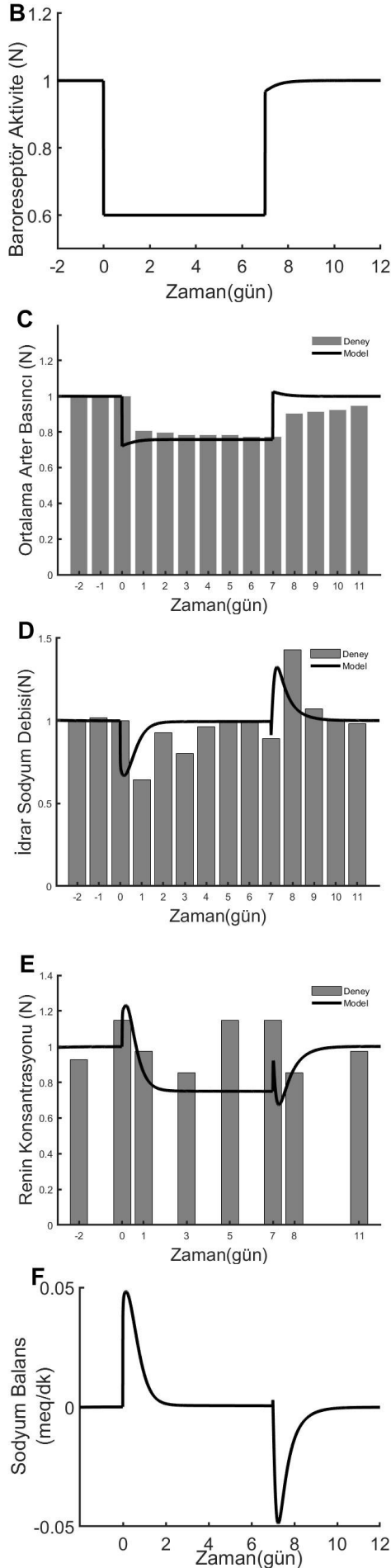
Şekil 1. He ve ark. deneyinin [13] simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması. Sodyum Alımı ilk 5 gün normal değerinin %208 katına çıkarıldığının sonraki 5 gün normal değerinin

%13 katına çıkarıldığında; A: Sodyum Alımı, B: Renin Konsantrasyonu, C: Plazma Aldosteron Konsantrasyonu, D: Plazma Sodyum Konsantrasyonu. (—) Düz çizgiler model sonuçlarını, (•) deney sonuçlarını gösterir.

B. 1 hafta süresince karotis baroreseptörlerinin uyarılmasının kan basıncı, idrar sodyum debisi ve plazma renin konsantrasyonu üzerine etkileri [17]

Lohmeier ve arkadaşlarının yapmış olduğu deneysel çalışmada karotis baroreseptörleri 7 gün boyunca elektriksel olarak aktive edilmiştir [17]. 7 gün boyunca plazma norepinefrin (NE) konsantrasyonunun kontrol değerinden yaklaşık olarak %40 azaldığı gözlenmiştir. NE sempatik sinir sisteminin nörotransmitteridir. Sempatik sinir sisteminin aktivasyonunda plazmada norepinefrin artmakta sempatik sinir sistemi inhibisyonunda ise plazmada norepinefrin seviyesi azalmaktadır. Bu doğrusal ilişki sebebiyle plazma NE konsantrasyonu sempatik sinir sisteminin bir indikatörü olarak kabul edilir (16,21). Bu sebeple diğer modelleme çalışmalarına (15,20) benzer şekilde, deneyde plazma NE %40 azaldığı için sempatik aktivitenin de %40 azaldığı kabul edilmiştir. Böylece modelde böbrek sempatik sinir aktivitesi (denklem 1, BSSA) ve baroreseptörlerden arter direncini etkileyen otonom sinir sistemi etkisi (denklem 55, α_{baro}) 7 gün boyunca %40 azaltılmış sonrasında normal değerine döndürülmüştür (Şekil 2A,2B). Deneyde 7 günlük aktivasyon süresi boyunca ve toplamda 11 gün ortalama arter basıncı, idrar sodyum debisi ve plazma renin aktivitesi kayıt edilmiştir. 7 gün sonunda deneyde arter basıncı kontrol değerinden yaklaşık %20±1, modelde ise yaklaşık %24±1 azalmıştır (Şekil 2C). İdrar sodyum atılımı aktivasyonun başladığı gün deneyde yaklaşık %35 azalmış, modelde yaklaşık %27 azalmıştır. Aktivasyon normale döndüğünde 8. günde idrar sodyum debisi deneyde yaklaşık %40±1 artmış, modelde %24±1 artmıştır (Şekil 2D). Deneysel çalışmaya benzer şekilde, birkaç gün içinde sodyum balans sağlanmıştır (Şekil 2F). Model çıktıları, ek tabloda verilen normal değerlere bölünerek normalize edilmiştir.

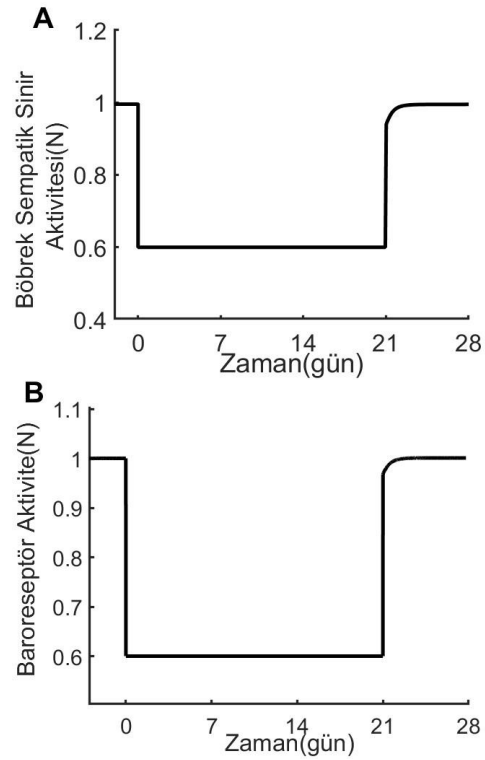


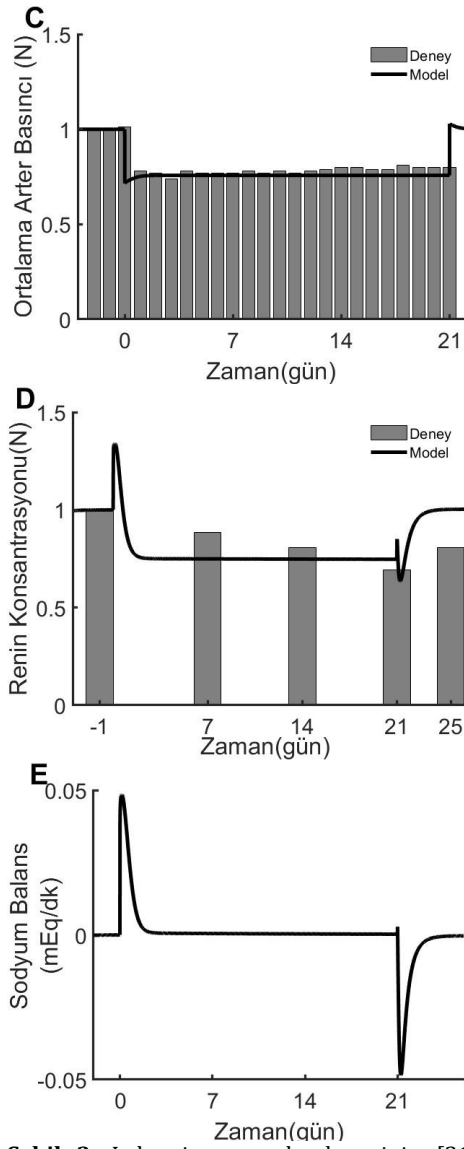


Şekil 2. Lohmeier ve ark. deneyinin [17] simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması. Böbrek sempatik sinir aktivitesi ve baroreseptör aktivite 7 gün boyunca %40 azaltıldığında A:Böbrek Sempatik Sinir Aktivitesi, B: Baroreseptör Aktivite, C:Ortalama Arter Basıncı, D:İdrar Sodyum Debisi, E:Renin Konsantrasyonu, F: Sodyum Balans.

C. 3 hafta süresince karotis baroreseptörlerinin uyarılmasının kan basıncı, idrar sodyum debisi ve plazma renin konsantrasyonu üzerine etkileri [21]

Lohmeier ve ark. yapmış olduğu deneysel çalışmada karotis baroreseptörlerin uzun dönemli aktivasyonunun arter basıncındaki ve sempatik aktivitedeki uzun süreli etkileri gözlenmiştir [21]. Kontrol periyodundan sonra 3 hafta boyunca sempatik aktivite ve arter basıncında azalma gözlemlenmiştir. Modelde deneysel çalışmaya benzer şekilde 3 hafta boyunca böbrek sempatik sinir aktivitesi (denklem 1, BSSA) ve baroreseptör aktivite (denklem 55, a_{baro}) deneydeki NE seviyesi baz alınarak yaklaşık %40 azaltılmıştır (Şekil 3A,3B). Deneyde 3 hafta boyunca arter basıncı kontrol değerinden yaklaşık %21±1 azalmış, modelde yaklaşık %24±1 azalmıştır (Şekil 3C). Plazma renin aktivitesi 3 hafta boyunca deneyde ortalama %20±1, modelde ortalama %22±1 azalmıştır (Şekil 3D). Deneysel çalışmaya benzer şekilde, birkaç gün içinde sodyum balans sağlanmıştır (Şekil 3E).



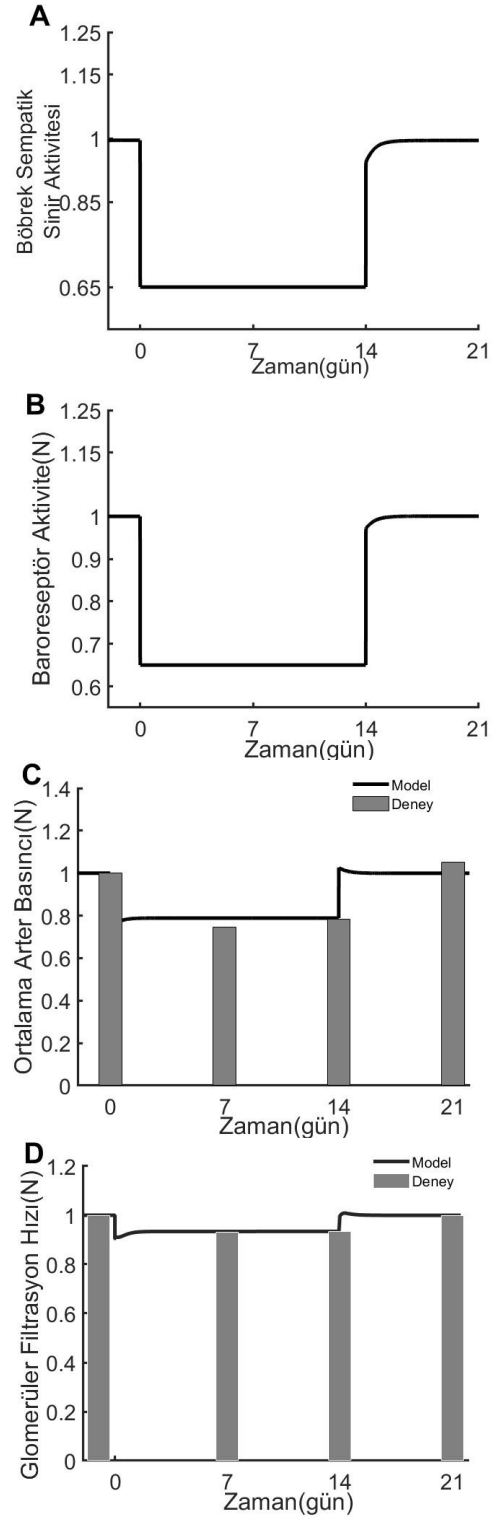


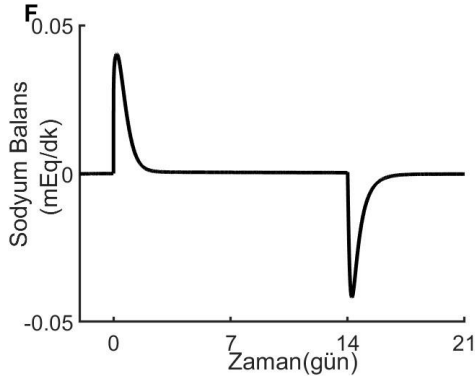
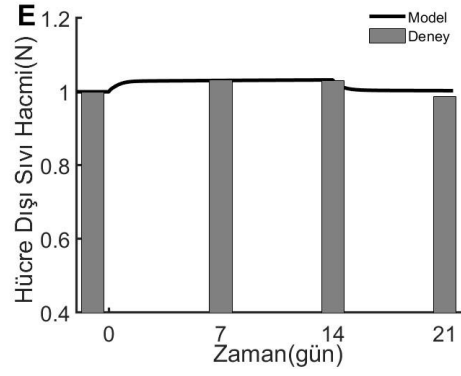
Şekil 3. Lohmeier ve ark. deneyinin [21] simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması. Böbrek sempatik sinir aktivitesi ve baroreseptör aktivite 21 gün boyunca %40 azaltıldığında, A: Böbrek Sempatik Sinir Aktivitesi, B: Baroreseptör Aktivite, C: Ortalama Arter Basıncı, D: Renin Konsantrasyonu, E: Sodyum Balans.

D. 2 hafta süresince karotis baroreseptörlerinin uyarılmasının kan basıncı, glomerüler filtrasyon hızı, hücre dışı sıvı hacmi ve böbrek kan akımı üzerine etkileri [35]

Iliescu ve ark. yapmış olduğu deneysel çalışmada [35] karotis baroreseptörlerinin uyarılması ile plazma NE seviyesinde %35 azalma gözlenmiştir. Modelde deneysel veriye göre plazma NE seviyesi baz alınarak böbrek sempatik sinir aktivitesi (denklem 1, BSSA) (Şekil 4A) ve baroreseptör aktivite (denklem 55, a_{baro}) (Şekil 4B) %35 azaltılmıştır. 2 hafta süresince arter basıncında ilk hafta %25 ikinci hafta ise %21 azalma tespit edilmiştir (Şekil 4C). Glomerüler Filtrasyon hızında ise ilk hafta ortalama yaklaşık %11 ve ikinci hafta yaklaşık %10 azalma tespit edilmiştir (Şekil 4D). Hücre dışı sıvı hacmi iki hafta süresince kontrol değerinden yaklaşık %3 artmıştır (Şekil 4E).

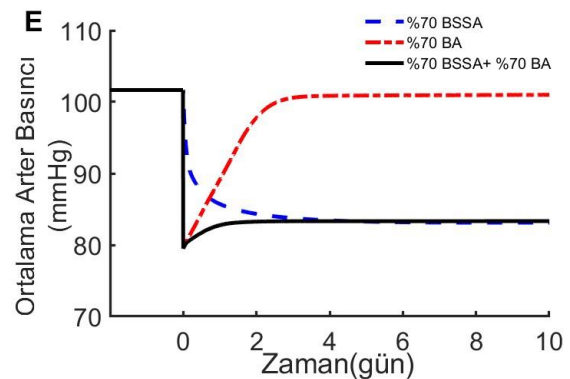
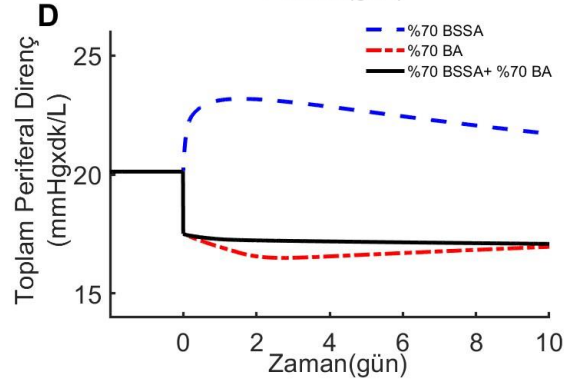
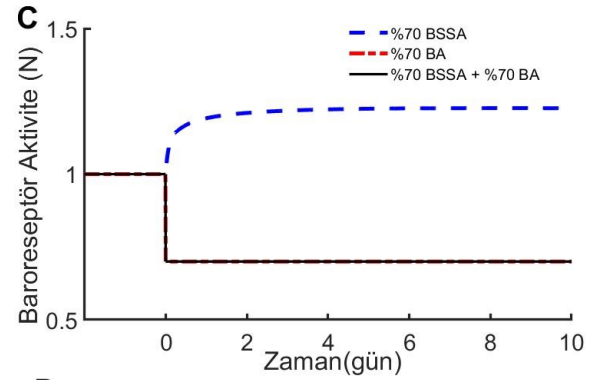
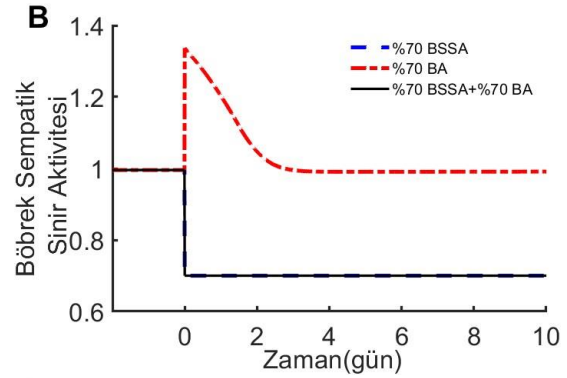
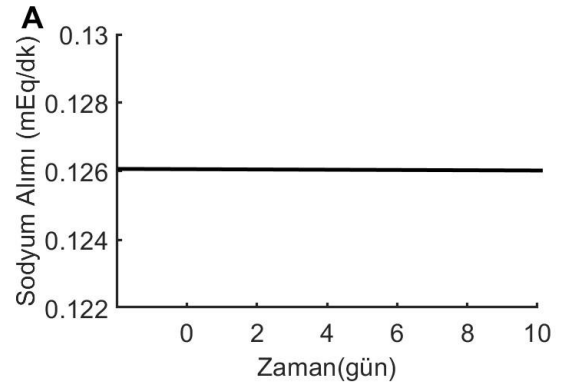
Simülasyon sonuçlarına göre arter basıncı, glomerüler filtrasyon hızı, hücre dışı sıvı hacmi değişimlerinin gerçeğe yakın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4C, 4D, 4E). Birkaç gün içerisinde sodyum balans sağlanmıştır (Şekil 4F).

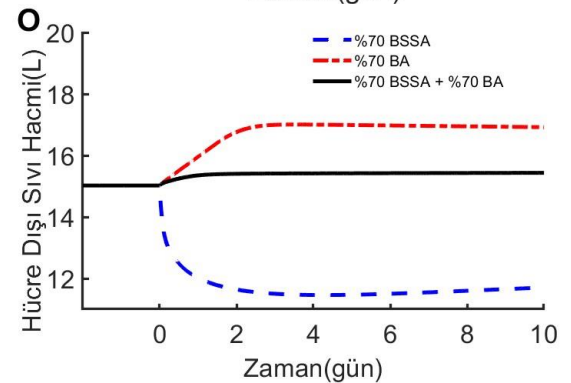
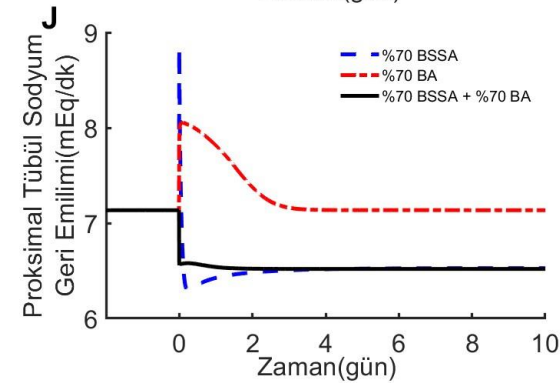
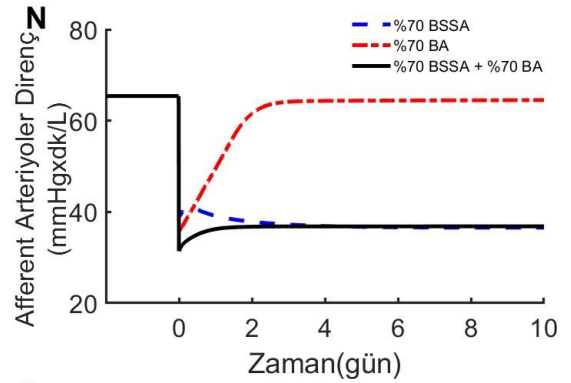
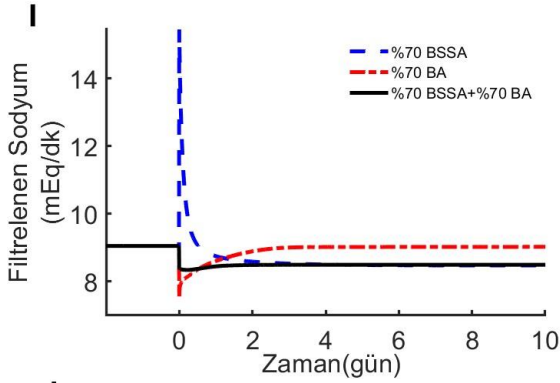
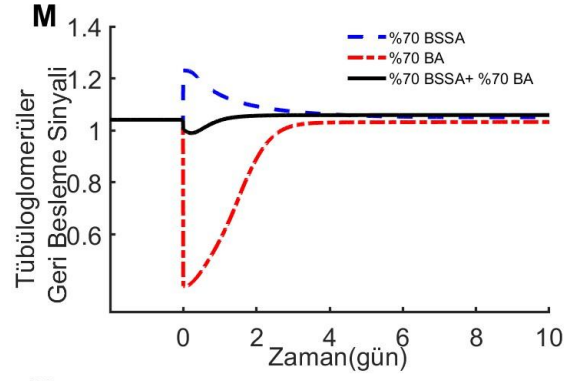
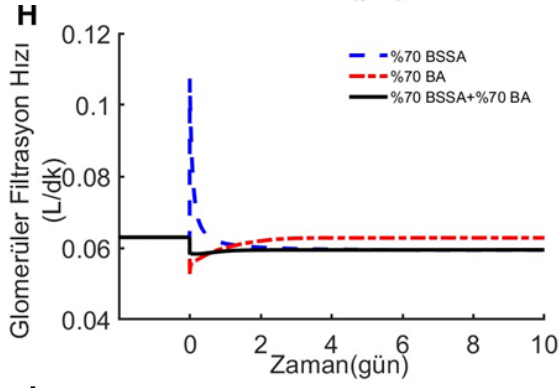
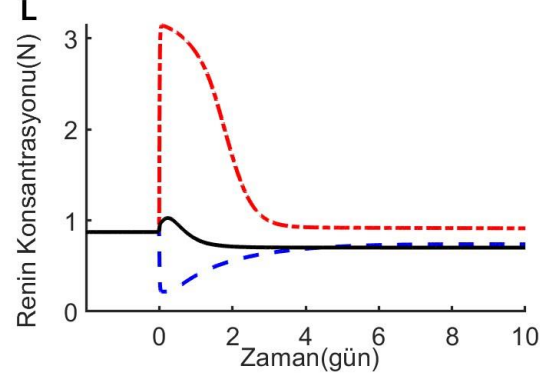
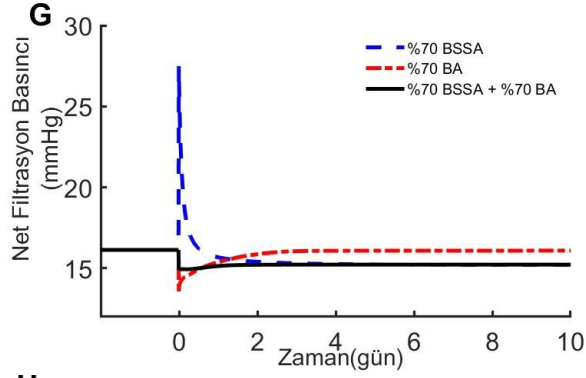
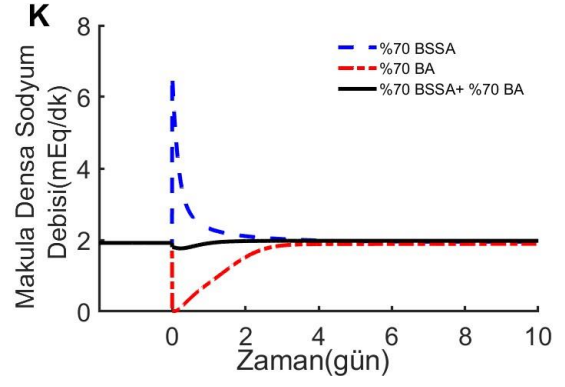
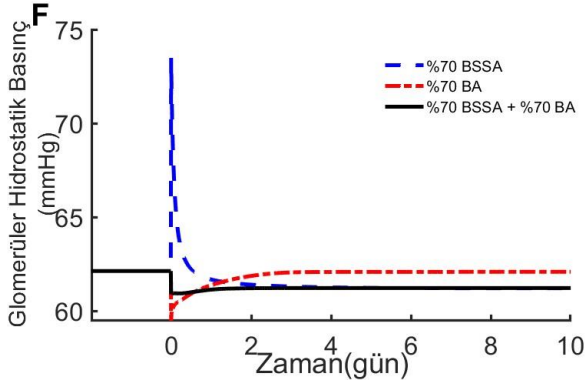


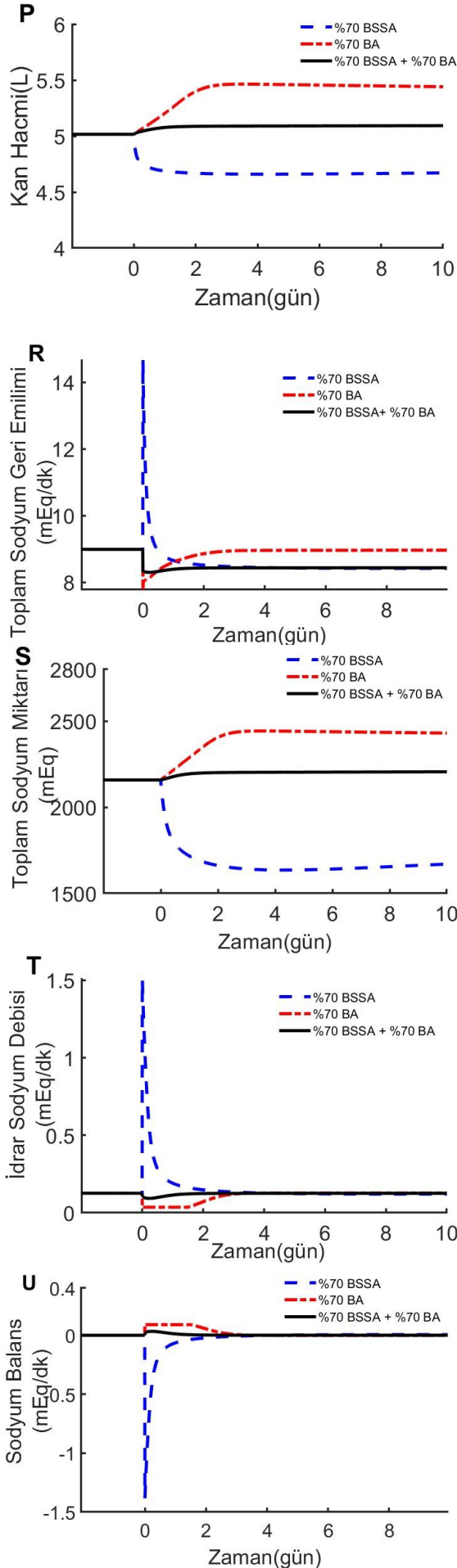


Şekil 4. Iliescu ve ark. deneyinin simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması. Böbrek sempatik sinir aktivitesi ve baroreseptör aktivite 14 gün boyunca %35 azaltıldığında, A: Böbrek Sempatik Sinir Aktivitesi, B: Baroreseptör Aktivite, C: Ortalama Arter Basıncı, D: Glomerüler Filtrasyon Hızı, E: Hücre Dışı Sıvı Hacmi, F: Sodyum Balans

E. Karotis baroreseptörlerinin uyarılmasında böbrekten sodyum atılımının azalmasını açıklamak için yapılan simülasyonlar : Karotis baroreseptörlerinin uyarılmasında böbrekten sodyum atılımının azalmasını açıklamak için sodyum alımı (Şekil 5A) sabit tutularak sırasıyla yalnızca böbrek sempatik sinir aktivitesi (denklem 1, BSSA) %30 azaltılmış, yalnızca baroreseptör aktivite (denklem 55, a_{baro}) %30 azaltılmış sonra ikisi birlikte %30 azaltılmıştır (Şekil 5B,5C). Toplam periferel direnç (Şekil 5D), ortalama arter basıncı (Şekil 5E), glomerüler hidrostatik basınç (Şekil 5F), net filtrasyon basıncı (Şekil 5G), glomerüler filtrasyon hızı (Şekil 5H), filtrelenen sodyum (Şekil 5I), proksimal tübül sodyum geri emilimi (Şekil 5J), makula densa sodyum debisi (Şekil 5K), renin konsantrasyonu (Şekil 5L), tübüloglomerüler geri besleme sinyali (Şekil 5M), afferent arteriyoler direnç (Şekil 5N), hücre dışı sıvı hacmi (Şekil 5O), kan hacmi (Şekil 5P), toplam tübül sodyum geri emilimi (Şekil 5R), vücut toplam sodyum miktarı (Şekil 5S), idrar sodyum debisi (Şekil 5T), ve sodyum balans (Şekil 5U) karşılaştırılmıştır.







Şekil 5. Normal sodyum alımında yalnızca böbrek sempatik sinir aktivitesi %30 azaltıldığında, yalnızca baroreseptör aktivite %30 azaltıldığında ve hem BSSA ve hem BA %30 azaltıldığında, A: Sodyum Alımı, B: Böbrek Sempatik Sinir Aktivitesi, C: Baroreseptör Aktivite, D: Toplam Periferel Direnç, E: Ortalama Arter Basıncı, F:Glomerüler Hidrostatik Basıncı, G:Net Filtrasyon Basıncı, H: Glomerüler Filtrasyon Hızı, I: Filtrelenen Sodyum, J: Proksimal Tübül Sodyum Geri Emilimi, K: Makula Densa Sodyum Debisi, L: Renin Konsantrasyonu, M: Tübüloglomerüler Geri Besleme Sinyali, N: Afferent Arteriyoler Direnç, O: Hücre Dışı Sıvı Hacmi, P: Kan Hacmi, R: Toplam Sodyum Geri Emilimi, S: Vücut Toplam Sodyum Miktarı, T: İdrar Sodyum Debisi, U: Sodyum Balans.

4. Tartışma ve Sonuç

Karotis baroreseptörlerinin elektriksel olarak uyarılmasının arter kan basıncı üzerine etkilerini incelemek için uzun dönemli matematik model kullanılmıştır. Bunun için model gerçek verilerle test edilmiş daha sonra 3 farklı senaryo uygulanarak sonuçlar incelenmiştir.

He ve ark. tarafından yapılan deneye benzer şekilde kullanılan matematik modelde sodyum alımı ilk 5 gün normalin %208 katı arttırılmış sonraki 5 gün normalin %13'üne indirilmiştir (Şekil 3.A), (13). Model çalıştırılmış ve plazma renin konsantrasyonu (Şekil 3.B), plazma aldosteron konsantrasyonu (Şekil 3.C) ve plazma sodyum konsantrasyonu (Şekil 3.D) deneysel veriler ile uyumlu gözlenmiştir. Sodyum alımı 2 katına çıkarıldığı ve %90 oranında azaltıldığında sodyum konsantrasyonu yaklaşık olarak %1 oranında değişmiştir. Modelde de sodyum konsantrasyonunun gerçeğe benzer olarak çok az değişmesi, modelin uygun bir şekilde kan hacmini kontrol eden mekanizmalara sahip olduğunu göstermektedir.

Lohmeier ve ark. [17,21] ve Ilescu ve ark. [35] tarafından yapılan deneysel çalışmalara benzer şekilde, modelde BSSA ve BA aktivasyonu plazma NE konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak azaltılmıştır. Deneysel çalışmalarda gözlenen ortalama arter basıncı azalması, plazma renin konsantrasyonu değişimi, glomerüler filtrasyon hızının azalması, hücre dışı sıvı hacmi artışı ve idrar sodyum debisinin azalması model sonuçları ile karşılaştırılmış ve modelin gerçeğe yakın sonuç verdiği gözlenmiştir.

Efferent böbrek sempatik sinir aktivitesinin kronik azalmasının, idrar sodyum debisini artırarak, kan basıncını azalttığı bilinmektedir [9,10,11,12,37,38]. Karotis baroreseptörlerinin kronik olarak uyarılması ile sempatik sinir sisteminin aktivitesi azalmaktadır. Bu durumda böbrek sempatik sinir aktivitesinin de azalması böylece idrar sodyum debisinin artması ve arter kan basıncının azalması beklenir. Fakat karotis baroreseptörlerinin kronik uyarılması ile arter kan basıncı düşmekte iken idrar sodyum debisi azalmaktadır. Böbrek sempatik sinir aktivitesi azaldığında idrar sodyum debisinin de azalmasını

sağlayan mekanizmalar tam olarak açıklanmamıştır [21,22,38]. Bunu açıklamak için gerçeğe yakın sonuçlar verdiği yukarıda gözlenen model kullanılarak 3 farklı senaryo uygulanmıştır.

Senaryo 1: Normal sabit sodyum alımında (Şekil 5A) yalnızca böbrek sempatik sinir aktivitesi %30 azaltılmıştır (Şekil 5B). Bu durumda afferent arteriyoller direnç azalmış (Şekil 5N) bunun sonucunda da glomerüler hidrostatik basınç (Şekil 5F), net filtrasyon basıncı (Şekil 5G) ve böylece glomerüler filtrasyon hızı (Şekil 5H) artmıştır. Glomerüler filtrasyon hızının artmasıyla filtrelenen sodyum debisi (Şekil 5I) de artmaktadır. Böylece proksimal tübül sodyum geri emilim miktarı da artmıştır (Şekil 5J). Filtrelenen sodyum debisindeki artışın sonucunda makula densa bölgesine giren sodyum debisi artmıştır (Şekil 5K). Makula densa sodyum debisi artışına bağlı olarak renin salınımı azalmıştır (Şekil 5L). Makula densa sodyum debisine bağlı olarak fonksiyon gösteren tübüloglomerüller geri besleme sinyali, afferent arteriyol direncini artırıcı yönde etki etmek amacıyla artış göstermiştir (Şekil 5M). Filtrelenen sodyum debisi (Şekil 5I) ve toplam sodyum geri emilimi (Şekil 5R) artmış fakat filtrelenen sodyum debisi sodyum geri emiliminden daha fazla olduğu için idrar sodyum debisinde artış gözlenmiştir (Şekil 5T). Vücudun bu şekilde sodyum kaybetmesi ile toplam sodyum miktarı azalmış (Şekil 5S) böylece hücre dışı sıvı hacmi (Şekil 5O), kan hacmi (Şekil 5P) azalmış ve sonuç olarak arter kan basıncı (Şekil 5E) azalmıştır. Arter kan basıncının azalması ile uyarılan baroreseptörlerden vücut arterlerinin direncini (Şekil 5C) arttıracak yönde sinyal artışı gözlenmiştir (Şekil 5D). Normal sodyum alımında böbrekten atılan sodyum miktarı azalmış fakat arter kan basıncının düşmesi ile yaklaşık 3 gün içinde sodyum balansı (alınan ve atılan sodyum arasındaki fark) sağlanmıştır (Şekil 5U). Modelin yukarıda açıklanan tüm sonuçları fizyoloji bilgilerimize uygundur [1-,3,9-11].

Senaryo 2: Bu bölümde arter kan basıncının azalmasını analiz etmek için yalnızca baroreseptör aktivite %30 azaltılmıştır (Şekil 5C). Arter direncine etki eden baroreseptör aktivitenin azalması ile arter direncinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 5D). Böylece arter basıncında azalma olmuştur (Şekil 5E). Azalan arter basıncını yükseltmek amacıyla böbrek sempatik sinir aktivitesinde artış gözlenmiştir (Şekil 5B). Arter kan basıncının azalması ile glomerüler hidrostatik basınç (Şekil 5F), net filtrasyon basıncı (Şekil 5G), glomerüler filtrasyon hızı (Şekil 5H) azalmıştır. Glomerüler filtrasyon hızının azalmasının sonucu olarak filtrelenen sodyum miktarı da azalmıştır (Şekil 5I). Arter kan basıncının azalması sonucunda böbrek sempatik sinir aktivitesinin (Şekil 5B) ve renin konsantrasyonunun (Şekil 5L) artması sebebiyle proksimal tübül sodyum geri emilimi (Şekil 5J) artmıştır. Sonuç olarak makula densa sodyum debisi azalmıştır (Şekil 5K). Makula densa sodyum debisinin

azalması ile tübüloglomerüller geri besleme sinyali azalmış (Şekil 5M) ve renin salınımı artmıştır (Şekil 5L). Filtrelenen sodyum debisini azalması ile böbrekten atılan sodyum debisi azalmıştır (Şekil 5T). Böbrekten atılan sodyum debisinin azalması ile vücutta sodyum miktarı (Şekil 5S) artmış böylece hücre dışı sıvı hacmi (Şekil 5O) ve kan hacmi (Şekil 5P) artmıştır. Kan hacminin artışı ile arter kan basıncı (Şekil 5E) yükselmeye başlamış ve birkaç gün içinde yaklaşık olarak normal değerine dönmüştür. Arter kan basıncının artmaya başlaması ile glomerüler filtrasyon hızı da artmaya başlamış ve birkaç gün içinde normale dönmüştür (Şekil 5H). Sonuç olarak böbrekten atılan sodyum miktarı alınan sodyum miktarına eşit olmuş ve böylece sodyum balansı sağlanmıştır (Şekil 5U). Yalnızca, vücut arter direncini etkileyen baroreseptör etkiyi azaltan fakat böbrek sempatik sinir aktivitesinin doğal yanıt vermesini engellemeyen bir deneysel çalışma bilgisine ulaşamadık. Fakat arter direncinin azalması ile arter basıncında düşüş sonucunda yukarıda gelişen olaylar, fizyolojide basınç-diürez, böbrek-vücut sıvı sistemleri ile arter basıncının kontrolü, ilişkisine çok benzemektedir [1,3].

Senaryo 3: Karotis baroreseptörlerinin uyarılması ile hem böbrek sempatik sinir aktivitesi hem de arteriyel direnci etkileyen baroreseptör aktivitesi azaldığı için bu senaryoda hem böbrek sempatik sinir aktivitesi hem de baroreseptör aktivite deneysel çalışmalara benzer şekilde %30 azaltılmıştır (Şekil 5B,5C). Arter direncine etki eden baroreseptör aktivitenin azalması ile arter damar direnci azalmış (Şekil 5D), arter damar direnci azaldığı için arter kan basıncı azalmış (Şekil 5E) böylece glomerüler glomerüler hidrostatik basınç (Şekil 5F), net filtrasyon basıncı (Şekil 5G) glomerüler filtrasyon hızı (Şekil 5H) azalmıştır. Böbrek sempatik sinir aktivitesinin azalması ve tübüloglomerüller geri besleme sinyalinin (Şekil 5M) azalması sonucunda afferent arteriyoller dirençte azalma gözlenmiştir (Şekil 5N). Glomerüler filtrasyon hızı azalması sonucunda filtrelenen sodyum (Şekil 5I) azalmıştır. Proksimal tübül sodyum geri emilimi (Şekil 5J), BSSA'nın azalması, renin salınımının (Şekil 5L) azalması sonucunda azalmış ve böylece makula densa sodyum debisi azalmıştır (Şekil 5K). Azalan glomerüler filtrasyon hızını yükseltmek için tübüloglomerüller geri besleme sinyali (Şekil 5M) azalmıştır. Böbreklerden atılan sodyum azalması (Şekil 5T) ile vücutta sodyum birikmesi olmuştur (Şekil 5S). Böylece hücre dışı sıvı hacmi (Şekil 5O) ve kan hacmi (Şekil 5P) artmıştır. Modelde, karotis baroreseptörlerinin uyarılması ile, arter kan basıncının azalması, renin sekresyonunun azalması, idrar sodyum debisinin azalması, hücre dışı sıvı hacminin artması, glomerüler filtrasyon hızının azalması ve sodyum balansının sağlanması, Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterildiği gibi deneysel çalışma sonuçlarına benzerdir [17,21,35]. Karotis baroreseptörlerinin deneysel uyarılmasında

ölçülmeyen değişkenlerin, modelde gözlenen davranışları fizyoloji bilgilerimize uygundur [1].

Modele göre karotis baroreseptörlerinin kronik uyarılmasında böbrekten sodyum atılımının azalmasının sebebi glomerüler filtrasyon hızının azalmasıdır.

Model çıktıları, deneysel çalışma sonuçlarına yakındır. Aldosteron hormonunun, böbrekte, hem distal tübül hem de toplayıcı kanaldan sodyum geri emilimi üzerine etkili olduğu bilinmektedir [1]. Modelde aldosteronun, distal tübülde sodyum geri emilimi üzerine etkisi olmasına rağmen, toplayıcı kanal üzerine olan etkisi bulunmamaktadır. Bu mekanizmanın eklenmesi modelin gerçeğe yakınlığını artırabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Sibel CAYMAZ'ın yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

Kaynakça

- [1] Yeğen, Ç. B., Alican, İ., Solakoğlu, Z., ed. 2017. Guyton ve Hall Tıbbi Fizyoloji Kitabı. Güneş Tıp Kitabevleri.
- [2] Barrett, K. E., Barman, S. M., Brooks, H. L., Yuan, X.J. 2019. Ganong's Review of Medical Physiology, McGraw-Hill Education.
- [3] Guyton, A. C. 1980. Arterial Pressure and Hypertension. Philadelphia: Saunders.
- [4] Guyton, A. C., Coleman, T. G., Granger, H. J. 1972. Circulation: overall regulation. Annu Rev Physiol, 34: 13-46.
- [5] Uttamsingh, R. J., Leaning M. S., Bushman J. A., Carson E. R. Finkelstein L. 1985. Mathematical model of the human renal system. Med Biol Eng Comput, 23: 525-535
- [6] Coleman, T. G., Hall, J.E. 1992. A mathematical model of renal hemodynamics and excretory function. In: Structuring Biological Systems: A Computer Modelling Approach. edited by Iyengar SS. Boca Raton, FL: CRC,s. 89 -124.
- [7] Karaaslan, F., Denizhan, Y., Kayserilioğlu, A., H. Gulcur, H. Ö. 2005. Long-Term Mathematical Model Involving Renal Sympathetic Nerve Activity, Arterial Pressure, and Sodium Excretion. Annals of Biomedical Engineering, 33(11):1607-30.

- [8] Karaaslan, F., Denizhan, Y., Hester, R. 2014. A mathematical model of long-term renal sympathetic nerve activity inhibition during an increase in sodium intake. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol, 306: R234 -R247.
- [9] DiBona, G. F. 1985. Neural Control of Renal Function: Role of Renal Alpha Adrenoreceptors. Journal of Cardiovascular Pharmacology, 7 (Suppl,8): S13-S23.
- [10] DiBona, G. F., Kopp, U. C. 1997. Neural Control of Renal Function. Physiological Reviews, Vol.77, No 1, S132-197.
- [11] DiBona, G. F. 2004. The sympathetic nervous system and hypertension: recent developments. Hypertension, 43:147-150.
- [12] DiBona, G. F. 2005. Physiology in perspective: The Wisdom of the Body. Neural control of the kidney. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol, 289: R633-R641.
- [13] He F. J., Markandu N. D., MacGregor G. A. 2001. Importance of the renin system for determining blood pressure fall with acute salt restriction in hypertensive and normotensive whites. Hypertension, 38: 321-325.
- [14] Aydın, M., Kuryel, B., Gündüz, Gönül., Oturanç, G. 2016. Diferansiyel Denklemler ve Uygulamaları. 12. Baskı, Barış Yayınları Fakülteler Kitabevi, İzmir, 472-478s.
- [15] Iliescu, R., Lohmeier, T. E. 2010. Lowering of blood pressure during chronic suppression of central sympathetic outflow: Insight from computer simulations. Clin Exp Pharmacol Physiol, 37(2): e24-33.
- [16] Lohmeier, T. E., Irwin, E. D., Rossing, M. A., Sedar D. J., Kieval R. S. 2004. Prolonged activation of the baroreflex produces sustained hypotension. Hypertension, 43: 306-11.
- [17] Lohmeier, T. E., Dwyer, T. M., Hildebrandt, D. A., Irwin, E. D., Rossing, M. A., Sedar, D. J., Kieval, R. S. 2005. Influence of prolonged baroreflex activation on arterial pressure in angiotensin hypertension. Hypertension, 46: 1194 -1200.

- [18] Lohmeier, T. E., Dwyer T. M., Irwin, E. D., Rossing, M. A., Kieval, R. S. 2007. Prolonged activation of the baroreflex abolishes obesity-induced hypertension. *Hypertension*, 49: 1307–1314.
- [19] Lohmeier, T. E., Hildebrandt, D. A., Dwyer, T. M., Iliescu, R., Irwin, E. D., Cates, A. W., Rossing, M. A. 2009. Prolonged activation of the baroreflex decrease arterial pressure even during chronic adrenergic blockade. *Hypertension*, 53: 833–838.
- [20] Clemmer, J. S., Pruett, W. A., Hester, L. R., Iliescu, R., Lohmeier, T. E. 2018. Role of the heart in blood pressure lowering during chronic baroreflex activation: insight from an in silico analysis. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 315(5):H1368-H1382.
- [21] Lohmeier, T. E., Iliescu, R., Dwyer, T. M., Irwin E. D., Cates, A. W., Rossing, M. A. 2010. Sustained suppression of sympathetic activity and arterial pressure during chronic activation of the carotid baroreflex. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 299: H402–H409.
- [22] Lohmeier, T. E., Iliescu, R. 2012. Lowering of blood pressure by chronic suppression of central sympathetic outflow: insight from prolonged baroreflex activation. *J Appl Physiol*, 113(10):1652-8.
- [23] Lohmeier, T. E., Iliescu, R. 2013. Chronic activation of the baroreflex and the promise for hypertension therapy. *Handb Clin Neurol*, 2013:117:395-406.
- [24] Lohmeier, T. E., Iliescu, R., Tudorancea, I., Cazan, R., Cates, A. W., Georgakopoulos, D., Irwin, E. D. 2016. Chronic Interactions Between Carotid Baroreceptors and Chemoreceptors in Obesity Hypertension. *Hypertension*, 68(1):227-35.
- [25] Neylon, M., Marshall, J.M., Johns, E. J. 1995. The effects of systemic hypoxia on renal function in the anaesthetized rat. *Journal of Physiology*, 487.2,497-511.
- [26] Morita, H., Vatner, S. F. 1985. Effects of volume expansion on renal nerve activity, renal blood flow, and sodium and water excretion in conscious dogs. *Am J Physiol*, 249(5 Pt 2): F680-7.
- [27] Takeuchi, J., Ohya, N., Sakai, S., Nakamura, H., Nohara, T. 1968. Nervous control of renal tubular function. *Jpn Heart J*, 9(6):564-72.
- [28] Miki, K., Hayashida, Y., Shiraki, K. 1993. Cardiac-renal-neural reflex plays a major role in natriuresis induced by left atrial distension. *Am J Physiol*, 264(2 Pt 2): R369-75.
- [29] Prosnitz, H. Z., DiBona, G. F. 1978. Effect of decreased renal sympathetic nerve activity on renal tubular sodium reabsorption. *Am J Physiol*, 235(6): F557-63.
- [30] Miki, K., Hayashida, Y., Shiraki, K. 2002. Role of cardiac-renal neural reflex in regulating sodium excretion during water immersion in conscious dogs. *J Physiol*, 545(1):305-12.
- [31] Beers, E. T., Carroll, R. G., Young, D. B., Guyton, A. C. 1986. Effects of graded changes in reflex renal nerve activity on renal function. *Am J Physiol*, 250(3 Pt 2): F559-65.
- [32] Handa, R. K., Johns, E. J. 1987. The role of angiotensin II in the renal responses to somatic nerve stimulation in the rat. *J Physiol*, 393:425-36.
- [33] Nelson, L. D., Osborn, J. L. 1993. Neurogenic control of renal function in response to graded nonhypotensive hemorrhage in conscious dogs. *Am J Physiol*, 264(4 Pt 2): R661-7.
- [34] Miki, K., Hayashida, Y., Tajima, F., Iwamoto J., Shiraki, K. 1989. Renal sympathetic nerve activity and renal responses during head-up tilt in conscious dogs. *Am J Physiol*, 257(2 Pt 2): R337-43.
- [35] Iliescu, R., Irwin, E. D., Georgakopoulos, D., Lohmeier, T. E. 2012. Renal Responses to Chronic Suppression of Central Sympathetic Outflow. *Hypertension*, 60:749-756.
- [36] Caymaz, S., Karaaslan, F. 2023. Kan Sodyum Konsantrasyonunun Kontrolünde ADH, Renin-Anjiyotensin-Aldosteron Etkisinin Analizi. 24. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 14-16 Eylül, İstanbul.
- [37] Caymaz, S., Karaaslan F. 2023. Kronik Böbrek Sempatik Sinir Aktivitesi İnhibisyonunun Kan

Basıncına Etkisi. Tıp Teknolojileri Kongresi,10-12 Kasım, Gazimağusa,134-137.

- [38] Lohmeier, T. E., Hall, J. E. 2019. Device-Based Neuromodulation for Resistant Hypertension Therapy. Circulation Research, 124(7):1071-1093.

Ekler

Ek A. Modele ait semboller, değişkenler ve normal değerleri

Ek B. Model blok diyagramı. Düz oklar aynı yönde etkiyi, kesikli oklar ters yönde etkiyi gösterir.

Ek C. Model blok diyagramı. Düz oklar aynı yönde etkiyi, kesikli oklar ters yönde etkiyi gösterir.

Ekler**Ek A. Modele ait semboller, değişkenler ve normal değerleri**

Sembol	Değişken Tanımı	Normal Değeri
α_{oab}	Ortalama atardamar kan basıncının böbrek sempatik sinir aktivitesi üzerine etkisi	1
α_{sab}	Sağ atriyum basıncının böbrek sempatik sinir aktivitesi üzerine etkisi	1
β_{bssa}	Böbrek sempatik sinir aktivitesinin afferent arteriyoller damar direnci üzerine etkisi	1
γ_{at}	Anjiyotensin II hormon konsantrasyonunun fraksiyonel proksimal tübül sodyum geri emilimi	1
γ_{filsod}	Filtrelenen sodyumun fraksiyonel proksimal tübül sodyum geri emilimi üzerine etkisi	1
γ_{bssa}	Böbrek sempatik sinir aktivitesinin fraksiyonel proksimal sodyum reabsorpsiyonu üzerine etkisi	1
δ_{sa}	Sağ atriyum basıncının antidiüretik hormon salgılanması üzerine etkisi	0
Ω_{NO}	Nitrik oksitinin afferent arteriyoller direnci üzerine etkisi	1
ε_{oto}	Otonom sinir sisteminin damar direnci üzerine etkisi	1
ζ_{ate}	Anjiyotensin II hormon etkisinin efferent arteriyoller direnci üzerine etkisi	1
$\eta_{cd-sodgeri}$	Fraksiyonel toplayıcı kanal sodyum geri emilimi	0.93
$\eta_{dt-sodgeri}$	Fraksiyonel distal tübül sodyum geri emilimi	0.5
$\eta_{pt-sodgeri}$	Fraksiyonel proksimal tübül sodyum geri emilimi	0.8
λ_{anp}	Atriyal natriüretik peptidin toplayıcı kanal sodyum geri emilimi üzerine etkisi	1
λ_{dt}	Distal tübül sodyum çıkışının toplayıcı kanal sodyum geri emilimi üzerine etkisi	1
μ_{adh}	Antidiüretik hormon konsantrasyonunun tübüler su geri emilimi üzerine etkisi	1
μ_{al}	Aldosteron hormon konsantrasyonunun tübüler su geri emilimi üzerine etkisi	1
μ_{bssa}	Böbrek sempatik sinir aktivitesinin tübüler su geri emilimi üzerine etkisi	1
v_{md-sod}	Makula densa sodyum debisine bağlı renin salgılanma hızı	750 (ng Al/saat)/dk
v_{bssa}	Böbrek sempatik sinir aktivitesinin renin salınımı üzerine etkisi	1
ξ_{ate}	Anjiyotensin II konsantrasyonunun aldosteron hormon salınımı üzerine etkisi	1
$\xi_{k/sod}$	Potasyum sodyum konsantrasyon oranının aldosteron salınımı üzerine etkisi	1

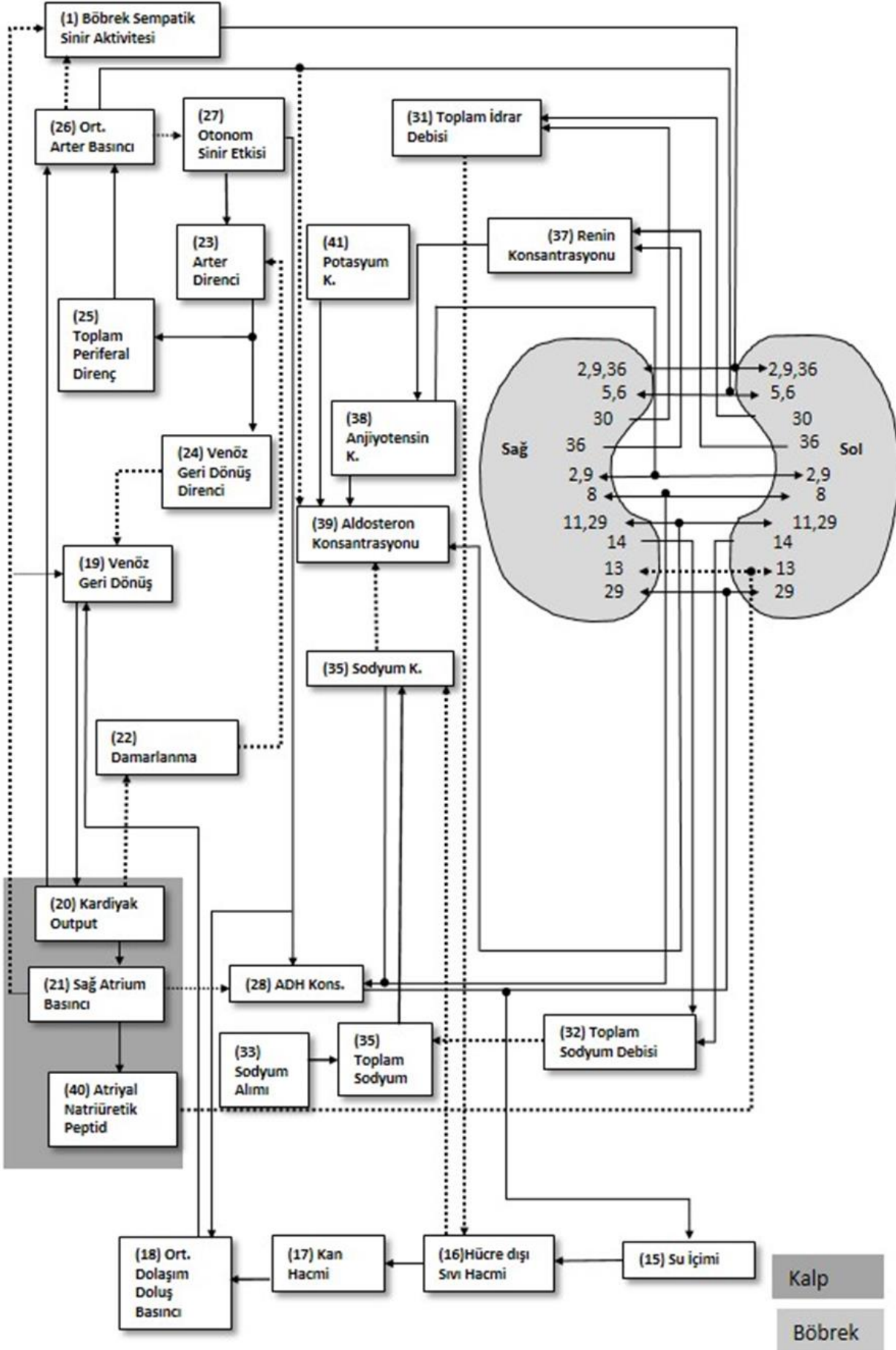
ξ_{boa}	Ortalama atardamar kan basıncının aldosteron salınımı üzerine etkisi	1
ζ_{ata}	Anjiyotensin II hormonunun efferent arteriyoller direnci üzerine etkisi	1
M_{aac}	Miyojenik yanıtın afferent arteriyoller direnci üzerine etkisi	1
Σ_{tgg}	Tübüloglomeruler geri-besleme sinyali	1
$\Phi_{cd-sodgeri}$	Mutlak toplayıcı kanal sodyum geri emilimi	0.8370 mEq/dk
Φ_{KO}	Kardiyak output	5 L/dk
Φ_{dt-sod}	Distal tübül sodyum çıkışı	0.9 mEq/dk
$\Phi_{dt-sodgeri}$	Mutlak distal tübül sodyum geri emilimi	0.9 mEq/dk
Φ_{filsod}	Filtrelenen sodyum debisi	9 mEq/dk
Φ_{gfiltr}	Glomerüler filtrasyon hızı	0.0625 L/dk
Φ_{md-sod}	Makula densa sodyum debisi	1.8 mEq/dk
$\Phi_{pt-sodgeri}$	Mutlak proksimal tübül sodyum geri emilimi	7.2 mEq/dk
Φ_{bka}	Böbrek kan akımı	0.6 L/dk
Φ_{sodal}	Sodyum alımı	0.126 mEq/dk
$\Phi_{t-sugeri}$	Tübüler su geri emilimi	0.0620 L/dk
Φ_{id}	İdrar debisi	0.0005 L/dk
Φ_{id-sod}	İdrar sodyum debisi	0.0630 mEq/dk
Φ_{vgeri}	Venöz geri dönüş	5 L/dk
Φ_{su}	Su içimi	0.001 L/dk
Ψ_{al}	Aldosteron hormonunun fraksiyonel distal tübül sodyum geri emilimi üzerine etkisi	1
α_{oto}	Otonom sinir sistemi aktivitesi	1
α_{baro}	Baroreseptör aktivitesi	0.75
α_{kemo}	Kemoreseptör aktivitesi	0.25
K_{adh}	Normalize antidiüretik hormon konsantrasyonu	1
K_{al}	Normalize aldosteron hormon konsantrasyonu	1

Ek A. (devam)

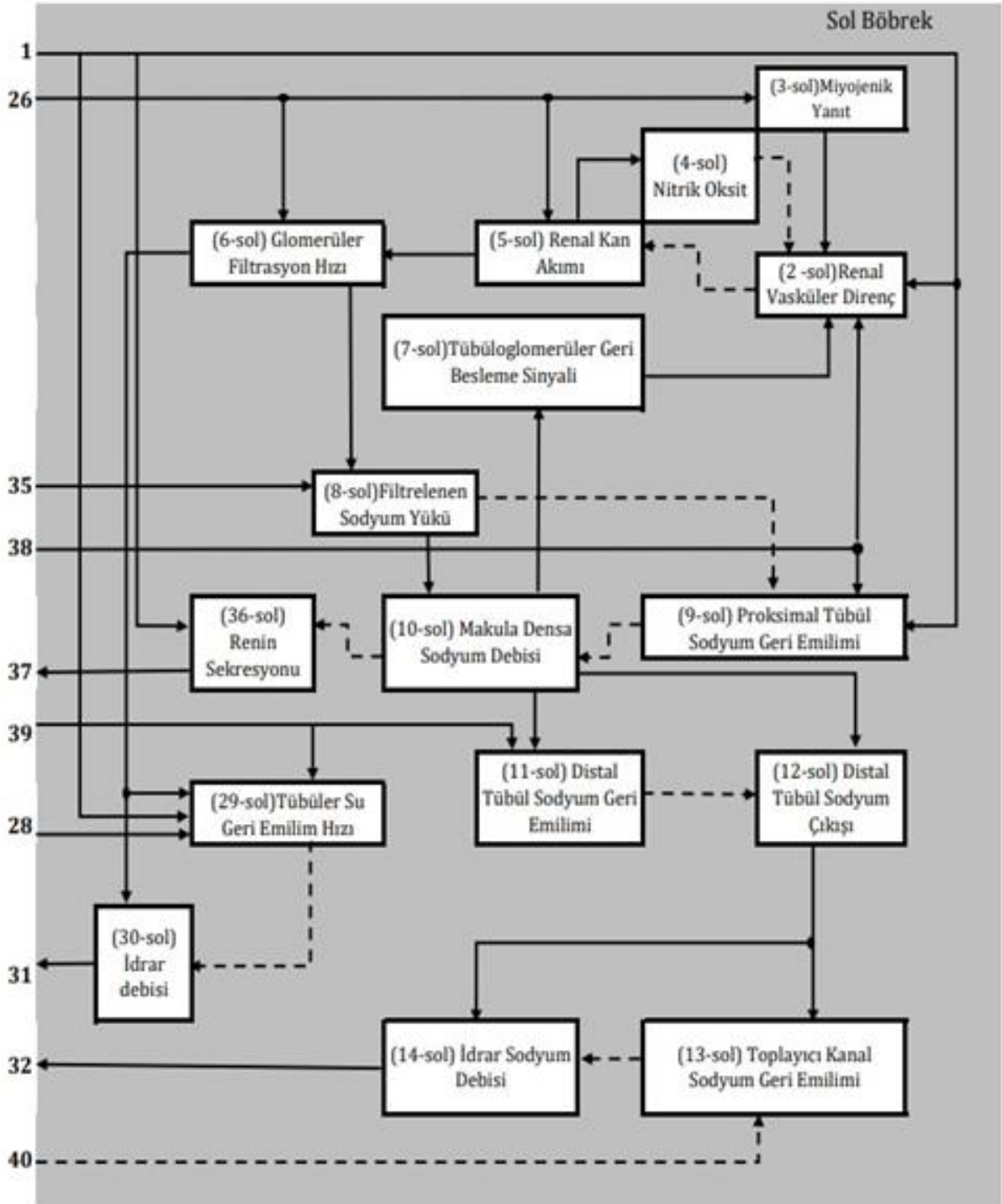
Sembol	Değişken Tanımı	Normal Değeri
K _{al}	Aldosteron konsantrasyonu	85 ng/L
K _{anp}	Normalize atriyal natriüretik peptid konsantrasyonu	1
K _{at}	Anjiyotensin II konsantrasyonu	20 ng/L
K _k	Potasyum Konsantrasyonu	5 mEq/L
K _r	Normalize renin konsantrasyonu	1
K _{sod}	Sodyum konsantrasyonu	144 mEq/L
K _{bar}	Damarlanma ile ilgili temel arter direnci katsayısı	16.6 mmHgdk/L
K _{gcf}	Glomerüler kapiller filtrasyon katsayısı	(0.003905 L/dk/mm Hg
K _{vd}	Damarlanma yıkım katsayısı	0.00001
M _{sod}	Vücut toplam sodyum miktarı	2160 mEq
N _{bssa}	Normalize böbrek sempatik sinir aktivitesi	1
B _{aa}	Ortalama afferent arteriyoler basınç	80 mmHg
B _B	Bowman hidrostatik basınç	18 mmHg
B _f	Net filtrasyon basıncı	16 mmHg
B _{gh}	Glomerüler hidrostatik basınç	62 mmHg
B _{go}	Glomerüler osmotik basınç	28 mmHg
B _{oa}	Ortalama atardamar basıncı	100 mmHg
B _{ba}	Böbrek arter basıncı	100 mmHg
B _{ort}	Ortalama dolaşım doluş basıncı	7 mmHg
B _{sa}	Sağ atriyum basıncı	0 mmHg
D _a	Atardamar direnci	20 mmHg/L/dk

D _{aa}	Afferent arteriyoler damar direnci	63.34 mmHg/L/dk
D _{ta}	Temel atardamar direnci	16.6 mmHg/L/dk
D _{tv}	Temel venöz direnç	3.4 mmHg/L/dk
D _{ea}	Efferent arteriyoler damar direnci	103.32 mmHg/L/dk
D _{tp}	Periferik direnç	20 mmHg/L/dk
D _b	Böbrek damar direnci	166.66 mmHg/L/dk
D _{vg}	Venöz geri dönüş direnci	1.4 mmHg/L/dk
BSSA	Böbrek sempatik sinir aktivitesi	1
Ŝ _{adh}	Normalize antidiüretik hormon salınımı	1
Ŝ _{al}	Normalize aldosteron hormon salınımı	1
S _r	Renin salınımı	750 ng (Al/saat)/dk
Ŝ _{r-tot}	Normalize renin salınımı	1
S _{no}	Böbrek kan akımına bağlı olarak afferent arteriyolden nitrik oksit salınımı	1
dmr	Damarlanma	1
dmr _d	Damarlanma yıkım hızı	0.00001
dmr _f	Damarlanma formasyon hızı	0.00001
H _{kan}	Kan hacmi	5L
H _{hds}	Hücre dışı sıvı hacmi	15L
T _r	Renin sekresyonu zaman sabiti	15 dk
T _{adh}	Antidiüretik hormon sekresyonu zaman sabiti	6 dk
T _{al}	Aldosteron hormon sekresyonu zaman sabiti	60 dk

Ek B. Model blok diyagramı. Düz oklar aynı yönde etkiyi, kesikli oklar ters yönde etkiyi gösterir.



Ek C. Model blok diyagramı. Düz oklar aynı yönde etkiyi, kesikli oklar ters yönde etkiyi gösterir.



Triflorometil içeren Yeni Azo-İmin Bileşikleri: Sentezi, Karakterizasyonu, *in siliko* ve *in vitro* Yöntemlerle Antioksidan Özelliklerinin Araştırılması

Tolga Acar YEŞİL^{1*} 

¹Sinop Üniversitesi, Türkeli Meslek Yüksekokulu Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, 57900, Sinop, Türkiye

(Alınış / Received: 16.07.2024, Kabul / Accepted: 08.10.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Schiff Bazı,
CUPRAC Metod,
Antioksidan,
Moleküler Kenetlenme,
ADMEt

Öz: Bu çalışmada iki yeni molekül 4-((4-metoksifenil)diazenil)-2-(((4-(triflorometil)fenil)imino)metil)fenol (**3a**) ve 2-(((4-metoksifenil)imino)metil)-4-((4-(triflorometil)fenil)diazenil)fenol (**3b**) sentezlendi. **3a** ve **3b**'nin yapılarını doğrulamak için ¹H-NMR, FTIR, UV-vis ve Kütle analiz teknikleri kullanıldı. Sentezlenen bileşiklerin antioksidan özelliklerini araştırmak için CUPRAC *in vitro* antioksidan aktivite yöntemi de kullanıldı. Bileşiklerin ADME ve toksisite parametreleri de sırasıyla SwissADME, Protox-II web sunucuları kullanılarak hesaplandı. Sentezlenen bileşikler **3a** ve **3b**'nin potansiyel antioksidan özelliklerini araştırmak için PDB ID: Lipoksijenaz için 1N8Q, CYP2C9 için 1OG5, NADPH oksidaz için 2CDU ve Sığır Serum Albümini için 4JK4 gibi dört farklı antioksidan protein kullanılarak *in siliko* moleküler yerleştirme çalışmaları yapıldı. ADME ve toksisite (ADMEt) sonuçları, farmakokinetik, fiziko-kimyasal, ilaç benzerliği ve toksisite verilerinin tamamının potansiyel bir biyoaktif madde için uygun olduğunu gösterdi. Moleküler yerleştirme sonuçları, tüm yerleştirme sonuçlarının standarttan (Trolox) daha yüksek olduğunu göstermiştir. En iyi kenetlenme skoru (-9,4 kcal/mol), **3b** ligandı ile 2CDU proteini arasındaydı. Bileşiklerin TEAC değerleri de standarttan daha yüksekti ve bu da moleküler yerleştirme skorlarıyla uyumluydu. Elde edilen tüm verilerden, bileşik **3b**'nin potansiyel antioksidan özelliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Novel Trifluoromethyl Containing Azo-Imin compounds: Synthesis, Characterization, and Investigation of Antioxidant Properties Using *In Vitro* and *In Silico* methods

Keywords

Schiff Base,
CUPRAC Method,
Antioxidant,
Molecular Docking,
ADMEt

Abstract: In this study, two new molecules 4-((4-methoxyphenyl)diazenyl)-2-(((4-(trifluoromethyl)phenyl)imino)methyl)phenol (**3a**) and 2-(((4-methoxyphenyl)imino)methyl)-4-((4-(trifluoromethyl)phenyl)diazenyl)phenol (**3b**) were synthesized. The ¹H-NMR, FTIR, UV-vis, and Mass analysis techniques were used to confirm the structures of the **3a** and **3b**. CUPRAC *in vitro* antioxidant activity method was also used to investigate the antioxidant properties of synthesized compounds. The compounds' ADME and toxicity parameters were also computed using SwissADME, Protox-II web servers respectively. *In silico* Molecular docking studies were conducted utilizing four different antioxidant proteins, such as PDB ID: 1N8Q for Lipoxxygenase, 1OG5 for CYP2C9, 2CDU for NADPH oxidase, and 4JK4 for Bovine Serum Albumin, to investigate the potential antioxidant properties of the synthesized compounds **3a** and **3b**. ADME and toxicity (ADMEt) results showed that pharmacokinetic, physico-chemical, drug-similarity, and toxicity data were all appropriate for a potential bioactive agent. Molecular docking results have shown that all docking results were higher than standard (Trolox). The best docking score (-9.4 kcal/mol) was between **3b** ligand and 2CDU protein. TEAC values of compounds were also higher than standard which was in harmony with molecular docking scores. From all obtained data It was concluded that the compound **3b** has the potential antioxidant agent.

* Corresponding author: tyesil@sinop.edu.tr

1. Introduction

Free radical generation and antioxidant defense mechanisms are out of balance, which leads to the syndrome known as oxidative stress [1]. There are several potential causes of this imbalance, such as a lack of antioxidants in the diet, endogenous overproduction brought on by inflammation, or exposure to pro-oxidant elements in the environment [2]. In addition, many serious illnesses, including some metabolic disorders (diabetes, cancer), and neurodegenerative diseases, have oxidative stress as a key side effect [3,4]. Thus, it's necessary to develop novel antioxidants that can interact with free radicals or suppress their activity to stop oxidative damage. Primary and secondary antioxidants are two types of antioxidants. One of the primary classes of secondary metabolites present in plants is the source of phenolic chemicals. While metabolism is operating regularly, phenolic antioxidants can eliminate free radicals and stop reactive species from developing. Moreover, they can protect cells from lipid, protein, and nucleic acid damage, which can result in harm or death [5]. Because of this, they are often associated with delaying the beginning of some diseases, including diabetes, cancer, autoimmune disorders, neurological diseases, and cardiovascular diseases [6–8].

In organic chemistry, fluorine (F) is the smallest substituent that can be substituted with a hydrogen atom. In medicinal chemistry, the displacement of hydrogen atoms with F atoms is a common method. The main causes of this include fluorine's strong electron attraction, electrostatic interactions, small atomic size, and high lipophilicity. Research on the synthesis and biological functions of compounds containing fluorine, particularly those with the $-CF_3$ group, is growing continually [9,10]. Because of the significant influence that fluorine-containing compounds have on pharmaceutical growth, the US Food and Drug Administration (FDA) has approved over half of the most popular medicinal molecules [11].

Imines are substances with a double bond between carbon and nitrogen $-C=N-$ and substituents at the carbon and nitrogen atoms that might be the same or different. When aldehydes combine with primary amines, commonly known as Schiff's base, an imine intermediate is created. It plays a crucial role not just in synthetic chemistry [12] but also in some biological activities such as antifungal [13], antibacterial [14], antimalarial [15], antiviral [16], anticancer [17], and antioxidant [18].

Azo compounds, which contain $N=N-$ groups in structure, are among the most widely used chemical classes of organic compounds because of their wide range of applications in lasers, electro-optical devices, biomedical research, liquid crystal displays, textile dyeing, and inkjet printing and biological medical studies [19–21]. The synthesis of derivatives of azo

compounds has generated considerable interest due to their wide biological activities and functions, which include antibacterial, anti-inflammatory, anthelmintic, antiviral, and anticancer effects [22]. The *in silico* and *in vitro* properties of synthesized azo compounds have been the subject of many studies of investigations in recent years [23]. After more research, the studies indicate that the produced azo compounds may have therapeutic potential [24–27].

Drug discovery is a difficult, costly, and time-consuming process that can take years and millions of dollars to complete. Therefore, recent technological and methodological advances have facilitated the development of computational methods, and it has been possible to quickly and easily discover new anticancer medications thanks to these developments. In developing and discovering new anti-cancer drugs, computational techniques such as computer-aided drug design, or CADD, have gained significance. Researchers can find compounds with the potential to be effective therapeutic candidates against a variety of diseases, by using computational methods (such as Absorption, Distribution, Metabolism, Elimination, Toxicity (ADMET), Molecular Docking, etc). Furthermore, They can examine methodologies to simulate and predict the interactions between potential drug molecules and biological targets [28].

In the present study, new **3a** and **3b** compounds were synthesized and characterized via 1H -NMR, FTIR, UV-Vis and Mass Spectrometer. The CUPRAC method was used to evaluate each molecule's *in vitro* antioxidant activity. The ADMET parameters were predicted using the SwissADME ProTox-II and ADMETlab 2.0 server. Furthermore, the interaction of the synthesized compounds and some selected proteins (PDB ID: 1N8Q for Lipoxygenase, 1OG5 for CYP2C9, 2CDU for NADPH oxidase, and 4JK4 for Bovine Serum Albumin) associated with antioxidant properties was investigated using an *in silico* method. At the end of the molecular docking investigations, the ligand-protein interaction's quantities and properties were determined.

2. Material and Method

2.1. General information

All of the chemicals used for synthesis and purification were acquired from the companies Aldrich, Merck, and Isolab. Thin Layer Chromatography (TLC: SIL G/UV254 from MN GmbH & Co.) was utilized to monitor reaction conversion, and UV light (254 nm) was employed to see the spot. The Stuart SMP 30 was used to test the melting point of the synthesized compound in an open glass capillary tube. An Agilent 400 MHz spectrometer and $DMSO-d_6$ as a solvent were used to record NMR spectra. Parts per million (ppm) of chemical changes are shown for residual protons ($DMSO-d_6$: δ 2.50). FTIR spectrum was recorded using the Shimadzu IRSpirit

QATR-S, ν_{\max} in cm^{-1} . A PG T80+ double beam spectrophotometer and a 1×10^{-4} M solution compound were utilized to record the UV-Vis spectrum. The Waters Radian Asap Direct Mass Detector was employed for mass analyses. The full scan acquisition mode, ASAP+/ASAP ionization mode, gas (N_2), mass

range of 100-1200 m/z , cone voltage of 10 V, isothermal heater temperature of 600 °C, corona current of 3 μA , and capillary dip sample technique were all incorporated in the analytical process.

2.2. Synthesis studies

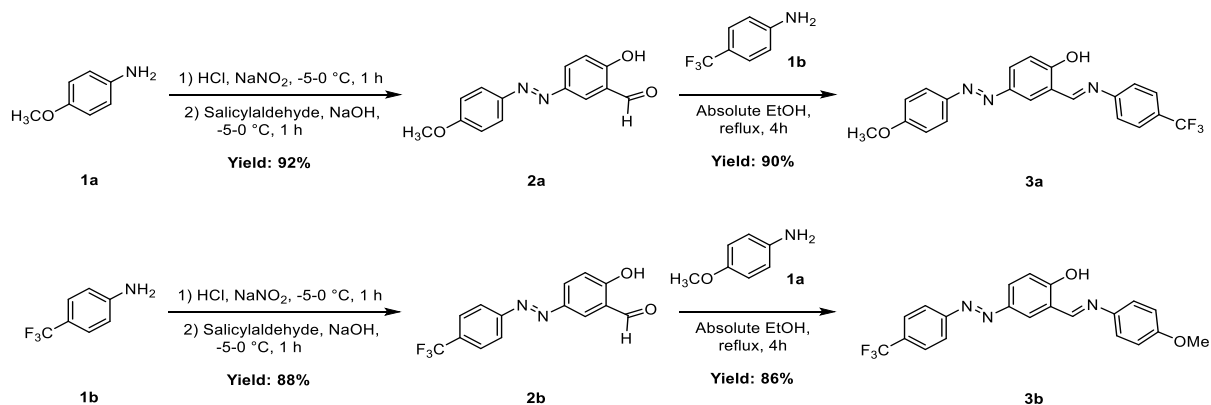


Figure 1. Synthesis Pathway for compounds 3a-b

Synthesis of 2-hydroxy-5-((4-(methoxyphenyl)diazenyl)benzaldehyde (2a) compound: Synthesis Pathway for 2a was shown in Figure 1. 4-methoxy aniline (10.0 mmol, 1.23 g) was dissolved in 2.1 mL of concentrated hydrochloric acid (25.0 mmol, 2.46 g) and 30 mL of distilled water in 50 mL beaker. After cooling the mixture to 0-(-5) °C using an ice-salt bath, NaNO_2 (10.0 mmol, 0.7 g) in 3 mL of distilled water was added dropwise while being continuously stirred. The diazonium salt formed after 1 h of stirring the mixture without allowing the temperature to increase above 0 °C. In another beaker, the coupling reagent, Salicylaldehyde (10.0 mmol, 1.22 g) was dissolved in NaOH (20.0 mmol, 0.8 g in 10 mL of distilled water) solution, and the mixture was cooled to 0 °C with an ice-salt bath. After preparing the coupling mixtures, the diazonium salt solution was added

dropwise and stirred for 1 h at 0-5 °C. The resulting dark yellow precipitated solution was poured into beaker containing 100 mL of ice water and stirred for 1 h. After 1 h, the mixture was extracted with EtOAc (2 x 250 mL). The combined organic phases were dried with Na_2SO_4 , filtered, and concentrated until approximately 20-25 mL of solvent remained by rotary evaporation in vacuo. The precipitated product was kept in the refrigerator (at 4 °C) for overnight. The crude product was filtered, dried, and crystallized with EtOAc/Hexane (1:5, v/v). As the compound is known in the literature [29], only melting point and mass analyses were done to confirm the structure. **Yield:** 2.35 g, 92%. **Color:** Brown solid. **Mp:** 123-125 °C. **MS = m/z :** $[\text{M}+\text{H}]^+$ Calcd for $\text{C}_{14}\text{H}_{13}\text{N}_2\text{O}_3$, 257.09; Found: 257.24 (Figure 2).

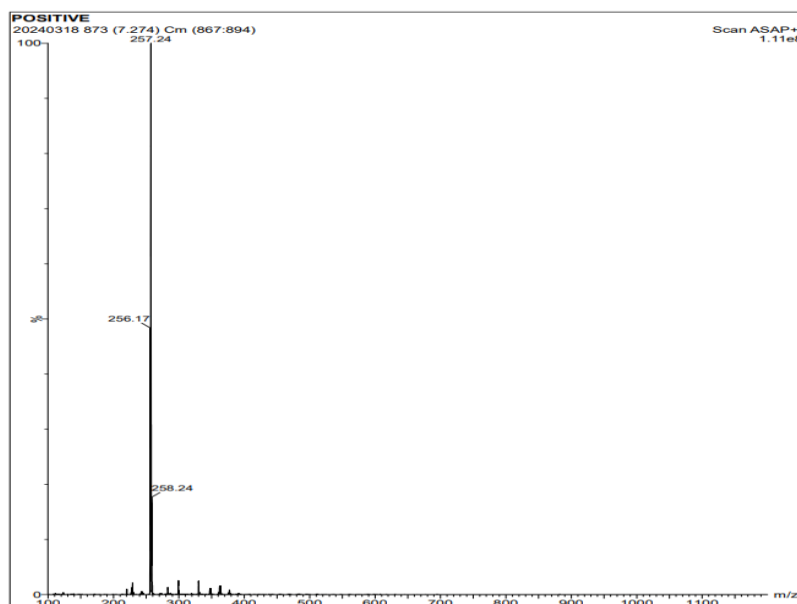


Figure 2. Mass spectrum of compound 2a

Synthesis of 2-hydroxy-5-((4-(trifluoromethyl)phenyl)diazenyl)benzaldehyde (**2b**) compound:

Synthesis Pathway for **2b** was shown in Figure 1. 4-trifluoromethylaniline (10.0 mmol, 1.61 g) was dissolved in 2.1 mL of concentrated hydrochloric acid (25.0 mmol, 2.46 g) and 30 mL of distilled water in 50 mL beaker. After cooling the mixture to 0-(-5) °C using an ice-salt bath, NaNO₂ (10.0 mmol, 0.7 g) in 3 mL of distilled water was added dropwise while being continuously stirred. The diazonium salt formed after 1 h of stirring the mixture without allowing the temperature to increase above 0 °C. In another beaker, the coupling reagent, Salicylaldehyde (10.0 mmol, 1.22 g) was dissolved in NaOH (20.0 mmol, 0.8 g in 10 mL of distilled water) solution, and the mixture was cooled to 0 °C with an ice-salt bath. After preparing the coupling mixtures, the

diazonium salt solution was added dropwise and stirred for 1 h at 0-5 °C. The resulting dark yellow precipitated solution was poured into beaker containing 100 mL of ice water and stirred for 1 h. After 1 h, the mixture was extracted with EtOAc (2 x 250 mL). The combined organic phases were dried with Na₂SO₄, filtered, and concentrated until approximately 20-25 mL of solvent remained by rotary evaporation in vacuo. The precipitated product was kept in the refrigerator (at 4 °C) for overnight. The crude product was filtered, dried, and crystallized with EtOAc/Hexane (1:5, v/v). As the compound is known in literature [30], only melting point and mass analyses were done to confirm the structure. **Yield:** 2.59 g, 88%. **Color:** Orange solid. **Mp:** 160–162 °C. **MS = m/z:** [M+H]⁺ Calcd for C₁₄H₁₀F₃N₂O₂, 295.07; Found: 295.18 (Figure 3).

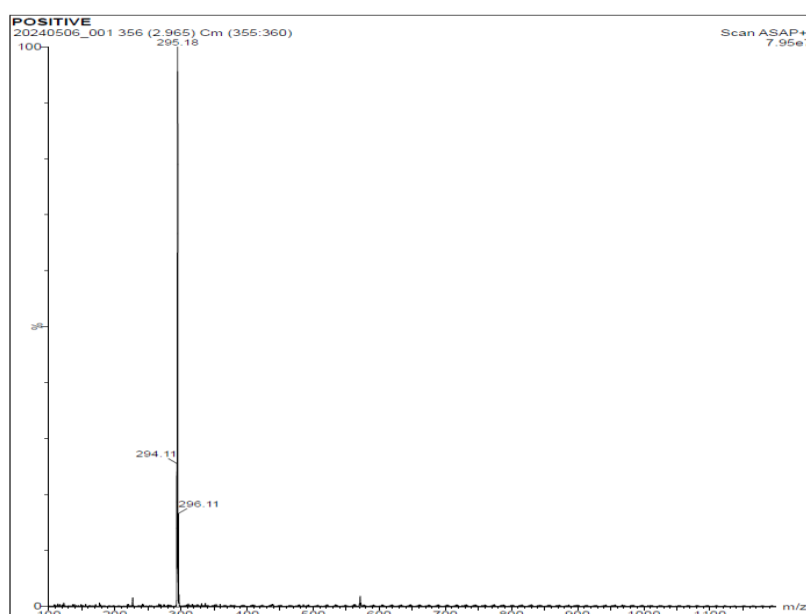
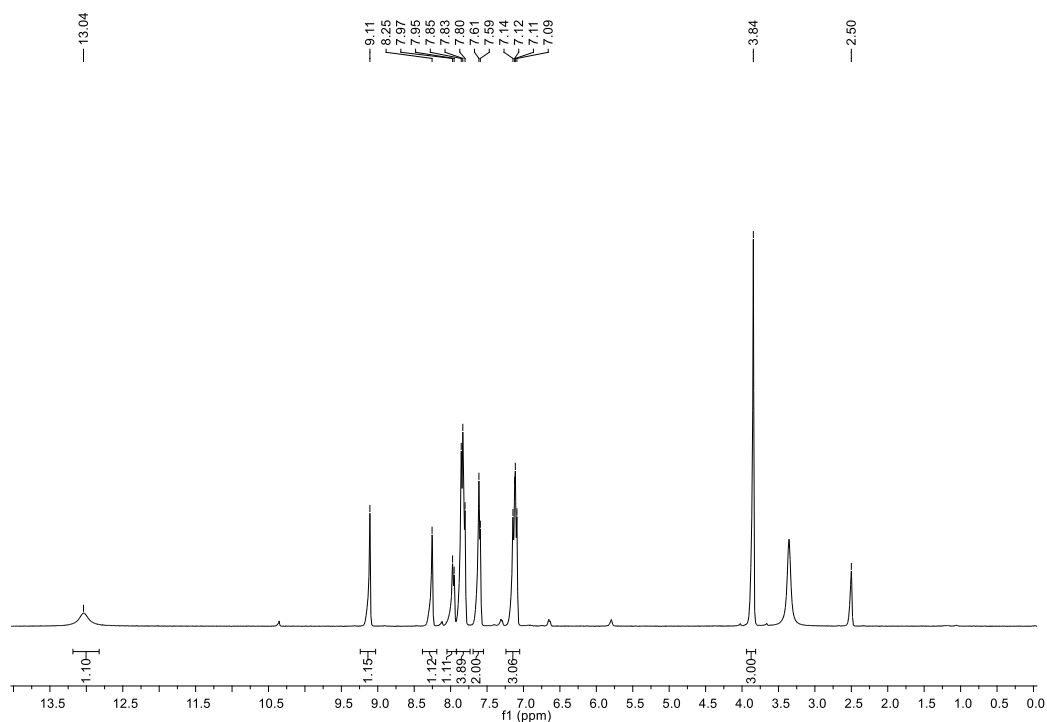
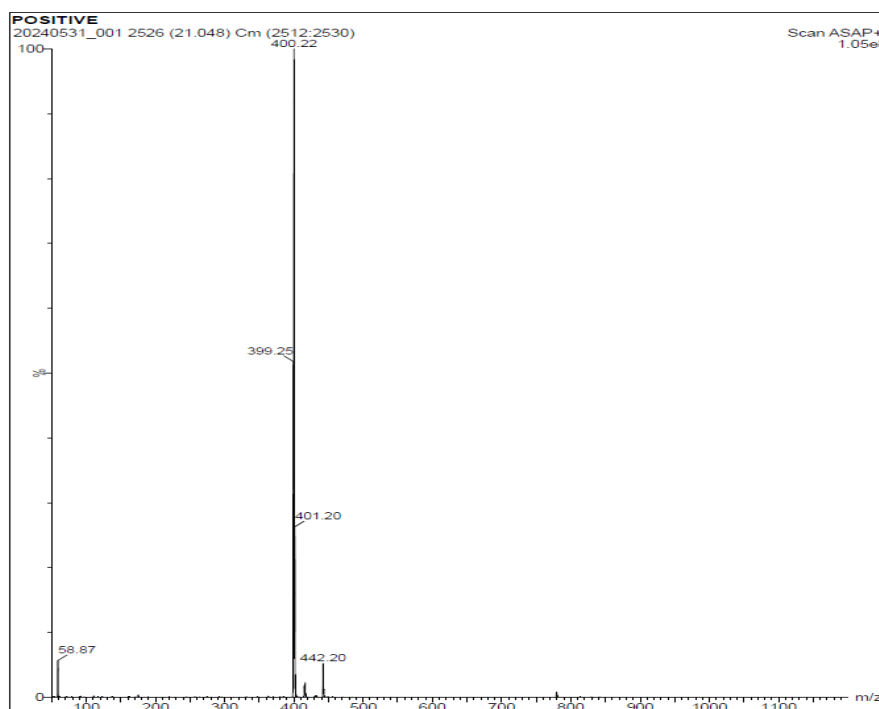


Figure 3. Mass spectrum of compound **2b**

Synthesis of 4-((4-methoxyphenyl)diazenyl)-2-(((4-(trifluoromethyl)phenyl)imino)methyl)

phenol (3a) compound: Synthesis Pathway for **3a** was shown in Figure 1. A two-necked flask that had been oven-dried and equipped with a reflux condenser and magnetic stirring bar was charged with 1.1 mmol of 4-(trifluoromethyl)aniline (**1b**) and 25 mL of absolute ethanol. After clear solution was obtained, the 1 mmol 4-methoxy azoaldehyde (**2a**) was added to the flask. With the help of an oil bath, the flask was heated up until the solvent reflux point (approximately 85 °C). The conversion was followed by TLC and after the conversion was completed, half of the solvent was

removed by rotary evaporation. After cooling the flask to room temperature, the precipitate was filtered and washed with n-hexane and cold ethanol. **Yield:** 90%. **Color:** Yellow solid. **Mp:** 195–197 °C. **FTIR (ATR):** $\tilde{\nu}_{\max}$ (cm⁻¹) = 2946 (br, w), 2914 (w), 2840 (w), 1600 (s), 1485 (m), 1324 (s), 1276 (s), 1126 (s). **¹H NMR (400 MHz, DMSO-*d*₆)** δ 13.04 (s, 1H), 9.11 (s, 1H), 8.25 (s, 1H), 7.96 (d, *J* = 8.4 Hz, 1H), 7.90 – 7.78 (m, 4H), 7.60 (d, *J* = 7.7 Hz, 2H), 7.12 (dd, *J* = 12.9, 9.0 Hz, 3H), 3.84 (s, 3H) (Figure 4). **MS = m/z:** [M+H]⁺ Calcd for C₂₁H₁₇F₃N₃O₂, 400.13; Found: 400.22 (Figure 5).

Figure 4. $^1\text{H-NMR}$ spectrometry of compound **3a**Figure 5. Mass spectrometry of compound **3a**

Synthesis of 2-(((4-methoxyphenyl)imino)methyl)-4-((4-(trifluoromethyl)phenyl)diazenyl)phenol (3b) compound: Synthesis Pathway for **3b** was shown in Figure 1. A two-necked flask that had been oven-dried and equipped with a reflux condenser and magnetic stirring bar was charged with 1.1 mmol of 4-methoxy aniline (**1a**) and 25 mL of absolute ethanol. After clear solution was obtained, the 1 mmol 4-trifluoro azoaldehyde (**2b**) was added to the flask. With the help of an oil bath, the flask was heated up until the solvent

reflux point (approximately 85 °C). The conversion was followed by TLC and after the conversion was completed, half of the solvent was removed by rotary evaporation. After cooling the flask to room temperature, the precipitate was filtered and washed with n-hexane and cold ethanol. **Yield:** 86%. **Color:** Yellow solid. **Mp:** 186-188 °C. **FTIR (ATR):** $\tilde{\nu}_{\text{max}}$ (cm^{-1}) = 3024 (br, w), 2974 (w), 1620 (s), 1571 (m), 1508 (s), 1404 (s), 1350 (s), 1165 (s). **$^1\text{H NMR}$ (400 MHz, $\text{DMSO-}d_6$)** δ 9.12 (s, 1H), 8.27 (d, $J = 1.7$ Hz, 1H), 7.95 (dd, $J = 28.7, 8.5$ Hz, 5H), 7.48 (d, $J = 8.7$ Hz, 2H), 7.12

(d, $J = 8.9$ Hz, 1H), 7.04 (d, $J = 8.7$ Hz, 2H), 3.80 (s, 3H)
 (Figure 6). **MS** = m/z : $[M+H]^+$ Calcd for $C_{21}H_{17}F_3N_3O_2$,
 400.13; Found: 400.22 (Figure 7).

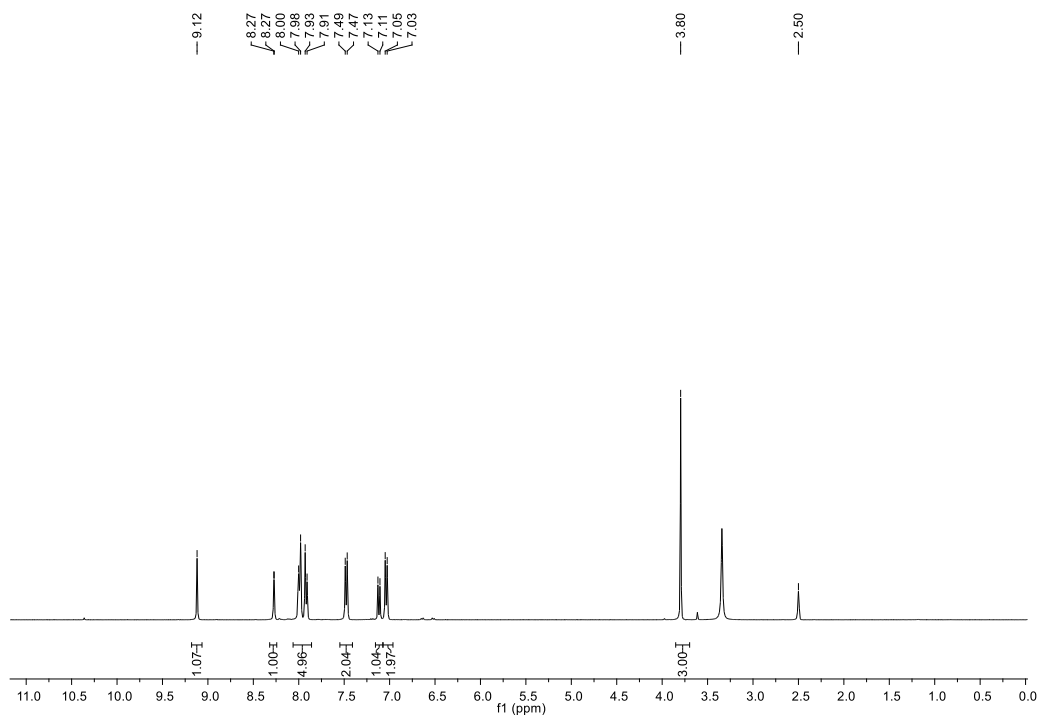


Figure 6. 1H -NMR spectrometry of compound **3b**

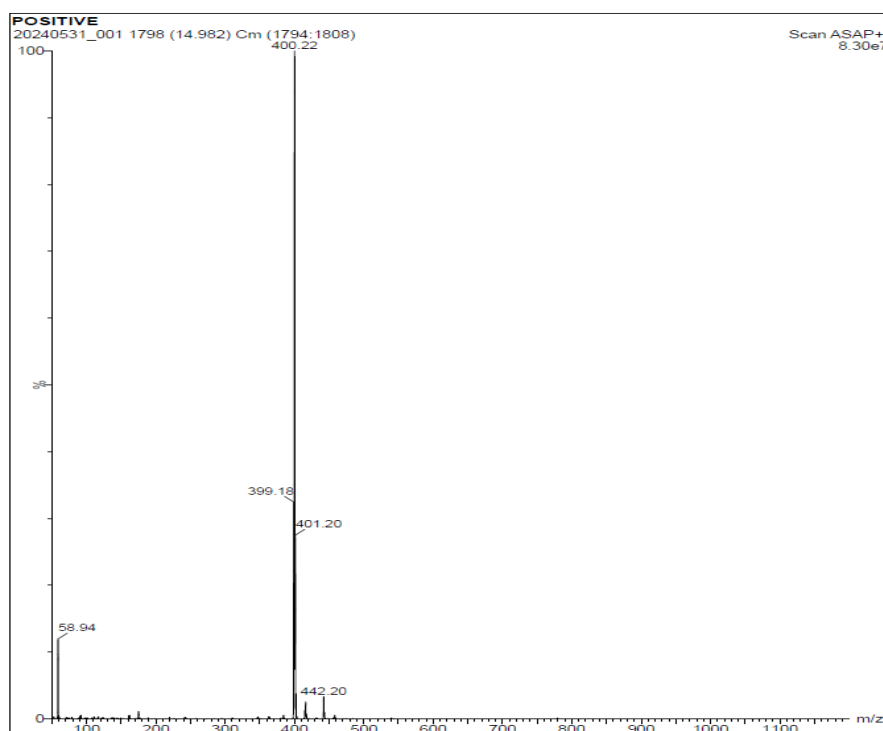


Figure 7. Mass spectrometry of compound **3b**

2.3. *In vitro* antioxidant activity studies

The antioxidant activities of synthesized compounds in absolute ethanol (**3a-b**) were determined using the CUPRAC method specified in literature. [31].

2.4. Computational studies

2.4.1. ADMET properties

The ADME properties of **3a-b** compounds were calculated using the SwissADME web server [32].

Toxicity properties of **3a-b** compounds were determined via the Protox-II web server [33].

2.4.2. Geometry optimization

The structure of compounds **3a-b** was drawn in ChemBioDraw Ultra 14.0, Then the structures were transferred to ChemBio3D Ultra 14.0. The structures were saved as .mol2 files extension. .mol2 files were opened using Avogadro software [34]. The Structures were optimized using UFP parameters and optimized structures were saved as .mol2 file.

2.4.3. Molecular docking studies

The AutodockVina 1.1.2 [35] program was used for molecular docking investigations. All imaging processes were carried out using UCSF Chimera 1.17.3 for 3D [36] and BIOVIA Discovery Studio Visualizer for 2D [37]. For the molecular docking investigations, target proteins listed by PDB ID in Table 1 were utilized, and selected proteins (1N8Q, 1OG5, 2CDU, and 4JK4) were obtained as .pdb files from PDB Bank [38]. Using the UCSF Chimera 1.17.3 program, all heteroatoms, waters, and non-standard residues were eliminated from the protein. The proteins were prepared using UCSF Chimera 1.17.3 Dock Prep module. The 3D binding coordinates (*x,y,z*) of selected proteins were used as received in literature [39,40] and Molecular docking studies were conducted with proteins encircled by a grid box (40 x 40 x 40 Å³).

Table 1. Selected proteins with PDB ID and binding coordinates for Molecular Docking studies

Proteins and PDB IDs		Coordinates and Values		
Protein	PDB ID	X	Y	Z
Lipoxygenase	1N8Q	22.45	1.29	20.36
CYP2C9	1OG5	-19.82	86.68	38.27
NADPH Oxidase	2CDU	18.99	-5.77	-1.80
Bovine Serum Albumin (BSA)	4JK4	95.87	16.04	13.49

3. Results

3.1. UV-Vis absorbance measurements

UV absorbance measurements were performed using a 1×10^{-4} M solution of the synthesized compound in DMSO between 200 and 900 nm to identify the maximum wavelengths of compounds **3a-b**. Table 2 provides the maximum wavelengths of compounds **3a-b**, and Figure 8 shows the UV-Vis spectra.

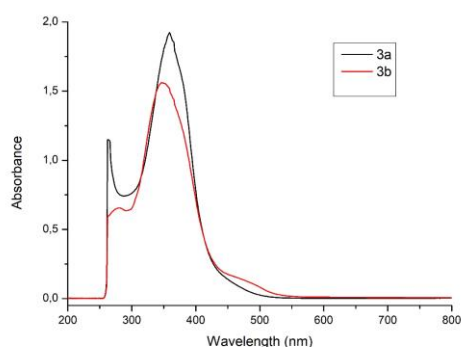


Figure 8. UV-Vis spectras of compound **3a-b**

The maximum absorbance values of the synthesized compounds were significant because absorbance measurements of antioxidant activity investigations were carried out at 450 nm. There was no maximum found at 450 nm when the maximum absorbance values were assessed. When the maximum wavelengths of the synthesized compounds were examined, it was observed that both of them had two maximum wavelengths. The first maximum wavelengths of the compounds were determined as

263 nm for **3a**, 281 nm for **3b**, and the second maximum wavelengths were determined as 359 nm and 346 nm, respectively.

Table 2. The maximum wavelengths of compounds **3a-b**

Compound	Maximum Wavelengths
3a	359, 263
3b	346, 281

3.2. In vitro antioxidant activity studies

The CUPRAC technique has been extensively studied in the literature for determining the antioxidant properties of synthesized compounds. TEAC (Trolox Equivalents antioxidant Capacity) value has important to do meaningful comparison of synthesized compounds against the trolox standard. 1.0×10^{-3} M stock solution containing all synthesized compounds (**3a-b**) was prepared in absolute ethanol. Five distinct solutions containing different concentrations of synthesized compounds were prepared using 1×10^{-3} M, and the CUPRAC method was used to investigate their antioxidant properties. To create calibration curves, the investigations were conducted three times, and mean data were obtained. Table 3 displayed the TEAC values of synthesized compounds and trolox.

Table 3. TEAC values of compounds (**3a-b**) and Trolox at 450 nm

	Compound 3a	Compound 3b	Trolox
TEAC	1.09	1.13	1.0

Antioxidant activity and TEAC levels are directly correlated. When the TEAC values of the synthesized

compounds (**3a-b**) are examined (Table 3), it can be said that they are higher than Trolox (TEAC > 1) and therefore have higher antioxidant activity than Trolox.

3.3. Computational studies

3.3.1. ADMET properties

A crucial initial phase in the development of any pharmaceutical compound is determining the ADMET parameters of a new drug candidate. Most candidate compounds are eliminated for a variety of reasons, including their incorrect pharmacokinetics and drug-likeness [41]. ADMET properties of compounds (**3a-b**) were demonstrated in Table 4.

According to Lipinski's rules, the drug candidate should have a molecular weight of between 150 and 500 g/mol, an MLOGP value of less than 4.15, fewer than 10 hydrogen bond acceptor atoms, and fewer than 5 hydrogen bond donor atoms. When the physicochemical parameters of the synthesized molecules **3a** and **3b** were assessed, it was found that their molecular weights were 399.37 g/mol. Compounds **3a** and **3b** were accepted by Lipinski after being examined for molecular weight and all other criteria. Compounds' ability to penetrate cell membranes is determined by their TPSA value, which is also important and should be less than 140 Å²[42]. The TPSA values of compounds **3a** and **3b** were calculated 66.54 Å².

The term "lipophilicity" describes a lipid's ability to dissolve in water. Drug molecules must pass through a number of biological barriers, including as the skin, the gut, and the blood-brain barrier, in order to reach their target locations. Therefore, a molecule must break down at specific rates in both oil and water. When Table 4 was examined, the lipophilicity (CLogP_{o/w}) number of compounds **3a** and **3b** were calculated 5.43 and 5.37, respectively.

BOILED-Egg graphs were used to calculate the ADME parameters, the blood-brain barrier, and gastrointestinal absorption (GI). In this diagram, the yellow area denotes possible BBB permeability locations, whereas the white area shows possible GI absorption sites. P-gp is shown as an active substrate by blue spots (PGP+) and as an inactive substrate by red dots (PGP-)[32]. When Figure 9 was examined, the presence of compounds **3a** and **3b** in the outer gray zone indicated that they had limited brain permeability and low absorption.

Compounds **3a** and **3b** were found to have toxicity properties that could be determined using the widely used Protox-II web server. Upon analyzing Table 4, The LD50 (Lethal Dose) value of each compound was determined to be 1500 mg/kg. Protox-II web server was also used to evaluate the toxicity class of compounds. When the toxicity level was compared from 1st (the worst) to 6th (the best), compounds **3a** and **3b** were found to be in the fourth class.

Table 4. ADME and Toxicity Properties of compounds **3a-b**

Compounds		3a	3b
Lipinski's Rule of Five	Molecular Weight (g/mol) ≤ 500	399.37	399.37
	MLogP ≤ 4.15	3.89	3.62
	Hydrogen Bond Acceptor ≤ 10	8	8
	Hydrogen Bond Donor ≤ 5	1	1
	Lipinski	Yes	Yes
Physicochemical Properties	TPSA (Å ²)	66.54	66.54
Lipophilicity Properties	Consensus Log P _{o/w}	5.43	5.37
	WLogP	7.74	7.74
Pharmacokinetic Properties	GI	Low	Low
Toxicity Properties	LD50 (mg/kg)	1500	1500
	Toxicity Class	4	4

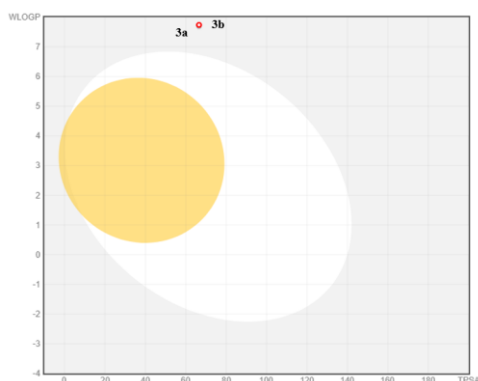


Figure 9. Boiled-Egg diagram of compounds **3a-b**

3.3.2. Molecular docking studies

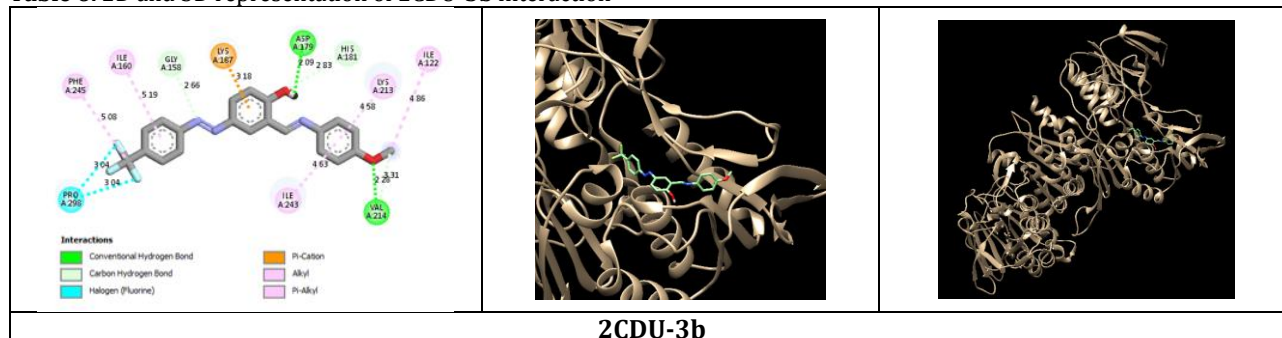
Molecular docking, an effective method based on receptor-ligand interactions, involves docking small molecules into the receptor's binding site to estimate the complex's binding affinity [43]. AutodockVina 1.1.2 was used to conduct molecular docking investigations of all synthesized compounds. For molecular docking studies of compounds and standard antioxidant Trolox were performed on proteins associated with antioxidants that had encoded by PDB IDs of 1N8Q, 10G5, 2CDU, and 4JK4. All synthesized molecule was

individually docked to distinct protein coordinates, encircling the active region of the protein with a 40 x 40 x 40 Å³ grid box. The Docking scores of compounds (**3a-b**), which ranged from -8.3 kcal/mol to -9.4 kcal/mol, were depicted in Table 5. The protein-ligand complex pairing 1N8Q-**3b**, 10G5-**3a**, 2CDU-**3b**, and 4JK4-**3b** had the highest docking scores. The 2CDU-**3b** complex has the best docking scores (ΔG : -9.4 kcal/mol) than Trolox and among all ligand complexes. It was observed that these data were compatible with in vitro antioxidant results. Table 6 analysis shows that hydrogen bonds, carbon-hydrogen bonds, halogen, π -cation, alkyl, and π -alkyl bonds are the interactions between 2CDU and **3b** complexes. There are two hydrogen bonds between 2CDU and **3b** complex. These bonds have a length of 2.09 Å between ASP179 aminoacid and phenolic -OH group, 2.28 Å between WAL214 aminoacid and methoxy oxygen group.

Table 5. Docking scores of compounds **3a-b** and Trolox

PDB ID	Compounds		Standard
	3a	3b	Trolox
1N8Q	-8.3	-8.5	-6.9
10G5	-8.6	-8.5	-7.2
2CDU	-9.2	-9.4	-7.2
4JK4	-8.5	-8.8	-6.7

Table 6. 2D and 3D representation of 2CDU-**3b** interaction



Discussion and Conclusion

In this study, Novel Trifluoromethyl Containing Azo-Imin compounds (**3a-b**) were synthesized (*Yield*: 90-86 %) and were characterized by using The ¹H-NMR, FT-IR, UV-vis, and Mass analysis techniques to confirm the structures of compounds. SwissADME and Protox-II web services were utilized to calculate the toxicity and ADME parameters of the compounds, respectively. According to ADME and toxicity (ADMET) results, the drug-similarity, pharmacokinetic, physico-chemical, and toxicity data were all within acceptable level for a potential bioactive agent. To investigate the potential antioxidant properties of the synthesized compounds **3a** and **3b**, molecular docking studies were carried out using four distinct antioxidant proteins, such as PDB ID: 1N8Q for lipoxygenase, 10G5 for CYP2C9, 2CDU for NADPH oxidase, and 4JK4 for bovine serum albumin. All of the docking results from molecular docking were higher than trolox. The interaction between the 2CDU protein and the **3b**

ligand had the best docking score (-9.4 kcal/mol). The antioxidant properties of the compound **3a** and **3b** were also examined using the CUPRAC in vitro antioxidant activity method. When the TEAC values of the compounds were examined, the TEAC value was above the trolox values and this was compatible with the molecular docking scores. Based on all of the data obtained, it was determined that compound **3b** can potential antioxidant agent.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Sies, T. 2020. Oxidative Stress: Concept and Some Practical Aspects. *Antioxidants*, 9, 852.
- [2] Preiser, J. 2012. Oxidative Stress. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, 36, 147–154.
- [3] Matés, J. M., Segura, J. A., Alonso, F. J., Márquez, J. 2012. Oxidative stress in apoptosis and cancer: an update. *Archives of Toxicology*, 86, 1649–1665.
- [4] Houldsworth, A. 2023. Role of oxidative stress in neurodegenerative disorders: a review of reactive oxygen species and prevention by antioxidants. *Brain Communications*, 6.
- [5] Zhang, Y., Seeram, N. P., Lee, R., Feng, L., Heber, D. 2008. Isolation and Identification of Strawberry Phenolics with Antioxidant and Human Cancer Cell Antiproliferative Properties, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 670–675.
- [6] Kaur, S., Das, M. 2011. Functional foods: An overview. *Food Science and Biotechnology*, 20, 861–875.
- [7] Alarcón-Flores, M. I., Romero-González, R., Vidal, J. L. M., Frenich, A. G. 2013. Multiclass determination of phytochemicals in vegetables and fruits by ultra-high-performance liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry. *Food Chemistry*, 141, 1120–1129.
- [8] Pallauf, K., Bendall, J. K., Scheiermann, C., Watschinger, K., Hoffmann, J., Roeder, T., Rimbach, G. 2013. Vitamin C and lifespan in model organisms. *Food and Chemical Toxicology*, 58, 255–263.
- [9] Abula, A., Xu, Z., Zhu, Z., Peng, C., Chen, Z., Zhu, W., Aisa, H. A. 2020. Substitution Effect of the Trifluoromethyl Group on the Bioactivity in Medicinal Chemistry: Statistical Analysis and Energy Calculations. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 60, 6242–6250.
- [10] Sap, J. B. I., Straathof, N. J. W., Knauber, T., Meyer, C.F., Médebielle, M., Buglioni, L., Genicot, C., Trabanco, A. A., Noël, T., am Ende, C. W., Gouverneur, V. 2020. Organophotoredox Hydrodefluorination of Trifluoromethylarenes with Translational Applicability to Drug Discovery. *Journal of the American Chemical Society*, 142, 9181–9187.
- [11] Swallow, S. 2015. Fluorine in Medicinal Chemistry. pp. 65–133. Lawton, G., Witty, D. R., ed. *Progress in Medicinal Chemistry*, Elsevier B.V.
- [12] Dilek, Ö., Dede, B., Karabacak Atay, Ç., Tilki, T. 2024. Promising agent for the efficient extraction of Co(II) ions from aqueous medium and its metal complexes: Synthesis, theoretical calculations and solvent extraction. *Polyhedron*, 250, 116843.
- [13] Wei, L., Tan, W., Wang, G., Li, Q., Dong, F., Guo, Z. 2019. The antioxidant and antifungal activity of chitosan derivatives bearing Schiff bases and quaternary ammonium salts. *Carbohydrate Polymers*, 226, 115256.
- [14] Haj Mohammad Ebrahim Tehrani, K., Hashemi, M., Hassan, M., Kobarfard, F., Mohebbi, S. 2016. Synthesis and antibacterial activity of Schiff bases of 5-substituted isatins. *Chinese Chemical Letters*, 27, 221–225.
- [15] Bekhit, A. A., Saudi, M. N., Hassan, A. M. M., Fahmy, S. M., Ibrahim, T. M., Ghareeb, D., El-Seidy, A. M., Nasralla, S. N., Bekhit, A.E.-D.A. 2019. Synthesis, in silico experiments and biological evaluation of 1,3,4-trisubstituted pyrazole derivatives as antimalarial agents. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 163, 353–366.
- [16] Iacopetta, D., Ceramella, J., Catalano, A., Saturnino, C., Bonomo, M. G., Franchini, C., Sinicropi, M. S. 2021. Schiff Bases: Interesting Scaffolds with Promising Antitumoral Properties. *Applied Sciences*, 11, 1877.
- [17] Dilek, Ö. 2024. Imidazole Based Novel Schiff Base: Synthesis, Characterization, Quantum Chemical Calculations, In Silico Investigation of ADMET Properties and Molecular Docking Simulations against VEGFR2 Protein. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13, 62–78.
- [18] Kitouni, S., Chafai, N., Chafaa, S., Houas, N., Ghedjati, S., Djenane, M. 2023. Antioxidant activity of new synthesized imine and its corresponding α -aminophosphonic acid: Experimental and theoretical evaluation. *Journal of Molecular Structure*, 1281, 135083.
- [19] Huang, D. D., Pozhidaev, E. P., Chigrinov, V. G., Cheung, H. L., Ho, Y. L., Kwok, H. S. 2004. Photo-aligned ferroelectric liquid crystal displays based on azo-dye layers. *Displays*, 25, 21–29.
- [20] Borbone, F., Carella, A., Ricciotti, L., Tuzi, A., Roviello, A., Barsella, A. 2011. High nonlinear optical response in 4-chlorothiazole-based azo dyes. *Dyes and Pigments*, 88, 290–295.
- [21] El-Sonbati, A. Z., Diab, M. A., El-Bindary, A. A., Shoaib, A. F., Hussein, M. A., El-Boz, R. A. 2017. Spectroscopic, thermal, catalytic and biological studies of Cu(II) azo dye complexes. *Journal of Molecular Structure*, 1141, 186–203.
- [22] Mitra, A., Mawson, A. 2017. Neglected Tropical Diseases: Epidemiology and Global Burden.

- Tropical Medicine and Infectious Disease, 2, 36.
- [23] Karabacak Atay, Ç., Dilek, Ö., Tilki, T., Dede, B. 2023. A novel imidazole-based azo molecule: synthesis, characterization, quantum chemical calculations, molecular docking, molecular dynamics simulations and ADMET properties. *Journal of Molecular Modeling*, 29, 226.
- [24] Saeed, A. M., AlNeyadi, S. S., Abdou, I. M. 2020. Anticancer activity of novel Schiff bases and azo dyes derived from 3-amino-4-hydroxy-2H-pyrano[3,2-c]quinoline-2,5(6H)-dione. *Heterocyclic Communications*, 26, 192–205.
- [25] Chhetri, A., Chettri, S., Rai, P., Mishra, D. K., Sinha, B., Brahman, D. 2021. Synthesis, characterization and computational study on potential inhibitory action of novel azo imidazole derivatives against COVID-19 main protease (Mpro: 6LU7). *Journal of Molecular Structure*, 1225.
- [26] Kasare, M. S., Dhavan, P. P., Shaikh, A. H. I., Jadhav, B. L., Pawar, S.D. 2022. Novel Schiff base scaffolds derived from 4-aminoantipyrine and 2-hydroxy-3-methoxy-5-(phenyldiazenyl) benzaldehyde: Synthesis, antibacterial, antioxidant and anti-inflammatory. *Journal of Molecular Recognition*, 35.
- [27] Maliyappa, M. R., Keshavayya, J., Sudhanva, M.S., Pushpavathi, I., Kumar, V. 2022. Heterocyclic azo dyes derived from 2-(6-chloro-1,3-benzothiazol-2-yl)-5-methyl-2,4-dihydro-3H-pyrazol-3-one having benzothiazole skeleton: Synthesis, structural, computational and biological studies. *Journal of Molecular Structure*, 1247, 131321.
- [28] Niu, Y., Lin, P. 2023. Advances of computer-aided drug design (CADD) in the development of anti-Azheimer's-disease drugs. *Drug Discovery Today*, 28, 103665.
- [29] Khanmohammadi, H., Khodam, F. 2013. Solvatochromic and electrochemical properties of new thermally stable azo-azomethine dyes with N₂S₂O₂ donor set of atoms. *Journal of Molecular Liquids*, 177, 198–203.
- [30] Sun, Y. F., Xu, S. H., Wu, R. T., Wang, Z. Y., Zheng, Z. B., Li, J. K., Cui, Y. P. 2010. The synthesis, structure and photoluminescence of coumarin-based chromophores. *Dyes and Pigments*, 87(2), 109-118.
- [31] Apak, R., Güçlü, K., Özyürek, M., Çelik, S.E. 2008. Mechanism of antioxidant capacity assays and the CUPRAC (cupric ion reducing antioxidant capacity) assay. *Microchimica Acta*, 160, 413–419.
- [32] Daina, A., Michielin, O., Zoete, V. 2017. SwissADME: a free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules. *Scientific Reports*, 7, 42717.
- [33] Banerjee, P., Eckert, A. O., Schrey, A. K., Preissner, R. 2018. ProTox-II: a webserver for the prediction of toxicity of chemicals. *Nucleic Acids Research*, 46, 257–263.
- [34] Hanwell, M. D., Curtis, D. E., Lonie, D. C., Vandermeersch, T., Zurek, E., Hutchison, G. R. 2012. Avogadro: an advanced semantic chemical editor, visualization, and analysis platform. *Journal of Cheminformatics*, 4, 17.
- [35] Trott, O., Olson, A. J. 2010. AutoDock Vina: Improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *Journal of Computational Chemistry*, 31, 455–461.
- [36] Pettersen, E. F., Goddard, T. D., Huang, C. C., Couch, G. S., Greenblatt, D. M., Meng, E. C., Ferrin, T. E. 2004. UCSF Chimera-A visualization system for exploratory research and analysis. *Journal of Computational Chemistry*, 25, 1605–1612.
- [37] BIOVIA (2021). Discovery Studio Visualizer, version 21.1.0.20298. Dassault Systèmes, San Diego, CA.
- [38] Berman, H. M. 2000. The Protein Data Bank. *Nucleic Acids Research*, 28, 235–242.
- [39] Kandsi, F., Elbouzidi, A., Lafdil, F. Z., Meskali, N., Azghar, A., Addi, M., Hano, C., Maleb, A., Gseyra, N. 2022. Antibacterial and Antioxidant Activity of Dysphania ambrosioides (L.) Mosyakin and Clemants Essential Oils: Experimental and Computational Approaches. *Antibiotics*, 11, 482.
- [40] Bouzammit, R., Lakkab, I., El fadili, M., Kanzouai, Y., Chalkha, M., Nakkabi, A., El Bali, B., Obbade, S., Jouffret, L., Lachkar, M., Al Houari, G. 2024. Synthesis, crystal structure, antioxidant activity and molecular docking studies of 2-(1-(3-methyl-1-oxo-1,2,3,4-tetrahydronaphthalen-2-yl)ethyl)malononitrile. *Journal of Molecular Structure*, 1312, 138582.
- [41] Ulutürk, M., Karabacak Atay, Ç., Dede, B., Tilki, T. 2023. Potentially Bioactive Novel Isophthalic Acid Based Azo Molecules: Synthesis, Characterization, Quantum Chemical Calculations, ADMET Properties, Molecular Docking and Molecular Dynamics Simulations. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 1–22.
- [42] Veber, D. F., Johnson, S. R., Cheng, H. Y., Smith, B. R., Ward, K. W., Kopple, K. D. 2002. Molecular Properties That Influence the Oral

Bioavailability of Drug Candidates. *Journal of Medicinal Chemistry*, 45, 2615–2623.

- [43] Lakhera, S., Devlal, K., Ghosh, A., Rana, M. 2021. In silico investigation of phytoconstituents of medicinal herb 'Piper Longum' against SARS-CoV-2 by molecular docking and molecular dynamics analysis. *Results in Chemistry*, 3, 100199.

Schiff Bazlı İndazol Bileşiğinin Yapı Karakterizasyonu ve Kuramsal Hesaplamalarla İncelenmesi

Enis GÜZEL^{*1}, Aliye GEDİZ ERTÜRK², Metin YAVUZ³

^{1,3}Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 55139, Samsun, Türkiye

²Ordu Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 52200, Ordu, Türkiye

(Alınış / Received: 28.07.2024, Kabul / Accepted: 29.09.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Yapı Karakterizasyonu,
Hirshfeld Analizi,
¹³C-NMR ve ¹H-NMR,
IR/ UV-Vis,
İndazol Schiff Baz,
DNA-ECT.

Öz:

(E)-4-Metoksi-2-(((4-metoksi-1H-indazol-3-il)imino)metil)fenol (C₁₆H₁₅N₃O₃) bileşiği IR, UV-Vis, ¹³C-NMR / ¹H-NMR ve X-ışını kırınımı yöntemleri kullanılarak yapısal karakterizasyonu yapıldı ve bileşik yapısının enol-imin formunda şekillendiği belirlendi. Moleküler yapının 3-boyutlu yüzey özelliklerini görselleştirmek için Hirshfeld yüzey analizi kullanıldı. Moleküler yapının kuramsal özelliklerinin belirlenmesinde Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi'nin 6-311G(d,p) baz setinden yararlanıldı. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin UV-Vis spektrumları DMSO içinde 5x10⁻⁵ M konsantrasyonda hazırlandı. ¹³C-NMR ve ¹H-NMR karakterizasyon analizleri deneysel ve kuramsal olarak karşılaştırmalı olarak verildi. Kuramsal hesaplamalar yardımıyla moleküler yapının elektrofilik doğası, nükleofilik doğası, kimyasal aktiviteleri hakkında ayrıntılı çalışmalar yapıldı. Bu çalışmalar sonucunda frontier moleküler orbitaller, sertlik, yumaşaklık, mulliken popülasyon analiz yükleri, MEP ve kontür yüzeyleri hakkında bilgilere ulaştık. Ek olarak, DNA temel yapı taşları olan adenin, sitozin, guanin ve timin bazları ile moleküler yapıyı kuramsal olarak birleştirdik ve hesaplamalar yaptık. Bu hesaplamalar sonucunda moleküler yapının yük transferini ve elektrofilik ve nükleofilik doğasını araştırmak için ECT (elektrofilik tabanlı yük transferi) yöntemi ve DN (yük transferi) kullanıldı.

Structure Characterization of Schiff-Based Indazole Compound and Investigation with Theoretical Calculations

Keywords

Structure Characterization,
Hirshfeld Analysis,
¹³C-NMR ve ¹H-NMR,
IR/ UV-Vis,
Indazole Schiff Base,
DNA-ECT.

Abstract:

(E)-4-Methoxy-2-(((4-methoxy-1H-indazol-3-yl)imino)methyl)phenol (C₁₆H₁₅N₃O₃) compound was structurally characterized using IR, UV-Vis, ¹³C-NMR / ¹H-NMR and X-ray diffraction methods and it was determined that the compound structure was in the enol-imine form. Hirshfeld surface analysis was used to visualize the 3-dimensional surface properties of the molecular structure. The 6-311G(d,p) basis set of Density Functional Theory was used to determine the theoretical properties of the molecular structure. The UV-Vis spectra of the C₁₆H₁₅N₃O₃ compound were prepared in DMSO at a concentration of 5x10⁻⁵ M. ¹³C-NMR and ¹H-NMR characterization analyses were given comparatively experimentally and theoretically. Detailed studies were made on the electrophilic nature, nucleophilic nature and chemical activities of the molecular structure with the help of theoretical calculations. As a result of these studies, we reached information on frontier molecular orbitals, hardness, softness, mulliken population analysis charges, MEP and contour surfaces. In addition, we combined our molecular structure theoretically with the basic building blocks of DNA, adenine, cytosine, guanine and thymine bases and made calculations. As a result of these calculations, ECT (electrophilic based charge transfer) method and DN (charge transfer) were used to investigate the charge transfer and electrophilic and nucleophilic nature of the molecular structure.

*İlgili yazar: enisguzel2@gmail.com

1. Giriş

Hugo Schiff'in bir aldehit ve bir aminin reaksiyonu sonucunda 1864 yılında ilk defa Schiff bazını sentezlemiştir [1]. Genel formülleri $R_2C=NR$ şeklinde olan Schiff bazları iminler, indazollar, azometinler, ketiminler ya da anilinler gibi isimlendirmelere sahiptir. Schiff bazları ağırlıklı olarak üretildikleri başlangıç maddesinin sonuna imin, adlimin ya da ketimin ekleri olarak isimlendirilirler [2]. Schiff bazları 3 farklı formda meydana gelebilirler. Bu yapılar enol-imin formu, keto-amin formu ve zwitteriyonik form olarak isimlendirilmektedir. Enol-imin formundaki Schiff bazlı bileşiklerde H atomunun O atomuna bağlı olduğu gözlenmektedir. Keto-amin formundaki Schiff bazlarında H atomu N atomuna bağlı olduğu gözlenmektedir. Zwitteriyonik formdaki Schiff bazlı bileşiklerde H atomu O ve N atomları arasında ortaklaşa kullanıldığı durumda gözlenmektedir [3].

İndazol, $C_7H_6N_2$ moleküler formülüne sahip azot içeren bisiklik bir bileşiktir ve ilk olarak 1889'da Emil Fischer tarafından sentezlenmiştir [4]. Bir pirazol halkası ile kaynaşmış bir benzen halkasına sahip kaynaşmış bir halka yapısıdır. Ayrıca izoindazol ve benzopirazol olarak da adlandırılır [5-6]. İndazoller doğada nadir olarak bulunur. Bugüne kadar nigellisin, nigelanin ve nigellidin gibi sadece birkaç alkaloidte indazol halkalarına rastlanmıştır [7]. Etkili hidrojen bağı yoluyla enzimin aktif bölgesi ile etkileşime girme kabiliyetine sahip iki ardışık azot atomuna sahip olması nedeniyle, indazol çekirdeği, ilaç keşfi için önemli bir motiftir [8]. İndazol çekirdeği, anti-inflamatuar [9], antidiyabetik [10], antikanser [11], antispermatogenez [12], HIV proteaz inhibitörü [13], antibakteriyel [14], antikonvulsan [15], antioksidan [16] ve NO inhibe edici aktiviteler gibi çok çeşitli biyolojik aktiviteler sergiler [17]. Son zamanlarda, indazol bazlı α -glukosidaz ve α -amilaz inhibitörleri de bildirilmiştir [18].

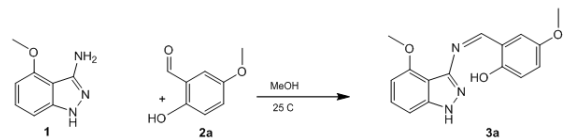
Bu araştırma çalışmasında Schiff bazlı indazol bileşik yapısının kararlılığının deneysel ve teorik yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda kuramsal hesaplamalar ile titreşim frekansları, elektrostatik potansiyeller ve doğrusal olmayan optik özellikler gibi farklı moleküler özellikler hesaplamalı yöntemlerle tahmin edilebilir [19-21]. Kuramsal hesaplamalar için yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) yöntemi, yapısal özelliklerin, moleküllerin enerjilerinin ve titreşim frekanslarının ab initio topluluğu tarafından hesaplanması ve bir dizi moleküler özelliğin değerlendirilmesi açısından doğruluk için popüler bir HF sonrası yaklaşım olarak kabul edilmiştir [22]. Bu araştırma makalesinde, $C_{16}H_{15}N_3O_3$ kapalı formülüne sahip (E)-4-Metoksi-2-(((4-metoksi-1H-indazol-3-il)imino)metil)fenol bileşiği sentezledi. Yapısal özelliklerin anlaşılması için X-ışını kırınımı, UV-Vis, IR, 1H -NMR ve ^{13}C -NMR yöntemleri ile karakterize

edildi. Moleküller arası temasların doğasını ortaya koyan Hirshfeld yüzey analizi gerçekleştirildi, parmak izi çizimleri ve moleküler yüzey konturları (d_{norm} , d_i ve d_e) yüzdelik katkı hakkında bilgi sağladı ve başlık bileşiği için bağ etkileşimlerinin majör ve minör katkılarını ortaya koyuldu. Bu çalışma, DFT/B3LYP/6-311G(d,p) kullanılarak hesaplanan yapısal ve kimyasal özellikler, spektroskopik ayrıntılar, yerel (moleküler elektrostatik potansiyel (MEP), net yükler) ve küresel (sertlik ve yumuşaklık parametreleri) kimyasal aktivite tanımlayıcılarını içermektedir. Bileşik yapısının elektronik geçişlerinin ve yapısal özelliklerin belirlenmesi için UV-Vis spektral analizini gerçekleştirildi. Bu makalede, deneysel yollarla elde edilemeyen $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin yapısal ve kimyasal özelliklerinin çok detaylı bir şekilde incelenmesi ele alınmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. (E)-4-Metoksi-2-(((4-metoksi-1H-indazol-3-il)imino)metil)fenol ($C_{16}H_{15}N_3O_3$) bileşiğinin sentezi

Yuvarlak dipli bir balonda 31.58 mg (0.184 mmol) 3-amino-4-metoksi-1H-indazol (**1**) 5 mL metil alkolde (MeOH) çözüldü. Üzerine 2 mL MeOH' da çözülen 28.54 mg (0.184 mmol) 5-metoksisalisilaldehit (**2a**) ilave edildi. Geri soğutucu takılıp 25 °C'de karıştırıldı. Çözeltinin rengi sarıdan, turuncuya döndü. Reaksiyonun ilerleyişi 3:2 oranındaki hekzan:etil asetat çözücü sisteminde ince tabaka kromatografisi ile takip edildi. 29 saat sonunda indazol bileşiğine (**1**) ait spotun kaybolmasıyla reaksiyona son verilmiştir. Reaksiyon karışımı evapore edildikten sonra ele geçen katılar soğuk metil alkol ve dietil eter ile yıkayıp, kurutuldu. Ardından metil alkolden yavaş buharlaştırma yoluyla kristallendirildi (15 gün). **Verim:** %92; **Rf:** 0.43; **EN:** 142-144 °C. **UV-Vis [5x10⁻⁵ M DMSO'da, λ_{max} (Absorbance)]:** 312 nm (0.320), 389 nm (0.882). **FTIR (ATR, γ , cm⁻¹):** 3155, 3109 (γ_{NH} indazol), 3047 (γ_{Ar-CH}) 1612 ($\gamma_{C=N}$), 1519 - 1435 ($\gamma_{Ar-C=C}$), 1365 (γ_{C-N}), 1257 (γ_{C-O}), 1041 (γ_{N-N}). **1H NMR (400 MHz, DMSO-*d*₆, δ , ppm)** 13.14 (1H, -NH), 13.11 (s, 1H, -OH), 9.33 (s, 1H, -N=CH), 7.31 (dd, 2H, *J*: 9.5 ve 6.2 Hz, indazol =CH), 7.11-7.01 (m, 2H, indazol ve salisiladehitteki aromatik CH), 6.93 (d, *J*: 8.9 Hz, 1H, salisilaldehit halkasındaki aromatic CH), 6.61 (d, 1H, *J*: 7.6 Hz, salisilaldehit halkasındaki aromatic CH), 3.92 (s, 3H, -OCH₃), 3.76 (s, 3H, -OCH₃); **APT- ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO-*d*₆, δ , ppm)** 161.57, 155.37, 154.27, 152.27, 147.58, 143.78, 128.80, 120.83, 119.63, 118.03, 116.03, 108.92, 103.67, 101.06, 56.03 55.88



Şekil 1. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin beklenen yapısı
2.2. X-ışını kırınım yöntemi

Schiff bazlı $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin yapı analizi X-ışını kırınım yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Kırınım şiddetlerinin belirlenmesi Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesindeki X-ışınları Laboratuvarı'nda Bruker D8 QUEST difraktometresi tarafından Molibden $K\alpha$ ışınması kullanılarak elde edilmiştir. Veri toplama sürecinde X-Area ve X-RED programlarından yararlanılmıştır [23]. Kristal yapıların belirlenmesinde direkt yöntemler kullanılmıştır. Direkt yöntemler ile yapı çözümü yapılması için kullanılan WinGX arayüz programı içerisindeki SHELXS-2013 [24] programı ile çözülmüş SHELXL-2014 [25] programı arıtılmıştır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler Ortep-3 [26] programından yararlanılarak görsel hale getirilmiştir.

Hidrojen atomu dışında yer alan tüm atomların konumları difraktometreden gelen veriler ışığında belirlenmiş ve yapı arıtım süreçleri yapılmıştır. Arıtım sürecinde ilk olarak atomlarının konumlarının hassas bir şekilde belirlenmesi ve eksik olan atomların belirlenmesi için izotropik arıtım yapılmıştır. Bu arıtım süreci sonucunda atom konumları hassas bir şekilde belirlenmiş ve eksik atom olmadığı görülmüştür. Bu durum üzerine anizotropik arıtım sürecine başlanmıştır. C atomuna bağlı olan tüm hidrojen atomları geometrik olarak yerleştirildi ve izotropik arıtım yapıldı. Aromatik halkalarda bulunan H atomları için karbon-hidrojen bağ uzunluğu 0,93 Å olarak sabitlenmiştir. Metil grubundaki H atomları için karbon-hidrojen bağ uzunlukları ise 0,96 Å olarak sabitlenmiştir. Oksijen ve nitrojen atomlarına bağlı olan H atomlarının konumları Fourier haritandan yararlanılarak belirlenmiş ve izotropik arıtları yapılmıştır.

2.3. Spektroskopik yöntemler

Schiff bazlı $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin kızılötesi spektroskopisi (IR) KBr pelletler kullanılarak Bruker Vertex-80v spektroskopisi ile 400-4000 cm^{-1} aralığında analiz edilmiştir. Yapılan kuramsal hesaplamaları sonucunda elde edilen dalga sayıları ve deneysel olarak elde edilen dalga sayıları arasında uyum sağlanması amacıyla literatürde yer alan kuram düzeyinde belirlenen çarpanlar kullanılarak ölçeklendirme (skala faktörü) işlemi yapılmıştır [27]. Kristallerin UV-Vis spektrumları Unicam-UV200 marka UV-Vis spektrometresi ile 200-800 nm dalga boyu aralığında DMSO- d_6 çözücüsü kullanılarak çekilmiştir.

2.4. Kuramsal hesaplama yöntemleri

Araştırma makalesi kapsamında incelenen Schiff bazlı $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin kuramsal hesaplamaları Gaussian 03W [28] programı kullanılarak yapılmıştır. Bu program içerisinde hesaplama yöntemi olarak

Yoğunluk Fonksiyoneli Kuramı (YFK) seçilmiştir. Yoğunluk fonksiyonel kuramı hesaplarında, Becke'nin değiş-tokuş [29] integralleri kullanılmıştır. Lee, Yang ve Parr'ın tarafından geliştirilen korelasyon terimleri [30] seçilip üç parametreye sahip olan değiş-tokuş korelasyon fonksiyonu B3LYP seçilmiştir. Yapılan bu hesaplamalar sonucunda her kristal yapı için bağ uzunları, bağ açıları, burulma açıları, sınır orbital değerleri, enerji değerleri, dipol moment değerleri, Mulliken nüfus değerleri, doğal bağ değerleri, moleküler elektrostatik potansiyel grafikleri, Hirschfeld yüzey analizleri, parmak izi bölgeleri, atomların rezonans değerleri, HOMO-LUMO değerleri, elektronik geçiş özellikleri ve sertlik yumuşaklık bilgileri çalışmaları yapılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Optimize yapı

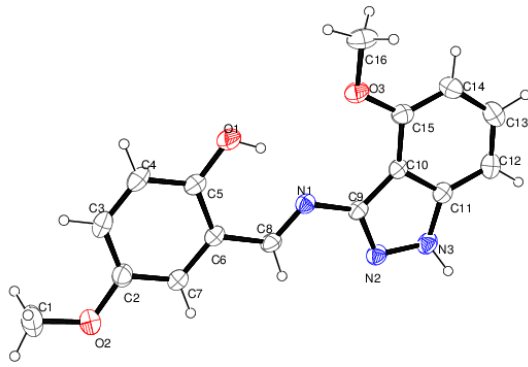
$C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğine ait kristal verileri, veri toplama bilgileri ve yapılan arıtım bilgileri Tablo1'de belirtilmiştir. İncelenen kristal yapı prizma şeklinde ve kırmızı renge sahiptir. Toplamda 26174 yansıma ölçülmüştür. Bağımsız yansıma sayısı 4786 ve $[I > 2\sigma(I)]$ 'ya bağımlı yansıma sayısı 1933 tane olarak ölçülmüştür. Kristal yapı için $T_{min}=0.617$ $T_{max}=0.746$ olarak analiz edilmiştir.

Tablo 1. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğine ait kristal verileri, veri toplama bilgileri ve arıtım bilgileri

Kimyasal formül	$C_{16}H_{15}N_3O_3$
Formül ağırlığı (a.k.b.)	297.31
Kristal sistemi	Monoklinik
Uzay grubu	$P2_1/n$
a(Å), b(Å), c(Å)	18.7038(11), 5.0956(3), 18.3823(12)
α , β , γ (°)	90, 102.912(2), 90
Birim hücrenin hacmi (Å ³)	1433.912(16)
Birim hücredeki molekül sayısı (Z.Z')	4
Hesaplanan yoğunluk (Mgm ⁻³)	1.377
F ₀₀₀	624
Çizgisel soğurma katsayısı (mm ⁻¹)	0.10
Kristal boyutları (mm)	0.13 x 0.12 x 0.11
X-ışını	MoK α
Dalgaboyu (Å)	0.71073
Sıcaklık (K)	273
R _{int}	0.047
Difraktometre	Bruker D8 QUEST
Kullanılan programlar	ShelxT, ShelxL, , ORTEP-3, Platon(spek,2009)
h, k, l aralığı	-19→19,-6→6,-22→22

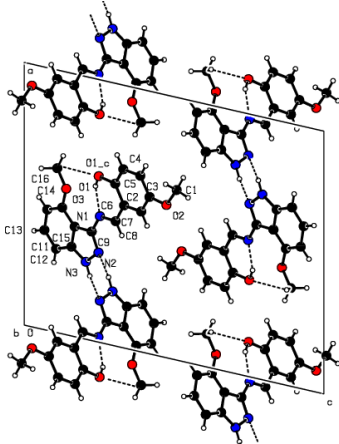
θ_{\min} , θ_{\max} aralığı (°)	2.3°–22.9°
Yapı çözümlemesi	Direkt yöntemler
Yapı arıtılması	Tam matris (F^2)'ye göre
Parametre sayısı	207
R [$F^2 > 2\sigma(F^2)$]	0.040
wR(F^2)	0.104
S	1.04
$\Delta\rho_{\max}$, $\Delta\rho_{\min}$ ($e/\text{Å}^3$)	0.13, -0.13

$C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiği monoklinik yapıda $P2_1/n$ uzay grubunda kristalize olmuştur. X-ışını kırınım bilgilerinde O-H...N bağ yapısından dolayı, kristal yapının enol-imin tautomerizasyonunda şekillendiği belirlenmiştir [31].



Şekil 2. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin %30 olasılıklı Ortep-3 görünümü.

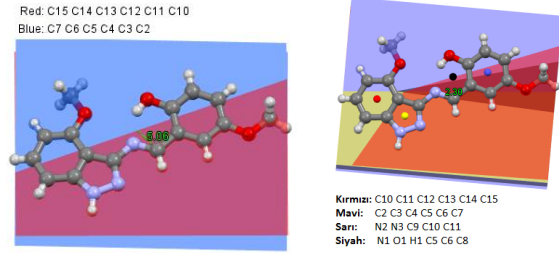
$C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin Ortep-3 görünümü Şekil 2'de ve paketlenme diyagramı Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin paketlenme görünümü.

$C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiği içerisinde bulunan C2-C7 atomları tarafından isimlendirilen açık mavi renkli düzlem ile C10-C15 atomları tarafından isimlendirilen açık kırmızı renkli düzlem arasındaki açının 5.06° olduğu belirlenmiştir. 1H indazol tautomerizasyonun merkezi (N2, N3, C9, C10, C11) sarı renkle ile belirtilmiş olup C10-C15 atomlarından oluşan benzen halkası ile yapmış olduğu dihedral açı 1.74° derecedir. Schiff baz tautomerizasyon merkezi (N1, O1, H1, C6, C5, C8) siyah renkle belirtilmiş olup C10-

C15 atomlarından oluşan benzen halkası ile yapmış olduğu dihedral açı 3.46° derecedir 1H indazol tautomerizasyonun merkezi (N2, N3, C9, C10, C11) sarı renkle ile Schiff baz tautomerizasyon merkezi (N1, O1, H1, C6, C5, C8) siyah renkle belirtilmiş olup aralarındaki açı 2.30° derecedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak $C_{16}H_{15}N_3O_3$ yapısının düzlemsel bir yapıya sahip olduğu görülmektedir [32]. Moleküler yapının düzlemsel olmasından dolayı fotokromik özellik göstereceği öngörülmektedir [33].



Şekil 4. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin Mercury gösterimi.

$C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğine ait hidrojen bağ geometrisi verilerine moleküler yapı O1-H1...N1 formunda şekillenmiş olup enol-imin formunda meydana gelmiştir. Bileşiğine ait hidrojen bağ geometrisi verileri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin hidrojen bağ geometrisi (Å, °)

D-H...A	D-H	H...A	D...A	D-H...A
O1-H1...N1	0.82	1.89	2.6144	146
			(17)	
C16-H16B...O1 ⁱ	0.96	2.56	3.233 (3)	128
N3-H3...N2 ⁱⁱ	0.93 (2)	2.02 (2)	2.918 (2)	161.1(17)

X-ışını deneyinden elde edilen sonuçlardan göre, Schiff baz tautomerinin temel atomlarından olan azot atomunun komşu atomlar ile arasında olan bağ uzunlukları N1=C8 çift bağı deneysel olarak $1.274 (3)$ Å olarak elde edilmişken teorik olarak 1.2902 Å olarak hesaplanmıştır. O1-H1 arasındaki tek bağ uzunluğu deneysel olarak 0.820 Å olarak ölçülmüşken, teorik olarak 0.9928 Å olarak hesaplanmıştır. C5-O1-H1 bağ açısı deneysel olarak 109.5° olarak ölçülmüşken teorik olarak 107.7705° olarak hesaplanmıştır. Bağ Uzunluğu (Å), Bağ Açısı (°) ve Burulma Açılı (°) literatürde yer alan benzer diğer kristal yapılar ile uyum içerisindedir [34].

Tablo 3. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin önemli görülen deneysel ve kuramsal geometrik parametreleri

(Bağ Uzunluğu (Å)) Bağ Açısı (°) Burulma Açılı (°)	Deneysel	YFK/6-311G (d,p)
O1—C5	1.355 (2)	1.343
O1—H1	0.8200	0.9928
N3—H3	0.93 (2)	1.0061
N1—C8	1.2742 (19)	1.2902
N1—C9	1.3961 (19)	1.3866

N2—C9	1.3252 (19)	1.326
N2—N3	1.3698 (19)	1.354
N3—C11	1.361 (2)	1.3676
O2—C2	1.378 (2)	1.371
O2—C1	1.420 (2)	1.4174
C6—C5	1.408 (2)	1.4236
C5—O1—H1	109.5	107.770
C8—N1—C9	122.01 (13)	122.103
C9—N2—N3	105.57 (13)	105.892
C11—N3—H3	128.7 (12)	128.042
C5—C6—C8	121.12 (15)	121.377
N3—N2—C9—N1	178.41 (13)	-179.995
O1—C5—C4—C3	-178.35 (16)	-179.995
O3—C15—C14—C13	-179.50 (17)	-179.996

3.2. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin kuramsal olarak incelenmesi

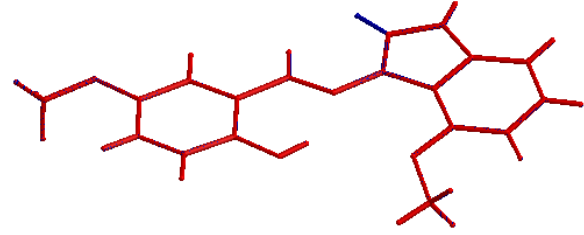
C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin enerjisinin en az olduğu durumda bulunma olasılığı geometri optimizasyon çalışması yapılarak bulunmuştur. Kuramsal çalışmalarda yapı enol-imin tautomerine sahiptir ve hesaplamalar ve bu form için gerçekleştirilmiştir. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin sahip olduğu dipol moment, toplam enerji ve RMS gradyent normu kuramsal olarak sırasıyla 1.469158 Debye, -1008.881925 Hartree ve 29x10⁻⁶ olarak hesaplanmıştır. Ek olarak, C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin polarize edilebilirliği 239.998667 a.u. olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin kuramsal hesaplamalarında kullanılan düzeltme değerleri ve hesaplamalar

Kuramsal düzeltmeler ve hesaplamalar		
Sıcaklık	298.150	(Kelvin)
Basınç	1.00000	(atm)
Elektronik Enerji (EE)	-1008.881925	(Hartree)
Sıfır Noktası Enerji	0.289223	(Hartree)
Düzeltilmesi		
Enerjiye Termal	0.308220	(Hartree)
Düzeltilme		
Entalpiye Termal	0.309164	(Hartree)
Düzeltilme		
Serbest Enerjiye Termal	0.240299	(Hartree)
Düzeltilme		
EE + Sıfır Noktası Enerjisi	-1008.592701	(Hartree)
EE + Termal Enerji	-1008.573705	(Hartree)
Düzeltilmesi		
EE + Termal Entalpi	-1008.572761	(Hartree)
Düzeltilmesi		
EE + Termal Serbest Enerji	-1008.641625	(Hartree)
Düzeltilmesi		
E (Termal)	193.411	(kcal/mol)
Isı Kapasitesi (Cv)	73.483	(cal/mol-kelvin)
Entropi (S)	144.938	(cal/mol-kelvin)

Kuramsal hesaplamalar sonucunda moleküler yapının C1 nokta grubunda yer aldığı hesaplanmıştır. Bu durumun bir sonucu olarak molekül optik izomerizme (kiralite) sahip olduğu sonucuna

varılmıştır [35].



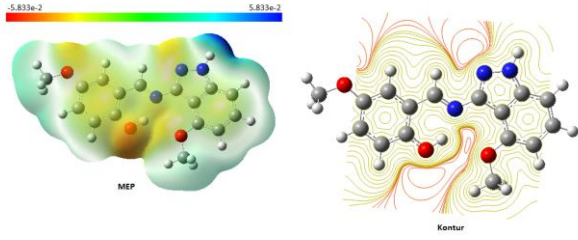
Şekil 5. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin deneysel (mavi) ve optimize (kırmızı) yapılarının uyumları.

Elde edilen deneysel veriler sonucunda oluşturulan bileşik yapısının kuramsal olarak elde edilen bileşik yapısı ile uyumu görselleştirilerek incelenebilmektedir. Bu kapsamda Şekil 5'de deneysel yapı mavi renkle işaretlenmiş olup kuramsal hesaplama sonucunda elde edilen yapı kırmızı renkle işaretlenerek uyum dereceleri incelenmiştir. Deneysel veri ile kuramsal veri arasındaki uyum 0.274 Å olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak deneysel yapı ile kuramsal yapı arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir [36]. Ayrıca deneysel yapı ile kuramsal yapı arasındaki uyum, kuramsal hesaplamalar için seçilen baz setinin doğruluğunun bir göstergesi olarak da araştırmacıya bilgi sunmaktadır.

Tablo 5. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin Mulliken Nüfus Analizi'nden (MPA) elde edilen kısmi yükler

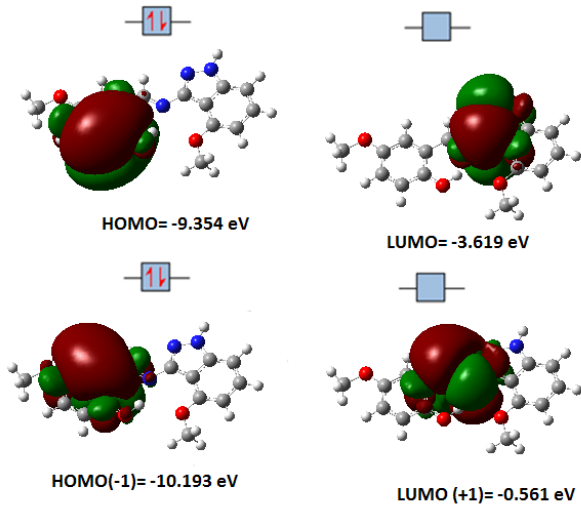
Atom	B3LYP/6-311G Mulliken yükleri (a.u)	Atom	B3LYP/6-311G(d,p) Mulliken yükleri (a.u)
C1	-0.131	O2	-0.358
C2	0.162	O3	-0.341
C3	-0.113	N1	-0.488
C4	-0.091	N2	-0.254
C5	0.209	N3	-0.353
C6	-0.212	H1	0.288
C7	-0.062	H1A	0.127
C8	0.250	H1BC	0.107
C9	0.460	H3A	0.106
C10	-0.308	H4	0.100
C11	0.297	H7	0.096
C12	-0.043	H8	0.099
C13	-0.104	H3	0.238
C14	-0.133	H12	0.088
C15	0.171	H13	0.095
C16	-0.134	H14	0.105
O1	-0.374	H16ABC	0.111

C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiği için optimize yapı üzerinden yapılan kuramsal hesaplamalar sonucunda Mulliken Popülasyon Analiz sonuçları Tablo 5'de belirtilmiştir. Hidrojen atomu için en büyük pozitif değer Schiff baz tautomerinin merkez alanı içerisinde yer alan H1 atomunda 0.288 olarak hesaplanmıştır. Kuramsal olarak hesaplanan Hidrojen atomlarının Mulliken kısmi yük değerlerinin tamamı pozitif olarak hesaplanmıştır. İncelenen bileşik için en büyük negatif kısmi yük değerine sahip olan atom, Schiff baz tautomerinin merkez alanı içerisinde yer alan N1 atomudur ve -0.488 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin MEP yüzeyi ve Kontur yüzeyi gösterimi.

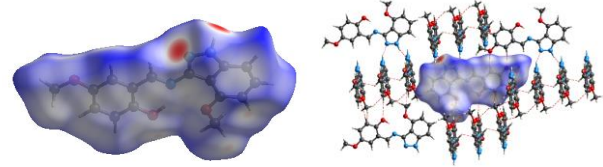
$C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin Şekil 6'da gösterilen moleküler elektrostatik potansiyel yüzey gösterimi ve Kontur yüzey gösterimi incelediğinde daha önce kuramsal olarak hesaplanan ve sayısal veriler ile ortaya koyulan gerçekliğin görselleştirilmesi yapılmıştır. MEP yüzeyin renklere bağlı değişimi incelendiğinde kırmızı renkle belirtilen noktaların negatif bölgeler mavi renkle belirtilen noktaların pozitif bölgeler olduğu bilinmektedir. Optimize yapı üzerinden hesaplanan MPA hesaplamalarından elde edilen verilerden negatif değere sahip olan O1 atomu, MEP haritasında kırmızı renkle görselleştirilmesi yapılan hesaplamaların bir birini destekler nitelikte olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin HOMO-LUMO gösterimi.

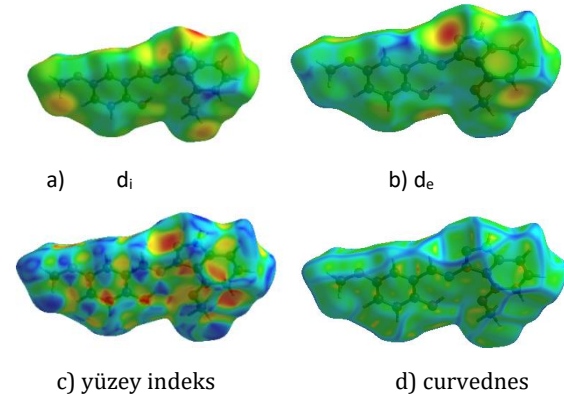
$C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiği için kuramsal olarak hesaplanan en büyük enerjili dolu moleküler orbital (HOMO) enerjisi (E_{HOMO}) -9.354 eV olarak hesaplanmıştır. İncelenen yapıya ait en düşük boş moleküler orbital (LUMO) enerjisi (E_{LUMO}) -3.619 eV olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler literatür verileri ile uyum içerisindedir. Teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen iyonizasyon enerji 9.354 eV çıkarak uyarılması için gereken enerji değerinin yüksek olduğu yorumu çıkarılmaktadır [37]. Elektron ilgisi 3.619 eV olarak hesaplanmıştır. İncelenen bileşiğin kuramsal olarak elde edilen sonuçlarından, enerji aralığının 5.735 eV olarak belirlenmesi ve yumuşaklık değerinin 0.174 eV olarak belirlenmesi, bileşiğin yüksek kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir.

$C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin d_{norm} Hirshfeld Yüzeyi Şekil 8'de görselleştirilmiştir. İncelenen bileşiğin d_{norm} yüzeyi 3 boyutlu olarak -0.532 (kırmızı) ile 1.3839 (mavi) renk aralığında çizdirilmiştir. d_{norm} Yüzeyi üzerinde bulunan kırmızı noktalar hidrojen bağların güçlü olduğunu göstermektedir. d_{norm} Yüzey haritası için hacim 351.50 \AA^3 , alan 335.19 \AA^2 , küresellik değeri 0,719 olarak hesaplanmıştır. Kırmızı bölgeler N1 ve N2 atomları üzerinde oluşmuştur.



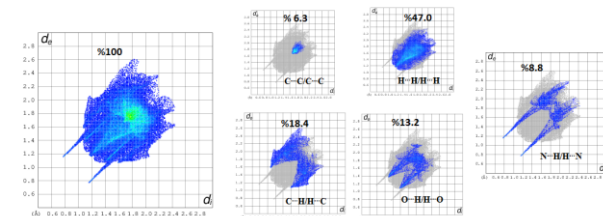
Şekil 8. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin d_{norm} Hirshfeld Yüzeyi ve haritalandırılmış moleküler bağlanma gösterimi

d_i Yüzey haritası 0.7835 kırmızı ile 1.6811 mavi aralığında oluşturulmuştur. d_e Yüzey haritası 0.78.18 kırmızı ile 1.6967 mavi aralığında oluşturulmuştur. Sırasıyla yüzey indeksi ile curvednes yüzey haritaları -1.00 kırmızı 1.00 mavi , -4.00 kırmızı ile 4.00 renk aralığında oluşturulmuştur.



Şekil 9. Hirshfeld yüzeyine ait a) d_i , b) d_e , c) yüzey indeksi ve d) eğrilik indeksi haritası

$C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşik yapısına ait bazı parmak izi bölgesi haritaları verilmiştir. Burada seçilen parmak izi haritalarında etkileşim yüzdelilerinin büyük olduğu durumlar tercih edilmiştir.



Şekil 10. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin parmak izi haritaları

Parmak izi haritalarının hesaplanması sonucunda bileşik yapısının oluşmasında en büyük etkileşim katkısı H...H/H...H arasında gerçekleşmiş olup %47 değerini sahiptir. Hidrojenler arasındaki en yüksek etkileşim oranından sonra C...H/H...C etkileşimi %18.4

değerle ikinci sırada yer almaktadır. Bileşik yapısının oluşumunda O-H/H-O etkisi %13,2 olarak hesaplanmıştır.

Elektrofilite bazlı yük transferi yöntemi (ECT), elektron verici veya alıcı (nükleofilik veya elektrofilik davranış) moleküllerin DNA bazları ile olası etkileşimin araştırılmasına olanak sağlar. Burada, adenin, sitozin, guanin ve timin için ECT değerleri sırasıyla 1,59668, 2,9570, 1,77819 ve 1,52064 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar adenin, sitozin, guanin ve timinden incelenen moleküle yük geçişi olacağını göstermektedir. Bu durum incelenen molekülünün elektrofilik özellik gösterdiği sonucunu doğrulamaktadır.

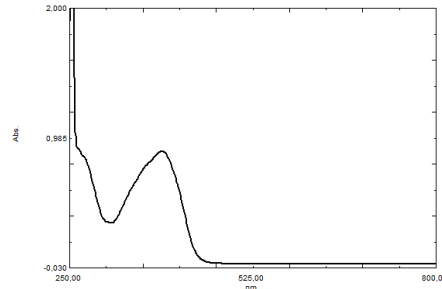
C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiği ve DNA bazları için IP, EA, μ , η , ΔN_{max} ve ECT değerleri Tablo 6'da listelenmiştir. Bu sonuçlar, elektronların DNA bazlarından incelenen moleküle aktarıldığını göstermiştir. Bu nedenle, DNA bazları elektron donörü ve dolayısıyla incelenen molekülün elektron alıcısı olarak kabul edilmektedir. Ayrıca DNA bazları nükleofilik özellik gösterirken, C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiği elektrofilik özellik göstermiştir. ECT değerleri, molekülün guanin ile diğer DNA bazlarından daha fazla etkileşime girebildiğini gösterir.

Tablo 6. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiği için hesaplanan elektrofilikliğe dayalı yük transfer parametreleri.

Bileşik ve DNA bazı	İyonlaşma Potansiyeli (IP) a.u	Elektron İlgisi (EA) a.u	Kimyasal Potansiyel (μ) a.u	Kimyasal Kararlılık (η) a.u	Maksimum Yük Transferi (ΔN_{max})
Bileşik	-0,10111	-0,204	0,15278	0,0516	2,95720
Adenin	-0,03401	-0,222	0,12833	0,0943	1,36053
ECT=1,59					
Stozin	0,23476	-0,234	0,00000	0,234	0,00000
ECT=2,95					
Guanin	-0,01738	-0,211	0,11444	0,097	1,17901
ECT=1,77					
Timin	-0,04276	-0,238	0,14070	0,0979	1,43656
ECT=1,52					
06					

3.3. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin deneysel olarak incelenmesi

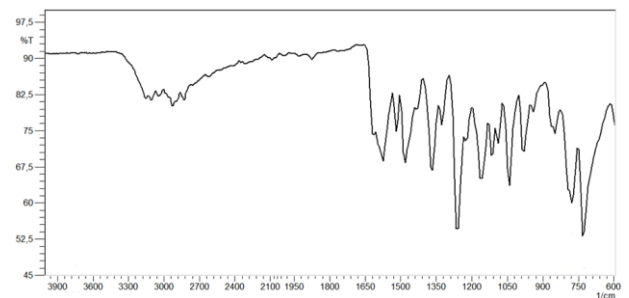
C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin UV-Vis spektrumu DMSO-d₆ içinde 5x10⁻⁵ M konsantrasyonda hazırlanmıştır. Şekil 11'de C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin UV-Vis spektrumunu göstermektedir. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin UV-Vis spektrum verilerine göre, 3 adet elektronik geçiş gözlenmiştir. Bu geçişler 270 nm, 312 nm ve 388 nm olarak gözlenmiştir. 400 nm'nin üzerinde bir geçiş gözlenmediği için yapı enol-imin tautomerinde meydana geldiği UV-Vis spektrumu tarafından ortaya konulmuştur.



Şekil 11. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin UV-Vis spektrumu.

C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin UV spektrumunda, 270 nm'de mor ötesi bölgede gelen omuz süstitüe benzendeki $\pi \rightarrow \pi^*$ geçişlerine aittir. 312 ve 388 nm de gelen pikler ise yapıdaki -C=N- gruplarından gelen $n \rightarrow \pi^*$ geçişlerine karşılık gelmektedir. UV-Vis için gözlenen değerler literatürle uyumludur. UV-Vis için gözlenen değerler diğer literatür verileri ile uyum içerisindedir. Ek olarak kuramsal hesaplar üç farklı set için hesaplanmıştır. Buna göre, TD B3LYP/STO-3G hesaplaması sonucunda 3 pik elde edilmiştir. Bu set için değerler 307 nm, 315nm ve 462 nm'dir. Bir diğer set olan TD CAM-B3LYP/STO-3G için elde edilen değerler 259 nm, 273 nm ve 357 nm'dir. Üçüncü set olan TD WB97XD/STO-3G için 255 nm, 273 nm ve 349 nm değerleri hesaplanmıştır [38].

Kızılötesi spektroskopisi moleküler yapıların karakteristik özelliklerin belirlenmesinde titreşim frekansları üzerinden bilgiler vererek yapı analizinde kullanılan yaygın yöntemlerden bir tanesidir. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin deneysel olarak elde edilen IR spektrumu Şekil 12'de yer almaktadır. O-H gerilme titreşimi deneysel olarak 3200 cm⁻¹ ile 3600 cm⁻¹ aralığında gözlenmektedir. Ancak, bileşiğin IR spektrumunda O-H gerilme titreşimi ne ait pik gözlenmemiştir. Bu da molekül içi H bağından kaynaklanıyor olabilir. Çünkü hidrojen bağları OH piklerinin yerini değiştirirken, şiddetini azaltır. 3155 ve 3109 cm⁻¹'de N-H gerilme pikleri gelirken, aromatik C-H gerilme piki 3047 cm⁻¹'de gözlenmiştir. İmin (C=N) gerilme piki ise 1573 cm⁻¹ de gelerek aldehit ile aminin bağlandığını göstermiştir. Aromatik halkada bulunan C=C bağlarına ait titreşimler ise sırasıyla 1519 ve 1435 cm⁻¹'de gelmiştir. İndazol halkasındaki N-N bağına ait pik, 1041 cm⁻¹ de yer almıştır.



Şekil 12. C₁₆H₁₅N₃O₃ bileşiğinin IR spektrumu.

Gaussian hesaplamalarında belli başlı skala faktörlerinin değerleri, Computational Chemistry

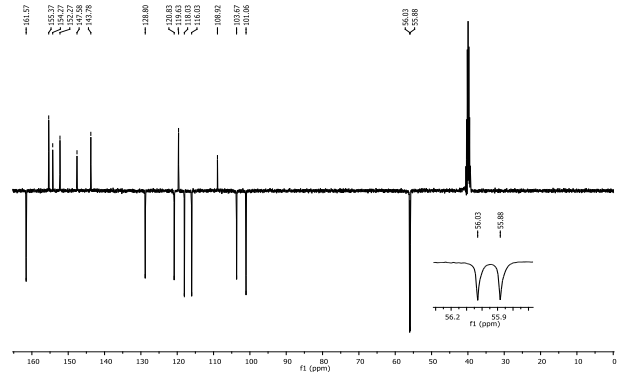
Comparison and Benchmark DataBase'de mevcuttur. Buna göre DFT-b3y1p-6311G(d,p) değerinin doğrudan skala faktörü bulunmamaktadır. Ancak bu sete en yakın iki set için skala faktörü 6-31G(2df,p) için 0.965 ve 6-311+G(3df,2p) için ise 0.967 değerine sahiptir. Buna göre DFT-b3y1p-6311G(d,p) için skala faktörü bu aralıkta bir değer almalıdır. C-N teorik değeri 1665 cm^{-1} olarak hesaplanmıştır. Bu değere 0.967'lik skala faktörü uygulanınca 1600 cm^{-1} değeri bulunmaktadır. 1665 cm^{-1} değerine 0.965 skala faktörü uygulanınca 1597 cm^{-1} değeri bulunmaktadır. Buna göre deneysel veriler ile kuramsal verilerin uyum içerisinde olduğu düşünülmektedir. Sapmanın en fazla olduğu N-H kuramsal değeri 3669 cm^{-1} olarak hesaplanmıştır. Bu değeri sırasıyla 0.967 ve 0.965 skala faktörleri uygulanırsa 3548 cm^{-1} ve 3555 cm^{-1} değerleri elde edilmektedir. Deneysel ve teorik değerler arasındaki bu fark Gaussianın gaz fazında tek bir molekül üzerinden hesaplama yaparken komşu etkileşimleri dikkate almamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Zira deneysel pik değerinin düşük çıkması birim hücre içinde bulunan diğer moleküllerin N-H indazol bölgesine yakın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [39].

Gaussian programında DFT/B3YLP 6-311G (d,p) setinde yapılan kuramsal hesaplamalar sonucunda N-H gerilme piki 3669 cm^{-1} de hesaplanmıştır. C=N gerilme piki kuramsal olarak 1665 cm^{-1} de hesaplanmıştır. Diğer etkileşimlere dair deneysel ve kuramsal sonuçlar Tablo 7'de yer almaktadır. Kuramsal ve deneysel sonuçlar arasında uyum olduğu düşünülmektedir.

Tablo 7. $\text{C}_{16}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_3$ bileşiğinin IR spektrumunun bazı deneysel ve teorik değerleri.

İşaretleme	Deneysel cm^{-1}	Teorik cm^{-1}
ν N-H	3155, 3109	3669
ν Ar-C-H	3047	3194,3211
ν Alf-CH	2924, 2831	3007,3046
ν C-N	1612	1665
ν C=N	1573	1611
ν C=C	1519, 1435	1548, 1611
ν C-N	1365	1394
ν C-O	1257	1318
ν N-N	1041	1110

$\text{C}_{16}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_3$ bileşiği için yapılan X-ışını difraktometresi çalışmaları sonucunda yapı içerisinde 16 tane C atomu olduğu tespit edilmiştir. Schiff bazına sahip bileşiklerin aromatik benzen halkalarının ^{13}C -NMR pik değerleri δ 120-170 ppm arasında gözlenmektedir. APT- ^{13}C -NMR çalışmalarında benzen halkalarına farklı molekül gruplarının bağlanması benzen hakları için beklenen pik değerlerinde kaymalara neden olmaktadır. Eklenen bu molekül grupları APT- ^{13}C -NMR R pik değerlerinin üst üste binmesi sonucunda daha büyük değerler olarak hesaplanacaktır.



Şekil 13. $\text{C}_{16}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_3$ bileşiğinin DMSO- d_6 içinde APT- ^{13}C -NMR spektrumu.

İncelenen bileşik yapısı için X-ışını verilerine bakıldığında 2 adet aromatik benzen halkasına sahip olduğu görülmektedir. Deneysel olarak APT- ^{13}C -NMR spektrumu Şekil 13.'de gösterilmektedir.

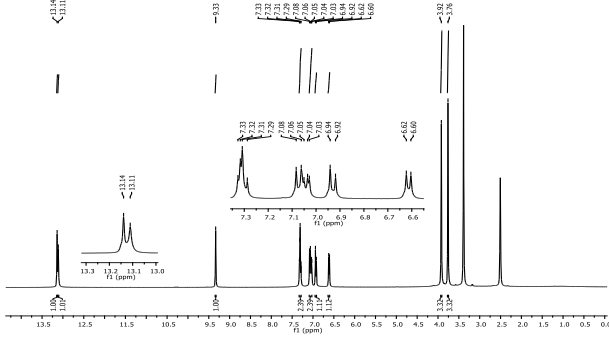
Tablo 8. $\text{C}_{16}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_3$ bileşiğinin deneysel ve kuramsal APT- ^{13}C -NMR pik değerleri.

Parametre	Deneysel ppm	Teorik ppm
C1	56.03	55.8
C2	152.27	153.3
C3	119.63	118
C4	118.03	117.2
C5	154.27	153.4
C6	120.83	118.3
C7	116.03	113.5
C8*	161.157	161.57
C9*	147.58	126.4
C10	108.92	108.4
C11	143.779	143.8
C12	103.67	107.8
C13	128.80	127.4
C14	101.06	106.3
C15	155.37	157.4
C16	55.88	55.8

$\text{C}_{16}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_3$ bileşiği APT- ^{13}C -NMR verileri incelendiğinde N1 ve N2 atomlarına bağlı olan C9 atomu 147 ppm civarından bir kuramsal değer hesaplaması gerekirken 126.4 ppm hesaplanmıştır. Bu durumun 1H indazol bölgesindeki korelasyon etkisi olduğu düşünülmektedir. 161.57 ppm'de imine (-HC=N-) ait pik, 55.88 ve 56.03 ppm'lerde -OCH₃ pikleri gözlenirken; 155.37-101.06 ppm arası da aromatik halkalara ait piklere atfedilmiştir. Diğer atomlara ait APT- ^{13}C -NMR değerleri Tablo 8'de yer almaktadır.

$\text{C}_{16}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_3$ bileşiğinin X-ışını kırınım verilerinden yararlanılarak oluşturulan molekül geometri yapısı içerisinde 15 adet hidrojen atomu olduğu gözlenmektedir. O1, N3, C8, C1 ve C16 atomları üzerinde bulunan hidrojen atomları dışında kalan tüm hidrojenler aromatik benzen halkalarının üzerinde konumlanmıştır. Benzen halkasına bağlı hidrojenler δ 7.26 ppm de rezonansa geldiği bilinmektedir. Ancak benzen halkasına bağlı elektron çekici veya itici grupların etkisi ile aromatik benzen halkalarına ait hidrojenlerin kimyasal kayma değerleri genel olarak δ 6.0-8.5 ppm aralığında

gözenmektedir.



Şekil 14. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin $DMSO-d_6$ içinde 1H -NMR spektrumu

Molekül yapısı içerisinde bulunan hidrojenlerin altı tanesi iki adet metoksi (-OCH₃) grubunda yer alırken, sırasıyla -OH (δ : 13.11 ppm), imin (-CH=N-, δ : 9.33 ppm) ve indazol -NH (δ : 9.33 ppm) grubuna bağlı üç adet hidrojen mevcuttur. Bunların dışında kalan altı adet hidrojen atomu da aromatik benzen halkalarının üzerinde konumlanmıştır (δ : 7.31-6.61 ppm). 2.45 ppm ve 3.40 ppm'de gelen pikler döterolu çözücüye aittir. 9.33 ppm'de gelen imin (-HC=N-) tekli piki aldehit ile aminin kondense olduğunun en önemli işaretidir.

Tablo 9. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin deneysel ve kuramsal 1H -NMR pik değerleri pik değerleri.

Parametre	Deneysel ppm	Teorik ppm
H1	13.11	10.73
H1 _{ABC}	3.76	3.77
H3	13.14	12.4
H3 _A	6.94	6.83
H4	6.92	6.83
H7	7.08	7.21
H8	9.33	9.00
H12	7.29	7.10
H13	7.31	7.62
H14	7.33	8.00
H16 _{ABC}	3.92	3.79

Ek olarak, kısaltma listesi Tablo 10'da yer almaktadır.

Tablo 10. Kısaltma listesi

IR	Kızılötesi
UV-Vis	Ultraviyole-Görünür bölge
^{13}C -NMR	^{13}C -Nükleer Manyetik Rezonans
1H -NMR	1H - Nükleer Manyetik Rezonans
ECT	Elektrofilik tabanlı yük transferi
MPA	Mulliken Popülasyon Analizi
MEP	Moleküler Elektrostatik Potansiyel
DFT	Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi
IP	İyonlaşma Potansiyeli
EA	Elektron İlgisi
μ	Kimyasal Potansiyel
η	Kimyasal Kararlılık
ΔN_{max}	Maksimum yük transferi

4. Tartışma ve Sonuç

Bu araştırma makalesi kapsamında yeni bir sentez ürünü olan (E)-4-Metoksi-2-((4-metoksi-1H-indazol-3-il)imino)metilfenol bileşiği kimyasal süreçler sonucunda üretildi. İncelenen bileşik Schiff bazlı bir indazol bileşiğidir. $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiği kırmızı renkte olup monoklinik sistemde $P2_1/n$ uzay grubunda oluşumunu tamamlamıştır. X-ışını kırınımı sonucunda toplam 26174 adet yansıma elde edilmiştir. X-ışını kırınım sonucunda O-H...N bağ yapısından dolayı bileşik enol-imin formunda şekillenmiştir. İncelenen bileşikte C2-C7 benzen halkası ile C10-C15 benzen halkası arasındaki dihedral açı 5.06° olarak hesaplanmıştır. C10-C15 benzen halkası ile indazol merkezi arasındaki dihedral açı 1.74° olarak hesaplanmıştır. Bu bilgiler ışığında bileşik yapısının düzlemsel olduğu kabul edilmiştir. Bu sonucunda bileşiğin fotokromik özellik gösterdiği belirlenmiştir. X-ışını sonucunda elde edilen dataların veri indirgeme ve işlenmesi sonucunda bileşik içerisinde N1=C8 çift bağı tespit edilmiş ve bu durumda bileşiğin enol-imin formunda şekillendiğini desteklemiştir. Kuramsal hesaplamalar sonucunda moleküler yapının C1 nokta grubunda yer aldığı hesaplanmıştır. Bu durumun bir sonucu olarak moleküler optik izomerizme (kiralite) sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak optimize edilmiş yapı ile deneysel sonuçlar üst üste bindirilerek uyum 0.274 \AA uyum tespit edilmiştir. Bu durum seçilen baz setinin deneysel verileri destekleyecek uygun baz seti olduğunu göstermiştir. Kuramsal hesaplamalar sonucunda elde edilen Mulliken Popülasyon Analizine göre en büyük pozitif değer H1 atomu üzerinde tespit edilmiştir ve oksijen atomları da negatif olarak hesaplanmıştır. MEP hesaplamaları sonucunda elde edilen görselde O1 atomu üzerinde oluşan kırmızı renk MPA analizi ile MEP yüzeyinin uyumunu desteklemektedir. Bu durumun sonucu ise bileşik yapısının başka bir yapıyla yeni bir bağ yapması durumunda O1 atomu üzerinde etkileşime gireceği öngörülmektedir. HOMO-LUMO çalışmaları sonucunda elde edilen iyonizasyon enerjisinin 9.354 eV elde edilmesi bileşik yapısının uyarılması için gereken enerji değerinin yüksek olduğu yorumu çıkarılmaktadır. Elektron ilgisi 3.619 eV olarak hesaplanmıştır. İncelenen bileşiğin kuramsal olarak elde edilen sonuçlarından enerji aralığının 5.735 eV olarak belirlenmesi ve yumuşaklık değerinin 0.174 eV olarak belirlenmesi, bileşiğin yüksek kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Hirshfel Yüzey analizi sonucunda elde edilen 2-boyutlu parmak izi bölgesinde en büyük etkileşim katkısı H-H/H-H arasında gerçekleşmiş olup %47 değerini sahiptir. Hidrojenler arasındaki en yüksek etkileşim oranından sonra C-H/H-C etkileşimi %18.4 değerle ikinci sırada yer almaktadır. Moleküler yapı oluşumunda O-H/H-O etkisi %13,2 olarak hesaplanmıştır. DNA/ECT hesaplamaları sonucunda elektronların DNA bazlarından $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğine

aktarıldığını göstermiştir. Bu nedenle, DNA bazları elektron donörü ve dolayısıyla $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiği elektron alıcısı olarak kabul edilmektedir. Ayrıca DNA bazları nükleofilik özellik gösterirken, başlık molekülü elektrofilik özellik göstermiştir. ECT değerleri, $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin guanin ile diğer DNA bazlarından daha fazla etkileşime girebildiğini göstermektedir. UV-Vis spektrum verilerine göre 270 nm, 312 nm ve 388 nm olmak üzere 3 adet elektronik geçiş gözlenmiştir. Geçişlerin 400 nm'den az olması $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin enol-imin formunda şekillendiği göstermektedir. IR spektrumundan elde edilen imin (C=N) gerilme piki ise 1573 cm^{-1} de gözlenerek aldehit ile aminin bağlandığını göstermektedir. Bu durum $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin enol-imin formunda şekillendiğini göstermektedir. NMR analizinden elde edilen sonuçlarda $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin enol-imin formunda şekillendiğini ve bileşik yapısı içerisinde 2 adet benzen halkası olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalar sonucunda $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiğinin DNA zincirleri ile etkileşime girebileceği öngörülmüştür. Bundan dolayı $C_{16}H_{15}N_3O_3$ bileşiği deneysel yöntemler ile protein yapılarına bağlanarak sonuçlarının tartışılması önerilmektedir. Ek olarak ilaç tasarım çalışmaları teorik olarak hesaplanması tavsiye edilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Süreçleri Yönetim Sistemi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: PYO.FEN.1904.22.026

Etik Beyanı

Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Schiff, H. 1864. Mittheilungen aus dem Universitätslaboratorium in " Pisa: eine neue reihe organischer Basen. Justus Liebigs Annalen der Chemie, 131, 1, 118-119.
- [2] Dominiak, P. M., Grech, E., Barr, G., Teat, S., Mallinson, P., Wozniak, K., 2003. Neutral and ionic hydrogen bonding in Schiff bases. Chem. Eur. J., 9(4), 963- 970.
- [3] Güzel, E., Macit, M., Ergüzeloğlu, E., Kalecik, S., Keleşoğlu, Z., & Yavuz, M. 2023. Two new Schiff bases of (E)-2, 4-di-tert-butyl-6-((4-fluorophenylimino) methyl) phenol (I) and (E)-2, 4-di-tert-butyl-6-((3-iodo-4-methylphenylimino) methyl) phenol (II): structural, spectroscopic and quantum chemical calculations. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 763(1), 96-113.
- [4] Fischer, E. 1884. Phenylhydrazin als reagens auf aldehyde und ketone. Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft.
- [5] Denya, S.F., Malan, J. 2018. Joubert, Indazole derivatives and their therapeutic applications: a patent review (2013-2017), Expert Opinion on Therapeutic Patents. 28, 441-453.
- [6] Ghosh, S., Mondal, S., Hajra, A. 2020. Direct catalytic functionalization of indazole derivatives, Advanced Synthesis and Catalysis. 362, 3768-3794.
- [7] Schmidt, A., Beutler, A., Snovydyovych, B. 2008. Recent advances in the chemistry of indazoles, European Journal of Organic Chemistry. 2008, 24, 4073-4095.
- [8] Chevalier, A., Ouahrouch, A., Arnaud, A., Gallavardin, T., Franck, X. 2018. An optimized procedure for direct access to 1 H-indazole-3-carboxaldehyde derivatives by nitrosation of indoles, RSC Advances. 8, 13121-13128.
- [9] Sathe, B. S., Jaychandran, E., Jagtap, V. A., Sreenivasa, G. M. 2011. Synthesis characterization and anti-inflammatory evaluation of new fluorobenzothiazole Schiff 's bases. International Journal of Pharmaceutical Research and Development, vol. 3, no. 3, pp. 164-169.
- [10] Chandramouli, C., Shivanand, M. R., Nayanbhai, T. B., Bheemachari, B., Udipi, R. H. 2012. Synthesis and biological screening of certain new triazole schiff bases and their derivatives bearing substituted benzothiazole moiety. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 4, 2, 1151-1159.
- [11] Ali, S. M. M., Abul Kalam Azad, M., Jesmin, M. et al. 2012. In vivo anticancer activity of Vanillin semicarbazones. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine. 2, 6, 438-442.
- [12] Liu, Y. X. 2005. Control of spermatogenesis in primate and prospect of male contraception. Archives of andrology, 51(2), 77-92.
- [13] Lv, Z., Chu, Y., & Wang, Y. 2015. HIV protease inhibitors: a review of molecular selectivity and toxicity. HIV/AIDS-Research and palliative care, 95-104.
- [14] Yousif, E., Majeed, A., Al-Sammarrae, K., Salih, N., Salimon, J., & Abdullah, B. 2017. Metal complexes of Schiff base: preparation, characterization and antibacterial activity. Arabian Journal of Chemistry, 10, S1639-S1644.
- [15] Verma, M., Pandeya, S. N., Singh, K. N., & Stables, J. P. 2004. Anticonvulsant activity of Schiff bases of isatin derivatives. Acta Pharmaceutica, 54(1), 49-56.
- [16] Al Zoubi, W., Al-Hamdani, A. A. S., & Kaseem, M. 2016. Synthesis and antioxidant activities of Schiff bases and their complexes: a review. Applied Organometallic Chemistry, 30(10), 810-817.

- [17] Mphahlele, M. J., Magwaza, N. M., Gildenhuis, S., Setshedi, I. B. 2020. Synthesis, α -glucosidase inhibition and antioxidant activity of the 7-carbo-substituted 5-bromo-3- methylindazoles, *Bioorganic Chemistry*, 97, 103702.
- [18] Rafique, K. M., Khan, S., Chigurupati, A., Wadood, A. U., Rehman, U., Salar, V., Venugopal, S., Shamim, M., Taha, S. 2020. Synthesis, in vitro α -amylase inhibitory, and radicals (DPPH and ABTS) scavenging potentials of new N-sulfonohydrazide substituted indazoles, *Bioorganic Chemistry* 94, 103410.
- [19] Mai, H. X., Zhang, Y. W., Si, R., Yan, Z. G., Sun, L. D., You, L. P., & Yan, C. H. 2006. High-quality sodium rare-earth fluoride nanocrystals: controlled synthesis and optical properties. *Journal of the American Chemical Society*, 128(19), 6426-6436.
- [20] Alpaslan, Y. B., Süleymanoğlu, N., Öztekin, E., Erşahin, F., Ağar, E., & Işık, Ş. 2010. Experimental and Semi-Empirical and DFT Computational Studies on (E)-2-[(2, 4-Dichlorophenylimino) methyl]-p-cresol. *Journal of Chemical Crystallography*, 40, 950-956.
- [21] Tanak, H., Erşahin, F., Köysal, Y., Ağar, E., Işık, Ş., & Yavuz, M. 2009. Theoretical modeling and experimental studies on Nn-Decyl-2-oxo-5-nitro-1-benzylidene-methylamine. *Journal of molecular modeling*, 15, 1281-1290.
- [22] Kurt, M., Sertbakan, T. R., & Özduran, M. 2008. An experimental and theoretical study of molecular structure and vibrational spectra of 3- and 4-pyridineboronic acid molecules by density functional theory calculations. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 70(3), 664-673.
- [23] Farrugia, L. J. 1999. WinGX suite for small-molecule single-crystal crystallography. *Journal of Applied Crystallography*, 32(4), 837-838.
- [24] Sheldrick, G. M. 2015. SHELXT-Integrated space-group and crystal-structure determination. *Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances*, 71(1), 3-8.
- [25] Sheldrick, G. M. 2015. Crystal structure refinement with SHELXL. *Acta Crystallographica Section C: Structural Chemistry*, 71(1), 3-8.
- [26] Farrugia, L. J. 1997. ORTEP-3 for Windows-a version of ORTEP-III with a Graphical User Interface (GUI). *Applied Crystallography*, 30(5), 565-565.
- [27] Merrick, J. P., Moran, D. ve Radom, L. 2007. An evaluation of harmonic vibrational frequency scale factors. *The Journal of Physical Chemistry A*, 111(45): 11683-11700. doi: 10.1021/jp073974n
- [28] Frisch, M. J., Trucks, G. W., Schlegel, H. B., Scuseria, ..., and Pople, J. A. 2004. Gaussian 03W, Revision E 01, Gaussian, Inc., Wallingford CT.
- [29] Becke, A. D. 1993. Density functional thermochemistry. III. The role of exact exchange. *The Journal of Chemical Physics*, 98: 5648. doi: 10.1063/1.464913
- [30] Lee, C., Yang, W. ve Parr, R. G. 1988, Development of the Colle-Salvetti correlation energy formula into a functional of the electron density, *Physical Review B*, 37 (2): 785-789. doi: 10.1103/PhysRevB.37.785
- [31] Güzel, E., Macit, M., & Yavuz, M. 2023. (E)-2, 4-di-tert bütül-6-((4-florofenilimino) metil) fenol ve (E)-2, 4-di-tert-bütül-6-((3-iyodo-4-metilfenilimino) metil) fenol Bileşikleri için Moleküler Docking ve ADME Çalışmaları. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 997-1011.
- [32] Demircioğlu, Z., Kaştaş, G., Kaştaş, Ç. A., & Frank, R. 2019. Spectroscopic, XRD, Hirshfeld surface and DFT approach (chemical activity, ECT, NBO, FFA, NLO, MEP, NPA& MPA) of (E)-4-bromo-2-[(4-bromophenylimino) methyl]-6-ethoxyphenol. *Journal of Molecular Structure*, 1191, 129-137.
- [33] Güzel, E., Macit, M., Ergüzeloğlu, E., & Yavuz, M. 2023. 3, 5-Di-Tert-Bütül-2-Hidroksibenzaldehit Bileşiminin Kimyasal Aktivite ve Spektroskopik Çalışmaları. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 285-297.
- [34] Kalecik, S., Güzel, E., Doğan, O. E., Ağar, E., & Yavuz, M. 2022. (E)-4-bromo-5-floro-2-(((4-fenilamino) fenil) imino) metil) fenol Bileşiminin Kimyasal Aktivite ve Spektroskopik Çalışmaları. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 821-840.
- [35] Hadjoudis, E., & Mavridis, I. M. 2004. Photochromism and thermochromism of Schiff bases in the solid state: structural aspects. *Chemical Society Reviews*, 33(9), 579-588.
- [36] Kaynar, N. K., Yavuz, M., Tanak, H., Şahin, S., Büyükgüngör, O., & Ağar, E. 2018. Crystal Structure of 2-((E)-(5-Bromo-2-hydroxybenzylidene) hydrazono)-1, 2-diphenylethanone. *Crystallography Reports*, 63, 375-378.
- [37] Demircioğlu, Z., Albayrak, Ç., & Büyükgüngör, O. 2014. Theoretical and experimental investigation of (E)-2-([3, 4-dimethylphenyl] imino) methyl]-3-methoxyphenol: Enol-keto tautomerism, spectroscopic properties, NLO, NBO and NPA analysis. *Journal of Molecular Structure*, 1065, 210-222.
- [38] Ulu, Ö. D., Serin, S., Özdemir, N., & Özdemir, İ. 2024. Synthesis, Crystal Structure, and DFT Studies of NHC Mediated Pd-PEPSSI Complex: Application for Suzuki Reaction. *Journal of Molecular Structure*, 139479.
- [39] Kucuk, C., Celik, S., Yurdakul, S., Özdemir, N., & Bülbül, H. 2024. Characterization of the synthesized diaqua-bis (indazole- κ N2) bis (nitrate- κ O) zinc (II) complex and DFT calculations. *Journal of Molecular Structure*, 1304, 137666.

Bazı *Solanaceae* Familyası Üyelerinin Çimlenme ve Bitki Gelişimine Boya Atık Suyunun Etkileri

Ercan ÇATAK¹ , Ferhan KORKMAZ*¹ 

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 26040, Eskişehir, Türkiye

(Alınış / Received: 29.07.2024, Kabul / Accepted: 18.09.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Endüstriyel atık su,
Ağır metal,
Tohum çimlenme,
Lycopersicum esculentum,
Capsicum annuum

Öz: Yaşadığımız yüzyılda en önemli problemlerden bir tanesi çevre kirliliğidir. Endüstriyel üretimlerin artmasıyla birlikte çevreye salınan endüstriyel atık su miktarı da giderek artmaktadır. Atık sularındaki ağır metaller toksisitenin başlıca sebeplerinden birisidir. Bu nedenle atık suların çevre ve canlılar üzerindeki etkilerinin belirlenmesi de giderek önem kazanmaktadır. Bu etkileri ortaya koyabilmek için kullanılan etkin yöntemlerden biri tohum çimlendirme ve bitki gelişimi deneyleridir. Bu çalışmada kullanılan boya endüstrisi atık suyu %100'den %1'e kadar altı farklı konsantrasyonda uygulanmıştır. Su örneklerinin toksik etkileri *Solanaceae* familyasına ait *Lycopersicum esculentum* Mill. cv. H-2274 (domates) ve *Capsicum annuum* L. cv. İlica 256 (biber) bitki tohumları üzerinde denenecek ortaya konulmaya çalışılmıştır. Atık suyun konsantrasyon artışına bağlı olarak hem çimlenmeyi hem de gelişimi olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Denenen her iki bitki tohumunda boya atık suyunun yüksek serilerde (%25, %50, %75 ve %100) tohum çimlenmesini durdurarak toksik etki gösterdiği belirlenmiştir. Atık su uygulamasının %1 ve %10'luk serilerinde ise kontrole göre Vigor İndeksleri (VI) ve kök uzunluklarının azaldığı saptanmıştır. Kök, hipokotil ve kotiledon yaş ve kuru ağırlıklarında tüm serilerde paralel bir durum gözlenmemiş, bazılarında azalma görülürken bazılarında ise değerler aynı kalmıştır. Bazı konsantrasyonlarda ise kontrole göre anlamlı yükselmeler belirlenmiştir.

Effects of Dye Wastewater on Germination and Plant Development of Some *Solanaceae* Family Members

Keywords

Industrial waste,
Heavy metal,
Seed germination,
Lycopersicum esculentum,
Capsicum annuum

Abstract: One of the most important problems in the century we live in is the environmental pollution. With the growth of industrial production, the amount of industrial wastewater released is also increasing. Heavy metals found in wastewater are one of the main causes of toxicity. For this reason, determining the effects of wastewater on the environment and living things is becoming increasingly important. One of the effective methods used to reveal these effects is seed germination and plant growth experiments. The dye industry wastewater used in this study was studied at six different concentrations from 100% to 1%. The toxic effects of water samples were tried to be revealed by testing them on plant seeds of *Lycopersicum esculentum* Mill. cv. H-2274 (tomato) and *Capsicum annuum* L. cv. İlica 256 (pepper) belonging to the *Solanaceae* family. It has been determined that wastewater negatively affects both germination and development due to increased concentration. It was determined that dye wastewater had a toxic effect by stopping seed germination at high levels (25%, 50%, 75% and 100%) in both plant seeds tested. In the 1% and 10% series of wastewater application, it was determined that Vigor Indexes (VI) and root lengths decreased compared to the control. A parallel situation was not observed in all series in the fresh and dry weights of roots, hypocotyls and cotyledons; while a decrease was observed in some, the values

remained the same in others. Significant increases were determined at some concentrations compared to the control.

1. Giriş

Endüstriyel üretimler sonucunda çevreye yayılan ağır metaller kentleşme ve sanayileşmenin de etkisiyle her geçen gün artarak çevre kirliliğine neden olmaktadır. [1, 2].

Başlıca ağır metal kaynakları yerkabuğunun aşınması, madencilik, endüstriyel atıklar, tarım alanlarında kullanılan pestisitler ve kanalizasyondur [1, 3]. Ağır metal içeren atık sular canlılar için çok önemli bir tehlike kaynağı olarak görülmektedir [4]. Endüstrilerden salınan atık sular farklı toksik kirleticiler taşıdığı için canlılar için olduğu kadar çevre için de tehlikelidir. Farklı endüstrilerden deşarj edilen atık sular çevre kirliliği kaynakları arasında yer almaktadır [5].

Boya atık suları çevre ve insan sağlığına zarar veren ağır metaller ve toksik bileşikler içerir [6]. Bu atık su içinde bulunan endüstriyel boyalar içerdikleri krom, bakır, arsenik, kurşun, kadmiyum, cıva, nikel ve kobalt gibi ağır metaller ve diğer kimyasal maddeler nedeniyle üretim sonucunda oluşan atık suların oldukça toksik olmasına sebep olurlar [7].

Ağır metaller bitkilerin fizyolojik aktivitelerini engelleyerek verimliliklerini düşürmekte, ürün kalite ve miktarının azalmasına yol açmaktadırlar [8, 9, 10]. Ağır metallerin toksik etkileri hem metalin özelliğine hem de alınan doz ve maruz kalınan doz ve şekline göre farklılık göstermektedir [4].

Tohum çimlendirme ve bitki gelişimi deneyleri çeşitli materyallerin toksik etkilerini belirlemek için en uygun yöntemlerden bir tanesidir [11, 12, 13]. Çalışmamızda boya endüstrisi atık suyunun toksisitesini araştırmak üzere tohum çimlenmesi ve gelişimi üzerine olan etkilerini belirlenmeyi amaçladık.

2. Materyal ve Metot

2.1. Atık su konsantrasyonlarının hazırlanması ve tohum temini

Çalışmada kullanılan atık su Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan bir boya fabrikasından alınmış ve kullanılıncaya kadar +4 °C'de saklanmıştır. Alınan bu su %100 olarak kabul edilmiş, ardından saf su ile seyreltilerek %75, 50, 25, 10 ve 1 olacak şekilde diğer konsantrasyonlar hazırlanmıştır. Kontrol serisi olarak saf su kullanılmıştır. Tüm örnekler otoklavda sterilize edilmiştir.

Solanaceae familyasına ait olan *Lycopersicum esculentum* Mill. cv. H-2274 (domates) ve *Capsicum*

annuum L. cv. Ilıca 256 (biber) tohumları T.C. Tarım Ve Orman Bakanlığı Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü'nden temin edilmiştir.

2.2. Boya atık suyu içeriği

ICP/MS yöntemi ile analiz edilen boya atık suyunun içerdiği metaller ve miktarları Tablo 1'de gösterilmiştir. Atık su içeriğinde en fazla miktarda görülen Magnezyum (Mg)'u sırasıyla Mangan (Mn), Çinko (Zn), Bakır (Cu), Nikel (Ni) takip etmektedir. Arsenik (As), Kadmiyum (Cd) ve Cıva (Hg) ise çok düşük miktarlarda bulunmaktadır.

Tablo 1. Boya Endüstrisi Atık Suyunda Bulunan Ağır Metallerin ICP/MS Yöntemi ile Analiz Sonuçları

Metal Adı	Konsantrasyon (ppm)
Magnezyum (Mg)	15,914
Mangan (Mn)	0,766
Çinko (Zn)	0,597
Bakır (Cu)	0,361
Nikel (Ni)	0,098
Arsenik (As)	0,005
Kadmiyum (Cd)	0,001
Cıva (Hg)	0,001

2.3. Tohum sterilizasyon işlemleri

Tohumlar standart prosedürler kullanılarak sterilize edilmiştir [14, 15, 16]. Önce % 96'lık etil alkolde 1 dakika, sonrasında % 5'lik sodyum hipoklorit çözeltisinde 25-30 dakika süreyle yüzeysel sterilizasyon gerçekleştirilmiştir. Ardından, tohumlar steril saf su ile beşer kez yıkanarak, içlerinde kurutma kağıtları bulunan steril petri kaplarına alınmıştır. Sterilizasyon ve tohum ekim işlemleriyle, tohum çimlendirme ve geliştirme çalışmalarının tamamı kapalı ve kontrollü ortamda yapılmıştır.

2.4. Tohumların ekimi ve inkübasyon

Tohumları çimlendirmek için 5x5 cm ebatlarında kare cam ve üzerinde kurutma kağıtlarının yer aldığı sterilize edilmiş petri kapları kullanılmıştır. Her bir petri kabına steril tohumlar 100'er adet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Her seri için ikişer petri kabı kullanılmıştır. Çalışmada 1400'er domates ve biber tohumu kullanılmış, toplamda 2800 adet tohum değerlendirmeye alınmıştır. Öncelikle her petri kabına 3'er ml çözelti uygulanmıştır. 24 saatte bir çözelti miktarları ve çimlenme gelişimleri takip edilmiş, gerektiği zaman eşit miktarlarda çözelti eklenmiştir. Tohumlar 16 saat ışık, 8 saat karanlık ve 25 ±2 °C

sıcaklık, 8000-9000 lüks ışık şiddeti şartlarında inkübe edilmiştir.

2.5. Vigor indekslerinin belirlenmesi ve uzunluk ölçümleri

Tohumun testasından radikulanın kendini göstermesi tohum çimlenmesi olarak değerlendirilmiştir [13]. Petri kaplarındaki çimlenen tohumlar sayılarak çimlenme yüzdeleri belirlenmiş; aynı seriye ait verilerin aritmetik ortalamaları alınmıştır. Çimlenme sayıları ile yüzde tespiti, kök ve hipokotil uzunluklarının ölçümü domates (H-2274) tohumlarında fideciklerin petri kabının kapağına değdiği gün olan 8. günde, biber (İlıca 256) tohumlarında ise 10. günde yapılmıştır.

Tüm fideciklerin kök ve hipokotilleri jilet ile kesilmiş; milimetrik cetvel ile hipokotil ve kök uzunlukları ölçülmüştür. Petri kapları ölçüm ve tartımlar yapıncaya kadar +4 °C'de bekletilmiştir. Vigor İndeksleri her seriye ait çimlenen tohumların (fidecik) kök ve hipokotil uzunlukları toplanarak çimlenme oranlarıyla çarpılması sonucu elde edilmiştir (17, 18). "Vigor İndeksi" fide güç indeksi olarak da bilinir. Çimlenme oranıyla fidenin fiziksel özelliklerinin gelişmişlik derecesini ve bu değerlerin kombinasyonunu gösterir (18). Bu değer aşağıdaki formülle hesaplanmıştır (19, 20):

Vigor İndeks (VI) = Çimlenme yüzdesi x (kök uzunluğu + hipokotil uzunluğu).

2.6. Yaş ve kuru ağırlık tayinleri

Tüm serilerdeki fideciklerin kök, hipokotil ve kotiledonları kesilmiş, hassas terazide tartılarak yaş ağırlıkları tespit edilmiştir. Sonrasında kök, hipokotil ve kotiledonlar 70 °C'de en az 72 saat süre ile tutularak kuru ağırlıkları elde edilmiştir. Toplam ağırlıklar değerlendirilen organların sayılarına bölünerek birim yaş ve kuru ağırlıkları ayrı ayrı belirlenmiştir.

2.7. İstatistiksel analizler

İstatistiksel analizler IBM SPSS Statistics 26 programı kullanılarak yapılmıştır. Veriler değerlendirilmesinde sayısal değişkenler için tanımlayıcı istatistikler (ortalama, standart sapma, medyan) verilmiştir. Öncelikle tüm ölçümlere normal dağılım varsayımı için Kolmogorow Smirnov Testi (n>30) uygulanmıştır. Test sonucunda ölçümlerin normal dağılım varsayımını sağladığı için karşılaştırmalarda parametrik testler uygulanmıştır. Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) ile ikiden fazla bağımsız grup arasında ölçümlere göre farklılık olup olmadığı belirlenmiş, hangi gruplar arasında farklılık olduğuna ise Tukey Testi (Homojenlik sağlandığında) ve Tamhane Testi (Homojenlik sağlanmadığında) ile bakılmıştır. Homojenlik varsayımını test etmek için Levene Testi ve Brown-Forsythe Testleri kullanılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Vigor indeksleri (VI)

Domates (H-2274) ve (biber) İlıca 256 tohumlarına ait olan Vigor İndeksleri (VI) Tablo 2'de verilmiştir. H-2274 için konsantrasyonlar arasında VI ortalamalarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p<0,05) olduğu görülmüştür. İlıca 256 için de konsantrasyonlar arasında VI ortalamalarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p<0,05) olduğu görülmüştür. Buna göre; H-2274 için konsantrasyon değeri arttıkça VI'nin azaldığını söyleyebiliriz. İlıca 256 için kontrol grubu konsantrasyonundaki VI, %10 konsantrasyonundaki VI'den, %10 konsantrasyonundaki VI ortalaması ise %1 konsantrasyonundaki VI ortalamasından anlamlı derecede yüksektir.

Tablo 2. H-2274 ve İlıca 256 genotiplerinin farklı konsantrasyonlardaki Vigor indeksi (VI) değerleri

Atık su konsantrasyonları (%)	Vigor İndeksi (VI)	
	H-2274	İlıca 256
Kontrol	4365	792
1	3600*	270*
10	1095*	520*
25	0,000	0,00
50	0,000	0,00
75	0,000	0,00
100	0,000	0,00
F	8776,575	2044,84
p	0,000***	0,000***

*Kontrol grubundan farklı olan gruplar (p<0,05) ***p<0,001

F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA).

3.2. Uzunluk ölçümleri (mm)

Tablo 3'de H-2274 ve İlıca 256 tohumlarına ait kök uzunlukları yer almaktadır. H-2274 için konsantrasyonlar arasında kök uzunlukları ortalamalarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p<0,05) olduğu görülmüş, İlıca 256 için de konsantrasyonlar arasında kök uzunlukları ortalamalarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğu görülmüştür (p<0,05). Buna göre; H-2274 için konsantrasyon değeri arttıkça kök uzunluğu ölçüm ortalamalarının azaldığını söyleyebiliriz. İlıca 256 için kontrol grubu konsantrasyonundaki kök uzunluğu ortalaması, %1 ve %10 konsantrasyonundaki kök uzunluğu ortalamalarından anlamlı derecede yüksektir.

Tablo 3. H-2274 ve İlıca 256 fideciklerinin farklı konsantrasyonlardaki kök uzunlukları

Atık su	Kök Uzunlukları (mm)
---------	----------------------

konsantrasyonları (%)	H-2274 Ort.±SS.	İlıca 256 Ort.±SS.
Kontrol	21,71±11,101	9,97±4,356
1	17,45*±6,211	3,73*±1,980
10	7,74*±4,047	4,00*±2,909
25	0,00±0,000	0,00±0,000
50	0,00±0,000	0,00±0,000
75	0,00±0,000	0,00±0,000
100	0,00±0,000	0,00±0,000
F	52,363	27,852
p	0,000*	0,000*

*p<0,05, F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA)

Fark=Tukey Testi, p=Anlamlılık Düzeyi

Tablo 4'te verilmiş olan hipokotil uzunluklarına baktığımızda hem H-2274 hem de İlıca 256 tohumlarının hipokotil uzunluklarının %1 ve %10'luk konsantrasyonlarda kontrole göre anlamlı bir şekilde azaldığı görülmektedir.

Tablo 4. H-2274 ve İlıca 256 fidiciklerinin farklı konsantrasyonlardaki hipokotil uzunlukları

Atık su konsantrasyonları (%)	Hipokotil Uzunlukları (mm)	
	H-2274	İlıca 256
Kontrol	23,23±4,276	8,15±4,240
1	21,56*±4,576	5,55*±1,565
10	6,88*±5,064	8,71±3,429
25	0,00±0,000	0,00±0,000
50	0,00±0,000	0,00±0,000
75	0,00±0,000	0,00±0,000
100	0,00±0,000	0,00±0,000
F	251,894	4,923
p	0,000*	0,000*

*p<0,05, F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA)

Fark=Tukey Testi, p=Anlamlılık Düzeyi

3.3. Yaş ve kuru ağırlık tayinleri

Tablo 5'de H-2274 ve İlıca 256 tohumlarına ait kök yaş ağırlıkları ve kök kuru ağırlıkları bulunmaktadır. H-2274 tohumları için konsantrasyonlar arasında kök yaş ağırlıkları ve kök kuru ağırlıkları ortalamalarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p>0,05) görülmemiştir. İlıca 256 tohumları için konsantrasyonlar arasında kök yaş ağırlıkları ortalamalarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p<0,05) olduğu görülmüş, kök kuru ağırlıkları ortalamalarına göre ise istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p>0,05) görülmemiştir. Buna göre; İlıca 256 için kontrol konsantrasyonundaki kök yaş ağırlığı ortalaması, %1 ve %10 konsantrasyonundaki kök yaş ağırlığı ortalamalarından anlamlı derecede yüksektir.

Tablo 5. H-2274 ve İlıca 256 fidiciklerinin farklı konsantrasyonlardaki kök yaş ve kuru ağırlıkları

Atık su konsantrasyonları (%)	Kök Yaş Ağırlığı (g)		Kök Kuru Ağırlığı (g)	
	H-2274	İlıca 256	H-2274	İlıca 256
Kontrol	0,0007	0,0029	0,0003	0,0003
1	0,0008	0,0014*	0,0003	0,0003
10	0,0006	0,0014*	0,0001	0,0003
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
50	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
75	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
F	3,000	225,00	4,000	0,0000
p	0,125	0,000*	0,079	1,0000

*p<0,05, F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA)

Fark=Tukey Testi, p=Anlamlılık Düzeyi

Tablo 6' da H-2274 ve İlıca 256 tohumları hipokotil yaş ağırlıkları ve hipokotil kuru ağırlıkları yer almaktadır. H-2274 için konsantrasyonlar arasında hipokotil yaş ağırlıkları ve hipokotil kuru ağırlıkları ortalamalarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p<0,05) olduğu görülmüştür. Buna göre; H-2274 için konsantrasyon değeri arttıkça hipokotil yaş ağırlığı ölçüm ortalamalarının azaldığını söyleyebiliriz. Ancak %10 konsantrasyonunda p<0,001 derecesinde anlamlı bir fark göze çarpmaktadır. Kontrol ve %1 konsantrasyonundaki hipokotil kuru ağırlığı ortalamaları ise %10 konsantrasyonundaki hipokotil kuru ağırlığı ortalamasından anlamlı derecede yüksektir. İlıca 256 tohumları için konsantrasyonlar arasında hipokotil yaş ağırlıkları ortalamalarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p<0,05) olduğu görülmüş, hipokotil kuru ağırlıkları ortalamalarına göre ise istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p>0,05) görülmemiştir. İlıca 256 için %1 konsantrasyonundaki hipokotil yaş ağırlığı ortalaması kontrol konsantrasyonundaki yaş ağırlığı ortalamasından düşük iken, %10 hipokotil yaş ağırlığı ortalaması kontrol konsantrasyonundaki hipokotil yaş ağırlığı ortalamasından anlamlı derecede yüksektir.

Tablo 6. H-2274 ve İlıca 256 fidiciklerinin farklı konsantrasyonlardaki hipokotil yaş ve kuru ağırlıkları

Atık su Konsant. (%)	Hipokotil Yaş Ağırlığı (g)		Hipokotil Kuru Ağırlığı (g)	
	H-2274	İlıca 256	H-2274	İlıca 256
Kontrol	0,0107	0,0053	0,0008	0,0008
1	0,0101*	0,0016*	0,0008	0,0008
10	0,0024*	0,0066*	0,0003**	0,0010
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
50	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
75	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
F	6427	219	25	0,118
p	0,000*	0,000*	0,001**	0,891

**p<0,05, *p<0,001, F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA)

Fark=Tukey Testi, p=Anlamlılık Düzeyi

Tablo 7'de H-2274 ve Ilıca 256 tohumları için kotiledon yaş ve kuru ağırlıkları görülmektedir. H-2274 için konsantrasyonlar arasında kotiledon yaş ağırlıkları ortalamalarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p<0,05) olduğu görülmüştür. %1 ve %10'luk konsantrasyonlarda kontrole göre kotiledon yaş ağırlıklarında anlamlı bir azalma bulunmaktadır. Kotiledon kuru ağırlıkları ortalamalarına göre ise istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p>0,05) görülmemiştir. Ilıca 256 tohumları için konsantrasyonlar arasında kotiledon yaş ağırlıkları ve kotiledon kuru ağırlıkları ortalamalarına göre ise istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık (p<0,05) olduğu görülmüştür. Ilıca 256 için %1 konsantrasyonundaki kotiledon yaş ve kuru ağırlığı ortalamaları, kontrol ve %10 konsantrasyonundaki yaş ve kuru ağırlığı ortalamalarından anlamlı derecede düşüktür.

Tablo 7. H-2274 ve Ilıca 256 fidiciklerinin farklı konsantrasyonlardaki kotiledon yaş ve kuru ağırlıkları

Atık su Konsant. (%)	Kotiledon Yaş Ağırlığı (g)		Kotiledon Kuru Ağırlığı (g)	
	H-2274	İlıca 256	H-2274	İlıca 256
Kontrol	0,0047	0,0070	0,0008	0,0019
1	0,0042*	0,0000*	0,0008	0,0000**
10	0,0035*	0,0078	0,0006	0,0020
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
50	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
75	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
F	109,000	164,079	4,000	11,317
p	0,000*	0,000*	0,079	0,009**

**p<0,01, *p<0,001, F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA)

Fark=Tukey Testi, p=Anlamlılık Düzeyi

4. Tartışma ve Sonuç

Sağlık ve çevre açısından risk oluşturan ağır metaller Zn, Cu, Ni, As, Cd, Hg, Cr, Pb'dur (1, 20). Çalışmamızda kullandığımız boya atık suyunun içeriğinde de bu metallerin çoğu bulunmaktadır (Tablo 1).

Bazı elementler bitki gelişimi için mutlak gerekli iken Cd, Pb, As, Hg, Cr, Fe gibi bazı elementler bitki gelişimi için mutlak gerekli iken yüksek miktarlarda bulunduğu Cd, Pb, As, Hg ve Cr gibi bazı elementlerin gösterdiği şekilde toksik etkileri de görülebilmektedir (22, 23). Bu çalışmada elde edilen bulgular da kullanılan atık suyun, özellikle yüksek

konsantrasyonlarda (% 25, % 50, %75 ve %100) tohum çimlenmesi ve bitki gelişimini olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymuştur.

Yukarıda bahsedilen ağır metallerin yanı sıra test ettiğimiz atık suda Mg ve Mn'de bulunmaktadır bulunmaktadır (Tablo 1). (24)'de belirtildiği üzere Mg'nin bitki beslenmesinde önemli olduğu bilinmektedir.

Mg klorofilin merkez atomudur ve fotosentezde önemli rol oynayan, yaşamın devamlılığını sağlayan en önemli elementlerden biridir. Ayrıca ATP yapımında yardımcı faktördür (25). Bununla birlikte Mg'nin bitkilerde olumsuz etkileri de bulunmaktadır (26, 27).

(28)'nin yaptığı çalışmada aşırı magnezyumun bazı toksisite semptomlarına neden olduğu rapor edilmektedir. Çalışmada kullandığımız atık suyun içeriğinde 15,914 ppm düzeyinde Mg bulunmaktadır. Ancak bu miktarlardaki Mg'nin bitkiler üzerinde toksik etki oluşturduğuna dair literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu bize, çalışmamızda elde ettiğimiz yüksek konsantrasyonlardaki (% 25, % 50, %75 ve %100) atık suyun bitki tohum çimlenmesi ve bitki gelişimine dair olumsuz etkilerin nedeninin Mg'nin dışındaki diğer metallerin toksik etkisi olduğunu düşündürmektedir.

Optimum bitki büyümesi, gelişimi ve üretkenliği için gerekli olan Mn, Zn, Cu, Ni, Fe, Mo gibi ağır metal iyonlarının yanında Co gibi bitkinin yapısında belirli oranlarda bulunan ancak bitkinin büyüme ve gelişmesinde zorunlu olarak gerek duymadığı ağır metal iyonlarının varlığı, birçok enzim ve proteinin fonksiyonlarını kolayca etkileyerek metabolizmayı durdurabilir ve optimumun üzerinde fitotoksitesite gösterebilirler (25). Bizim çalışmamızda kullandığımız atık suyun içerisinde de en çok bulunan ağır metaller Mn, Zn ve Cu'dur.

Gassama vd., 2015'nin yaptığı çalışmada, düşük konsantrasyonlardaki (<25%) atık su, ürünlerin büyümesini ve gelişmesini daha az engellerken, yani daha düşük bir toksisiteye sahipken, daha yüksek konsantrasyonlarda (%50 - %100) atık su pirinç çimlenme sürecinde büyüme ve gelişmeyi azaltacak kadar yüksek fitotoksitesite gösterdiği belirtilmektedir (29).

Kuru ve yaş ağırlıkları parametrelerine baktığımızda (Tablo 5), Ilıca 256 tohumlarında %1 ve %10'luk konsantrasyonların kök yaş ağırlıklarını kontrole göre anlamlı bir şekilde düşürdüğü görülmektedir. Ertekin ve Bilgen'in yaptıkları çalışmada kök yaş ağırlığı üzerine ağır metallerin ve dozların önemli etkisi olduğu vurgulanmaktadır (30).

%1 ve %10'luk konsantrasyonlarda H-2274 tohumlarının hipokotil yaş ağırlığının kontrole göre anlamlı bir şekilde azaldığı görülmektedir (Tablo 6). Zea mays (mısır) bitkisine uygulanan bazı ağır metal konsantrasyonlarının hipokotil yaş ağırlıklarını kontrole göre azalttığı rapor edilmektedir (30).

Boya atık suyunun içeriğinde bulunan ağır metaller bitkilerin gelişimlerine olumlu yöndeki katkılarının yanında olumsuz etkiler de göstermektedir. Bu çalışmada da kullanılan atık suyun özellikle % 25 ve üzeri konsantrasyonlarda hem domates hem de biber tohumlarının gelişimlerini engellendiği ortaya konmuştur. Bu olumsuz etkiler tohum çimlenmesinin yanında kök ve hipokotil oluşumu ve gelişimleri üzerinde de görülmüştür. Söz konusu olumsuz etkide atık suda en fazla miktarlarda bulunan Mg, Mn, Zn ve Cu'nun daha etkin rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Literatürde de bu elementlerin bitkiler üzerindeki toksik etkilerinin varlığı çalışmamızdaki bu sonuçları destekler niteliktedir.

Teşekkür

Çalışmada kullanılan tohumların temin edildiği T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Eskişehir Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Çavuşoğlu, K., Acar, A., Yalçın, E. 2018. Cıva (Hg) ağır metal iyonunun Allium cepa L.(soğan)'da teşvik ettiği fizyolojik, sitogenetik ve anatomik değişimlerin araştırılması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(4), 887-892.
- [2] Praveena, M., Sandeep, V., Kavitha, N., Jayantha Rao, K. 2013. Impact of tannery effluent, chromium on hematological parameters in a fresh water fish, Labeo Rohita (Hamilton). Research Journal of Animal, Veterinary and Fishery Sciences, 1(6), 1-5.
- [3] Morais, S., Costa, F. G., Pereira, M. D. L. 2012. Heavy metals and human health. Environmental health-emerging issues and practice, 10(1), 227-245. Acar, B. Ç., Acar, M. B. 2022. Kimyasal yöntemlerle atık sulardan ağır metal giderimi. Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi, 3(1), 1-13.
- [4] Saxena, G., Bharagava, R. N. 2017. Organic and inorganic pollutants in industrial wastes; ecotoxicological effects, health hazards, and bioremediation approaches. ss 23-56. Bharagava R. N., ed. 2017. Environmental Pollutants and their Bioremediation Approaches, CRC Press, Boca Raton 472s.

- [5] Erkuş, A., Oygün, E., Türkmenoğlu, M., Aldemir, A. 2018. Boya endüstrisi atıksularının karakterizasyonu. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23(3), 308-319.
- [6] Kant, R. 2012. Textile dyeing industry an environmental hazard. Natural Science, 4(1), 5.
- [7] Filipović, J., Grčić, I., Bermanec, V., Kniewald, G. 2013. Monitoring of total metal concentration in sludge samples: Case study for the mechanical-biological wastewater treatment plant in Velika Gorica, Croatia. Science of the total environment, 447, 17-24.
- [8] Krogmann, U., Boyles, L. S., Martel, C. J., McComas, K. A. 1997. Biosolids and sludge management. Water environment research, 69(4), 534-550.
- [9] Doğaroğlu, Z.G. 2018. Kadmiyum, kurşun ve çinko metallerinin marul (Lactuca sativa) tohumlarının çimlenme özellikleri üzerine etkisi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 23(2), 299-308.
- [10] Asri, F. Ö., & Sönmez, S. (2006). AĞIR METAL TOKSİSİTESİNİN BİTKİ METABOLİZMASI ÜZERİNE ETKİLERİ. Derim, 23(2), 36-45.
- [11] Nordberg G.F., Nordberg M. Biological monitoring of cadmium. 1988. Clarkson T.W., Friberg L., Nordberg G.F., Sager P.R., ed. 1988. Biological monitoring of toxic metals, Plenum, New York, 151.
- [12] Yıldız, M., Uruşak, B. ve Terzi, H. 2010. Türkiye'de ekimi yapılan bazı arpa çeşitlerinin erken fide evresinde krom (VI) toleransı üzerine bir ön çalışma. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1), 1-10.
- [13] Babaoğlu, M., Gürel, E. ve Özcan, S. 2001. Bitki Biyoteknolojisi I: Doku Kültürü ve Uygulamaları, Selçuk Üniversitesi Yayınları, 374.
- [14] Başaran, D. 1990. Bitki Doku Kültürleri, Dicle Üniversitesi, 208.
- [15] Çatak, E., Çolak, G., & Caner, N. (2010). Oryza sativa L. ve Capsicum annum L.'nin bazı fizyolojik ve makromorfolojik gelişim parametreleri üzerine silisyum'un etkisi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 26(4), 351-361.
- [16] Abdul - Baki, A.A., Anderson, J.D. 1973. Vigor determination in soybean seed by multiple criteria. Crop Science, 13(6), 630-633.
- [17] Karaer, M., Gülümser, E., Başaran, U. ve Mut, H. 2021. Artırılmış atık su seviyelerinin mürdümük

- (*Lathyrus sativus* L.) genotiplerinin çimlenme gelişimine etkisi. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 5(4), 919-926.
- [18] Hu, J., Zhu, Z.Y., Song, W.J., Wang, J.C., and Hu, W. M. 2005. Effects of sand priming on germination and field performance in direct-sown rice (*Oryza sativa* L.). *Seed Science and Technology*, 33(1), 243-248.
- [19] Tatar, N., Öztürk, Y. ve Çarpıcı, E.B. 2018. NaCl ön uygulamalarının farklı tuz seviyelerinde çok yıllık çim (*Lolium perenne* L.)'in çimlenme özellikleri üzerine etkileri. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 5(1), 28-33.
- [20] Lambert, M., Leven, B. A., Green, R. M. 2000. New methods of cleaning up heavy metal in soils and water. *Environmental science and technology briefs for citizens*, 7(4), 133-163.
- [21] Güvercin, D. 2017. Sorgum tohumlarında ağır metal stresi etkilerinin hafifletilmesinde bazı bitki büyüme regülatörlerinin rolü. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(3), 886-893.
- [22] Yıldız, N. 2004. Toprak ve Bitki Ekosistemindeki Ağır Metaller. ZT-531. Yüksek Lisans Ders Notları. Erzurum.
- [23] Barlas, N. T. 2023. Functions of magnesium in plants. 75-80.. Bengisu G., ed. 2023. *Planning topics in agriculture*. Iksad Publications, Türkiye, 145s.
- [24] Guo, W., Chen, S., Hussain, N., Cong, Y., Liang, Z., Chen, K. 2015. Magnesium stress signaling in plant: Just a beginning. *Plant Signaling & Behavior*, 10(3), e992287.
- [25] Bolat, İ., & Kara, Ö. (2017). Bitki besin elementleri: Kaynakları, işlevleri, eksik ve fazlalıkları. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19(1), 218-228.
- [26] Bradshaw, H. D. 2005. Mutations in CAX1 produce phenotypes characteristic of plants tolerant to serpentine soils. *New Phytologist*, 167(1), 81-88.
- [27] Selvaraj Venkatesan, S. V., Sankar Jayaganesh, S. J. 2010. Characterisation of magnesium toxicity, its influence on amino acid synthesis pathway and biochemical parameters of tea. *Research Journal of Phytochemistry*, 4(2), 67-77.
- [28] Anjum, N. A., Singh, H. P., Khan, M. I. R., Masood, A., Per, T. S., Negi, A., Ahmad, I. 2015. Too much is bad—an appraisal of phytotoxicity of elevated plant-beneficial heavy metal ions. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 3361-3382.
- [29] Gassama, U. M., Puteh, A. B., Abd-Halim, M. R., Kargbo, B. 2015. Influence of municipal wastewater on rice seed germination, seedling performance, nutrient uptake, and chlorophyll content. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 18, 9-19.
- [30] Ertekin, E. N. ve Bilgen, M., 2021. Bazı ağır metallerin at dişi mısır (*Zea mays* L.)'da çimlenme ve erken fide gelişimi üzerine etkileri. *Biological Diversity and Conservation*, 14(2), 198-207.

Yaşam Çözümlemesinde ROC Eğrileri ve Bir Uygulama

Şeyma SERTKAYA¹, Duru KARASOY^{2*}

^{1,2}Hacettepe Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye

(Alınış / Received: 05.08.2024, Kabul / Accepted: 25.10.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

ROC en yakın komşu tahmin edicisi,
ROC Kaplan-Meier,
ROC yaşam,
Yaşam çözümlemesi,
Zamana bağlı ROC eğrileri

Öz: Yaşam verisi, yaşam sürelerini ve olayın gerçekleşip gerçekleşmediğini gösteren durumu içerir. Yaşam verilerinin analizinde kullanılan alıcı işlem karakteristiği (ROC) eğrileri olayı yaşayanlar ile yaşamayanlar arasında ne kadar iyi ayırım yaptığını belirleyip doğru eşik değerini seçmeyi sağlar. Yaşam çözümlemesinde süre söz konusu olduğu için durum değişebileceğinden klasik ROC eğrileri doğru sonuçlar vermez. Bu nedenle zamana bağlı ROC eğrileri üzerinde araştırmalar yapılarak yeni yöntemler geliştirilmiş ve ROC(t) ile gösterilen ROC eğrisi tahminleri önerilmiştir. Bu makalede yaşam çözümlemesi için kullanılan ROC eğrisi tahmin edicileri yöntemlerinden kümülatif duyarlılık ve dinamik seçicilik (CD), olay duyarlılığı ve dinamik seçicilik (ID), olay duyarlılığı ve statik seçicilik (IS) ve son olarak naive tahmin edicisi tanıtılmıştır. Bu tahmin edicilerin uygulanabilirliğini göstermek için gerçek veri olan serviks kanseri verisi üzerinde uygulama yapılmıştır. Bu veri için CD1 ile CD2 benzer sonuçlar vermiştir. Ayrıca CD5 ile CD6 da benzer sonuçlar vermiştir. ID1 en düşük sınıflandırma performansına sahipken CD4, 10. aydan itibaren iyi bir sınıflandırma performansı göstermiştir.

ROC Curves in Survival Analysis and an Application

Keywords

ROC nearest neighbor estimator,
ROC Kaplan-Meier,
ROC survival,
Survival analysis,
Time dependent ROC curves

Abstract: The survival data includes survival times and status indicating whether the event occurred. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves used in the analysis of survival data determine how well they discriminate between those who experience the event and those who do not, allowing to choose the correct cut-off value. Since time is involved in survival analysis and the status may change, classical ROC curves do not give accurate results. For this reason, new methods have been developed by researching time-dependent ROC curves and ROC curve estimates denoted by ROC(t) have been proposed. Among the ROC curve estimator methods used for survival analysis in this paper, cumulative sensitivity and dynamic specificity (CD), incident sensitivity and dynamic specificity (ID), incident sensitivity and static selectivity (IS) and finally the naive estimator is introduced. To demonstrate the applicability of these estimators, an application was made on real data, cervical cancer. For the data, CD1 and CD2 gave similar results. Additionally, CD5 and CD6 also gave similar results. While ID1 had the lowest classification performance, CD4 showed good classification performance from the 10th month.

1. Giriş

Yaşam çözümlemesinde (survival analysis), ilgilenilen olayın gerçekleşip gerçekleşmediği ve ilgilenilen olay gerçekleşene kadar geçen süre (survival time - failure time) ile ilgilenilir. Birimlerin bir kısmı ilgilenilen olayı yaşamayabilir. Bu durumda yaşam çözümlemesinde

iki durum söz konusu olur: İlgilenilen olayın gerçekleşmesi (başarısızlık - failure) ve ilgilenilen olayın gerçekleşmemesi (durdurulmuş - censored) [1, 2, 3].

Özellikle hastalıklarda doğru tanı ve tedavinin uygulanabilmesi için testlerin olayı yaşayan birimleri

ve olayı yaşamayan birimleri ayırt etme yeteneğinin yüksek olması çok önemlidir. Testlerin ayırt etme yeteneği, duyarlılık (sensitivity) ve seçicilik (specificity) gibi doğruluk özetleri ve kesikli veya sürekli belirteç (marker-covariate) ölçümlerine sahip değişkenler ile belirlenir. Duyarlılık, gerçekte ilgilenilen olayı yaşayan birimlerin olayı yaşadığının tahmin edilmesi (True Positive - TP), seçicilik değeri de gerçekte ilgilenilen olayı yaşamayan birimlerin olayı yaşamadığının tahmin edilmesi (True Negative - TN) olarak tanımlanır. Belirtecine ilgilenilen olaydaki riski değerlendirme performansı, birimlerin gelecekteki bir olay durumu için yüksek veya düşük riskli olarak ne kadar iyi ayırdığını ifade eder. Belirteç skoru araştırmacılara ilgilenilen olaydaki riski belirleme konusunda rehberlik ederken, düşük riskli birimleri ilgilenilen olaydan, yan etkilerinden ve gereksiz maliyetlerden korur.

Belirteç değeri, puan verilerek, sürekli ölçüm değeri ile ya da hastalığı belirleyen faktörlerin regresyon analizi ile belirlenebilir. Ölüm oranı ya da ilgilenilen olaydaki istenmeyen durumu en fazla etkileyen değer de belirteç olarak ele alınabilir [2, 4, 5, 6].

Yaşam verileri ile çalışmanın zorluğu, durdurmanın (censoring) varlığıdır. Bazı durumlarda, çalışma sona erdiği halde bazı birimlerde olay gerçekleşmediğinde veya bazı birimler çalışmadan ayrıldığında durdurma oluşur. Böyle durumlarda bu birimlerin kesin olay zamanı gözlenmemiş olur ve bu birimler durdurulmuş gözlem olarak ifade edilir [3, 6, 7].

Durdurulmuş gözlemler analiz yapmayı zorlaştırdığı için klasik modeller geliştirilerek yeni modeller elde edilmiştir. Amico ve arkadaşları (2021), bu çalışmaların Boag (1949), Berkson ve Gager (1952), Farewell (1977, 1982), Yakolev ve arkadaşları (1996) ile başladığını belirtmişlerdir [3].

Yaşam çözümlemesinde ilgilenilen olayın gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini doğru tahmin etmek için ROC eğrilerinden yararlanılır. ROC eğrileri, bir tanı belirtecine doğru sınıflandırılmasını değerlendirmek için kullanılan çok popüler grafiksel bir yöntemdir. ROC eğrisine ilişkin genel tartışmalar Swets ve Pickett (1982), Hanley (1989), Begg (1991), Zweig ve Campbell (1993) ve Pepe, Leisenring ve Rutter (2000) tarafından yapılan çalışmalarda bulunabilir [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Yaşam çözümlemesinde ROC eğrileri, yaşam fonksiyonları $S_0(c) = P(X > c | D = 0)$ ve $S_1(c) = P(X > c | D = 1)$ ampirik dağılımlarını kullanarak parametrik olmayan yöntemle tahmin edilir. Burada D durum göstergesidir. Olay (başarısızlık) için D=1 ve kontrol (durdurulmuş) için D=0 değerlerini alır. ROC için düzgün (smooth) parametrik olmayan ve yarı parametrik tahmin ediciler Zhou, Hall ve Shapiro (1997) ve Metz, Herman ve Shen (1998) tarafından önerilmiştir [14, 15].

Bir belirtecine zamana bağlı bir olayın meydana gelmesini tahmin etme yeteneğinin incelenmesi genellikle klasik bir ROC eğrisi analizi kullanılarak gerçekleştirilir. Uygulamada, zaman sabittir ve $[t_0, t_{max}]$ ile belirtilir, burada t_0 genellikle dahil edilme zamanıdır ($t_0 = 0$) ve t_{max} çalışma süresidir. Birimler, $[t_0, t_{max}]$ içinde olayı yaşayanlar ve yaşamayanlar arasında bölünmüştür. Standart ROC eğrisi yaklaşımı daha sonra belirtecine t_{max} zaman noktasında birimleri ayırt etmede ne kadar iyi olduğunu değerlendirmek için uygulanabilir. Ancak, böyle bir analiz yalnızca olay durumunun o anda bilindiği birimleri içerebilir; olaya kadar geçen süre olan t_{max} değerinden önce olan durdurulmuş birimler analizden çıkarılmalıdır.

Yaşam verilerinde durdurulmuş gözlemlerde ilgilenilen olayın kesin durum bilgisi bilinmediği için klasik ROC eğrileri doğru sonuçlar vermez. Bu nedenle klasik yaklaşımdan daha etkili olduğu belirtilen zamana bağlı ROC eğrisi yaklaşımı geliştirilmiştir [5, 16].

Etzioni ve arkadaşları (1999) ve Slate ve Turnbull (2000), olay grubunu ilgilenilen olayın zamanına göre tabakalandırarak olay duyarlılığını ve sabit takip süresi boyunca olayı yaşamayan birimler ile statik seçicilik tanımlamaları yapmışlardır [17, 18]. Heagerty, Lumley ve Pepe (2000), yaşam fonksiyonunun Kaplan-Meier (KM) tahmin edicisini ve belirtecine ampirik dağılım tahmin edicisini kullanarak, olay duyarlılığı ve dinamik seçiciliğe dayalı zamana bağlı ROC eğrisi için parametrik olmayan bir yaklaşım önermişlerdir [2]. Heagerty ve Zheng (2005), belirteç olarak birkaç değişkenin doğrusal bir kombinasyonunu kullanarak zamana bağlı ROC eğrisi için yarı parametrik bir yaklaşım çalışmışlardır [19, 20].

Zamanla değişen olay çalışmalarında, birimlerin olay durumu zamana bağlı olduğundan ROC eğrilerinin zamana bağlı genişletilmeleri önerilmiştir. Uygulamada, bu eğrilerin hesaplanması durdurmanın varlığı nedeni ile açık değildir [13]. Bu çalışmada da bu soruna çözüm getirmek amacı ile yaşam çözümlemesinde ROC eğrilerini tahmin etmek için kullanılan yöntemler ele alınmıştır. Bu çalışmada amaç, zamana bağlı verilerin söz konusu olduğu yaşam çözümlemesinde zamanla değişen duyarlılık ve seçicilik değerleri ile doğru tanının (hasta - hasta değil) koyulmasına yardım eden ROC eğrisinin kullanımını göstermek, zamanla değişen duyarlılık ve seçicilik değerlerini elde etmek için literatürde verilen tahmin edicileri tanıtmak ve bu tahmin edicilerin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla gerçek bir veri seti olan serviks kanseri verisi ile bir uygulama yapmak ve elde edilen sonuçları yorumlamaktır.

Tanı testleri ve ROC eğrileri

Araştırmada ilgilenilen olay için yapılan testlerde, belirteç değerinden daha büyük sonucu olan birimler

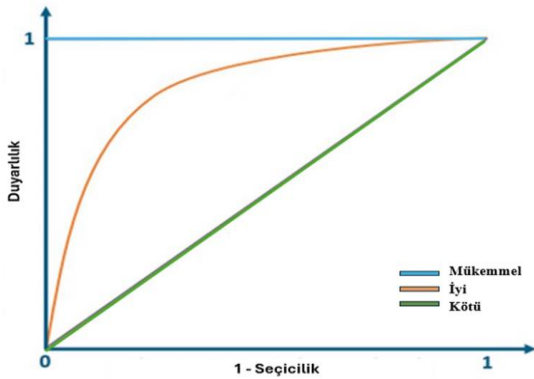
ya da test sonucu pozitif olan birimler “olay” grubuna, belirteç değerinden daha küçük sonuç alan birimler ya da test sonucu negatif olan birimler “kontrol” grubuna dahil edilir. Duyarlılık ve seçicilik değerleri belirtece göre belirlenen eşik değerine göre değişir [4, 5]. En yüksek duyarlılık ve seçicilik değerini veren belirteç değerinin (bu değer eşik değer - cut off olarak ifade edilir) altındaki belirteç değerine sahip olan birimler kontrol grubuna (olay gerçekleşmedi), üstündekiler ise ilgilenilen olay grubuna atanır.

ROC eğrisi, belirli bir belirtece karşılık gelen tüm olası eşik değerleri için yanlış pozitif oranlarına (1-seçicilik) karşı, doğru pozitif oranlarını (duyarlılık) kullanarak çizilen bir grafikdir (Şekil 1). Bu yüzden ROC, tüm olası eşik değeri noktalarına ilişkin olarak ilgili belirtecin duyarlılık ve seçicilik arasındaki değişimi gösterir. Bir c eşiği ve X belirteci (sürekli açıklayıcı değişken) için duyarlılık ve seçicilik sırasıyla,

$$\text{Duyarlılık}(c)=P(X>c \mid D=1) \quad (1)$$

$$\text{Seçicilik}(c)=P(X<c \mid D=0) \quad (2)$$

olarak ifade edilir. Burada c eşik değeri, X'in aldığı tüm olası değerler olabilir [13, 21].



Şekil 1. ROC Eğrisi

X belirtecinin olay ve kontrol grubunu ayırım performansı $(0,1) \times (0,1)$ aralığında çizilen ROC eğrileri ile ölçülür. Teorik olarak mükemmel bir tanı belirtecinin ROC eğrisi, birim karenin sol köşesinin en üstünden (yanlış pozitif oranı=0 ve doğru pozitif oranı=1) geçerken, bilgilendirici olmayan, kötü belirtece sahip bir ROC eğrisi köşegen çizgisindedir (yanlış pozitif oranı=doğru pozitif oranı). ROC eğrisinin altında kalan alan (Area Under Curve - AUC), X belirtecinin olay ve kontrol gurubunu doğru sınıflandırma performansını gösterir.

AUC, bir tanı belirtecinin gerçekte olayı yaşayanları (hasta olanları) olay (hasta) grubuna, olayı yaşamayanları (hasta olmayanları) ise kontrol (hasta değil) grubuna ayırım yeteneğini gösteren ve en yaygın kullanılan bir ölçüdür. AUC değeri 0.5 (tamamen bilgilendirici olmayan, kötü belirteç) ile 1 (mükemmel belirteç) arasında değerler alır. AUC, rastgele seçilen

olayı yaşayan bir birimin, rastgele seçilen olayı yaşamayan bir birimden daha yüksek bir belirteç değerine sahip olma olasılığı olarak yorumlanabilir [2, 3, 4, 5, 13, 20, 22].

Yaşam çözümlemesinde ROC eğrileri

Yaşam çözümlemesinde ilgilenilen olay hastalığın tedavi edilmesi (iyileşme) olduğunda, hastalığı atlatan birimlerin tekrar hastalığa yakalanması (hastalıklarının nüks etmesi - olay) durumunda belirteç kullanarak birimlerden hangilerinin hastalıklarının nüks edeceğini, hangilerinin nüks etmeyeceğini tahmin etmek çok önemlidir. Bu konuda Gönen ve Heller (2005), Zhang ve Shao (2018), Beyene ve arkadaşları (2019) çalışmalar yapmışlardır [23, 24, 25].

Standart ROC eğrisi analizinde, birimlerin durumu belirtecin ölçülen bir değeri ile tanımlanır ve bu değer çalışma periyodu boyunca sabit varsayılır. Zamana bağlı ROC eğrisi analizinde ise bir birimin durumu her zaman noktasında gözlemlenir, farklı zaman noktalarında ROC eğrisi elde edilir ve belirtecin sınıflandırma yeteneği farklı zamanlar için karşılaştırılabilir [5].

T_i , i. birimin başarısızlık süresi, X_i , i. birim için belirteç değeri, C_i durdurma süresi, $Z_i = \min(T_i, C_i)$ yaşam süresi, δ_i ; $\delta_i = 1$ ($T_i < C_i$ ise) ve $\delta_i = 0$ ($T_i > C_i$ ise) değerlerini alan durdurma göstergesi olsun. $D_i(t)$ sayma süreci (durum göstergesi) olarak kullanılır. $T_i \leq t$ ise $D_i(t) = 1$ olduğu durumda t zamanından önce olayın gerçekleştiğini belirtirken tersi durumda $T_i > t$ ise $D_i(t) = 0$ olduğunda t zamanına kadar olayın gerçekleşmediğini gösterir [2, 5].

ROC eğrisi, duyarlılık ve (1-seçicilik) tahminlerinden yararlanarak X_i ile D_i arasındaki ilişkiyi gösterir. Hastalık durumu zamana bağlı olduğunda duyarlılık ve seçicilik değerleri de zamana bağlı olurlar ve aşağıdaki gibi tanımlanırlar:

$$\text{Duyarlılık}(c, t) = P\{X>c \mid D(t)=1\} \quad (3)$$

$$\text{Seçicilik}(c, t) = P\{X\leq c \mid D(t)=0\}. \quad (4)$$

Bu tanımlardan yola çıkarak t. zamandaki ROC eğrisi, ROC(t) ile gösterilir. Herhangi bir t zamanına karşılık gelen ROC eğrisi, c eşik değerleri için 1- Seçicilik(c, t) değerine karşı Duyarlılık(c, t) değerleri ile çizilir.

Heagerty ve Zheng (2005), durdurulmuş olay süresi için yukarıda verilen zamana bağlı duyarlılık ve seçiciliği tahmin etmek için üç farklı tanımlama önermişlerdir. İlki kümülatif duyarlılık ve dinamik seçicilik (cumulative sensitivity and dynamic specificity - CD), ikincisi olay duyarlılığı ve dinamik seçicilik (incident sensitivity and dynamic specificity -

ID) ve üçüncüsü olay duyarlılığı ve statik seçiciliktir (incident sensitivity and static specificity - IS) [5, 19].

Kümülatif duyarlılık ve dinamik seçicilik

Kümülatif duyarlılık ve dinamik seçicilik (CD) tanımlamasında herhangi bir sabit t zamanında tüm birimler, t zamanındaki önem durumuna göre olay grubu ya da kontrol grubu olarak sınıflandırılır. Her birim, başarısızlık süresine göre kontrol grubu (başarısızlık süresi hedef t zamanından büyükse) ve olay grubu (başarısızlık süresi hedef t zamanına eşit ve daha küçükse) olarak katkı sağlar. Kümülatif duyarlılık, t zamanından önce olayı yaşayan birimler arasında bir birimin c eşik değerinden daha büyük bir belirteç değerine sahip olma olasılığıdır. Dinamik seçicilik, t zamanından sonra olayı yaşamayan birimler arasında bir birimin c eşik değerinden daha küçük ya da eşit belirteç değerine sahip olma olasılığıdır.

Literatürde, CD tanımlamaları altında on tahmin etme yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemler CD1, ..., CD8 şeklinde sıralanmıştır. CD8 tanımlaması altında üç tahmin etme yöntemi verilmiştir.

CD1: Heagerty ve arkadaşları (2000), zamana bağlı duyarlılık ve seçicilik değerlerini tahmin etmek için yaşam fonksiyonunun KM tahmin edicisini kullanmışlardır (CD1). KM tahmin edicisi yaşam fonksiyonunu tahmin etmek için durdurulmuş gözlemlerin dahil edildiği verilerdeki tüm bilgileri kullanır. t zamanında duyarlılık ve seçicilik tahmini, X belirtecinin dağılım fonksiyonu ve KM tahmin edicisinin birleşimi ile verilir.

Sırasıyla, KM tahmin edicisi, duyarlılık ve seçicilik değerleri aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\hat{S}_{KM}(t) = \prod_{s \in T_n, s \leq t} \left\{ 1 - \frac{\sum_j 1(Z_j = s) \delta_j}{\sum_j 1(Z_j \geq s)} \right\}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Duyarlılık}(c, t) &= \hat{P}_{KM}\{X > c | D(t) = 1\} \\ &= \frac{\{1 - \hat{S}_{KM}(t | X > c)\} \{1 - \hat{F}_X(c)\}}{\{1 - \hat{S}_{KM}(t)\}}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Seçicilik}(c, t) \hat{P}_{KM} &= X \leq c | D(t) = 0 \\ &= \frac{\hat{S}_{KM}(t | X \leq c) \hat{F}_X(c)}{\hat{S}_{KM}(t)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Burada, $\hat{F}_X(c) = \sum 1(X_i \leq c) / n$ eşitliği ile elde edilir.

Bu basit tahmin edicinin problemlerinden biri duyarlılık ya da seçicilik değerlerinin monotonluğu garanti etmemesidir ve [0, 1] ile sınırlı olmamasıdır. Bu durum ROC(t)'nin [0, 1] x [0, 1] aralığının dışına düşmesine neden olur. Bunun sebebi koşullu yaşam fonksiyonu tahminlerinin c değerine göre değişmesinden kaynaklanır. CD1 tahmin edicisinin bir

diğer problemi ise belirtece bağlı durdurmaya karşı sağlam olmamasıdır; ancak durdurma genellikle belirtece bağlıdır. Bu nedenle, olay zamanı ve durdurma zamanının bağımsızlığı varsayılmaz. Bu varsayım, uygulamada ihmal edilebilir [2, 5, 26].

CD2: Heagerty ve arkadaşları (2000), CD1 tahmin edicilerinin dezavantajlarını iki değişkenli yaşam fonksiyonuna dayalı alternatif bir yaklaşım geliştirerek modifiye etmişlerdir (CD2). Bu metodoloji Akritas (1994) tarafından gösterilen (X, T) iki değişkenli dağılımının en yakın komşu tahmin edicisi kullanılarak geliştirilmiştir [2].

Akritas (1994), koşullu yaşam olasılığı için ağırlıklı KM tahmin edicisi olarak adlandırılan ve Eşitlik (8)'de verilen tahmin edicinin kullanılmasını önermiştir.

$$\begin{aligned} &\hat{S}_{\lambda_n}(t | X = X_i) \\ &= \prod_{s \in T_n, s \leq t} \left\{ 1 - \frac{\sum_j K_{\lambda_n}(X_j, X_i) 1(Z_j = s) \delta_j}{\sum_j K_{\lambda_n}(X_j, X_i) 1(Z_j \geq s)} \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Bu eşitlikteki $K_{\lambda_n}(X_j, X_i)$, λ_n düzgünleştirme parametresine bağlı çekirdek fonksiyondur [27]. Akritas (1994), tahmin edicisinin tutarlılığını sağlamak için yeterli olan λ_n için uygulamada $\lambda_n = O(n^{-1/3})$ kullanılmasını önermiştir [2, 5, 27, 28]. Song ve Zhou (2008) tarafından ortak değişkenler ve ID tanımlaması da eklenerek bu tahmin edici genişletilmiştir [2, 5].

Duyarlılık ve seçicilik tahminleri aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$\begin{aligned} \text{Duyarlılık}(c, t) &= \hat{P}_{\lambda_n}\{X > c | D(t) = 1\} \\ &= \frac{[1 - \hat{F}_X(c) - \hat{S}_{\lambda_n}(c, t)]}{1 - \hat{S}_{\lambda_n}(t)}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{Seçicilik}(c, t) &= \hat{P}_{\lambda_n}\{X \leq c | D(t) = 0\} \\ &= 1 - \frac{\hat{S}_{\lambda_n}(c, t)}{\hat{S}_{\lambda_n}(t)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Burada $\hat{S}_{\lambda_n}(t) = \hat{S}_{\lambda_n}(-\infty, t)$ ile tanımlıdır [2, 27]. Bu verilen duyarlılık ve seçicilik tahminleri belirteç için ROC eğrisi tahminleri üretecektir. Duyarlılık ve seçicilik değerleri monoton ve [0,1] ile sınırlıdır. CD1'in aksine parametrik olmayan yöntem olan CD2, yarı parametrik yöntem kadar etkilidir [5].

CD3: Chambless ve Diao (2006), KM benzeri tahmin edici geliştirerek, t zamanından önce durdurulmuş birimlerin t zamanındaki olay durumu bilinmediğinde zamana bağlı duyarlılık, seçicilik ve AUC tahmin edicileri önermişlerdir (CD3) [29]. Blanche ve arkadaşları (2013) hesaplama kolaylığı için bu tahmin ediciye bazı düzenlemeler yapmışlardır [28]. Sıralı

gözlenen olay süreleri $s_0 = 0 < s_1 < s_2 < \dots < s_{m(t)}$, s_k , k. gözlemlenen sıralı olay süresi ve $s_{m(t)}$ hedeflenen t zamanından önce en son gözlemlenen olay süresi olsun. Duyarlılık ve seçicilik sırasıyla aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\text{Duyarlılık}(c, t) = \frac{\sum_{k=1}^{m(t)} I(X_{d(k)} > c) \{ \hat{S}(s_{k-1}) - \hat{S}(s_k) \}}{1 - \hat{S}(s_{m(t)})}, \quad (11)$$

$$\text{Seçicilik}(c, t) = \frac{\hat{F}_X(c) - \sum_{k=1}^{m(t)} I(X_{d(k)} \leq c) \{ \hat{S}(s_{k-1}) - \hat{S}(s_k) \}}{\hat{S}(s_{m(t)})}. \quad (12)$$

Burada $d(k)$, s_k zamanında olayı yaşayan birimlerin indeksini gösterir. $\hat{S}(\cdot)$, t olay zamanı için yaşam fonksiyonunun KM tahmin edicisidir [5, 28].

CD1'in aksine bu duyarlılık tahmin edicisi [0, 1] aralığında monotonudur. Ancak seçicilik tahmin edicisi monoton değildir ve [0, 1] aralığında sınırlı olması gerekmez.

CD3 tahmin edicisinin avantajı duyarlılığın monoton olması ve [0, 1] aralığında sınırlı olmasıdır. Bir diğer avantajı CD2'nin aksine herhangi bir düzgünleştirme parametresi içermemesidir [5, 28, 29].

CD4: CD1, $X > c$ ile tanımlı alt küme altında KM yöntemini kullanarak koşullu yaşam fonksiyonlarını tahmin eder. Bu nedenle, büyük bir c eşik değeri için, $X > c$ alt kümesi koşullu KM tahmin edicisini tahmin etmek için küçük olabilir. Bu sorunu çözmek için Chambless ve Diao (2006), alternatif bir tahmin edici olan CD4'ü önermişlerdir [29]. CD4, yaşam çözümlemesinde başarısızlık riskini modellemek için kullanılan Cox orantılı tehlikeler modelinden risk faktörlerinin katsayılarını tahmin eder ve daha sonra bu katsayıları yaşam fonksiyonunu tahmin etmek için kullanır. Bu tanımlamayla duyarlılık ve seçicilik aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\text{Duyarlılık}(c, t) = \frac{E[(1 - S(t | X_i))I(X_i > c)]}{E[(1 - S(t | X_i))]}, \quad (13)$$

$$\text{Seçicilik}(c, t) = \frac{E[S(t | X_i)I(X_i < c)]}{E[S(t | X_i)]}. \quad (14)$$

Bu eşitliklerdeki X yaşam fonksiyonundan elde edilen bir skordur. Bu tahmin edici, ham belirteç değeri yerine yaşam fonksiyonundan elde edilen bir X skoru kullanır [29].

CD4 herhangi bir verilen zamanda mevcuttur. CD2 ile kıyaslandığında, bu model tabanlı tahmin edici belirtece bağlı durdurmaya izin verir [29]. CD4'ün dezavantajı belirtecin (bir yaşam fonksiyonundan elde edilen skor olarak) artan dönüşümlerine karşı sabittir

ve bu sebeple Blanche ve arkadaşları (2013) bu yöntemin diğer yöntemlerle kıyaslanmasını önermemişlerdir [5, 28, 29, 30].

CD5: Uno ve arkadaşları (2007) ve Hung ve Chiang (2010a), t zamanından önce durdurulmamış birimleri, durdurulmamış olma olasılıklarına göre ağırlıklandırarak naive tahmin edicisini düzenlemişlerdir (CD5) [31, 32]. Duyarlılık değeri hesaplanırken durdurulmamış olma olasılıkları ağırlıklandırma değeridir.

Duyarlılık ve seçicilik sırasıyla,

$$\text{Duyarlılık}(c, t) = \frac{\sum_{i=1}^n I(X_i > c, Z_i \leq t) \{ \delta_i / n \hat{S}_c(Z_i) \}}{\sum_{i=1}^n I(Z_i \leq t) \{ \delta_i / n \hat{S}_c(Z_i) \}} \quad (15)$$

ve

$$\text{Seçicilik}(c, t) = \frac{\sum_{i=1}^n I(X_i \leq c, Z_i > t)}{\sum_{i=1}^n I(Z_i > t)} \quad (16)$$

biçiminde elde edilir. Burada $\hat{S}_c(Z_i)$, i'inci gözlenen olay zamanı Z_i 'de c_i durdurma zamanının yaşam fonksiyonunun KM tahmin edicisidir. $\hat{S}_c(Z_i)$, Z_i 'de durdurulmamış olma olasılığını tahmin eder [31, 32]. CD5 duyarlılık ve seçicilik tahmin edicileri ve ROC(t) eğrisi monoton ve [0, 1] ile sınırlıdır [28]. ROC(t) eğrisinin altında kalan alan,

$$\text{AUC}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(Z_i \leq t, Z_j > t) I(X_i > X_j) \{ \delta_i / n^2 \hat{S}_c(Z_i) \hat{S}_c(t) \}}{\hat{S}(t)(1 - \hat{S}(t))} \quad (17)$$

biçiminde elde edilir [33].

CD6: CD5'in değiştirilmiş versiyonudur (CD6). Bu tahmin edici, model tabanlı CD2 ve CD4 tahmin edicileri gibi belirtece bağlı durdurma için sağlamdır. Duyarlılık ve seçicilik değerleri sırasıyla aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\text{Duyarlılık}(c, t) = \frac{\sum_{i=1}^n I(X_i > c, Z_i \leq t) \{ \delta_i / n \hat{S}_c(Z_i | X_i) \}}{\sum_{i=1}^n I(Z_i \leq t) \{ \delta_i / n \hat{S}_c(Z_i | X_i) \}}, \quad (18)$$

$$\text{Seçicilik}(c, t) = \frac{\sum_{i=1}^n I(X_i \leq c, Z_i \leq t) \{ 1 / n \hat{S}_c(t | X_i) \}}{\sum_{i=1}^n I(Z_i > t) \{ \delta_i / n \hat{S}_c(t | X_i) \}}. \quad (19)$$

Buradaki $\hat{S}_c(t | X_i)$ fonksiyonu, $P(C_i > t | X_i)$ fonksiyonuna eşittir ve Cox model kullanılarak tahmin edilen durdurulmuş yaşam olasılığıdır [5, 28].

CD7: Lambert ve Chevret (2014), Heagerty ve Zheng (2005) ile benzer bir yaklaşım kullanmışlar ve sabit zaman aralığı (τ_1, τ_2) ile sınırlı, zamana bağlı aşağıdaki ağırlıklı AUC(t) tahmin edicisini önermişlerdir (CD7) [34]:

$$\frac{AUC_{\omega\tau_1\tau_2}^{C,D}}{\frac{1}{\hat{S}(\tau_1) - \hat{S}(\tau_2)} [\sum_{\tau_1 \leq (i) \leq \tau_2} \overline{AUC}^{C,D}(t^{(i)}) \{ \hat{S}(t^{(i)}) - \hat{S}(t^{(i-1)}) \}]} \quad (20)$$

Bu eşitlikte kullanılan $t^{(i)}$, $t^{(1)} > \tau_1$ ise $t^{(0)} = \tau_1$ olduğu varsayılan sıralı farklı başarısızlık süreleridir. $\hat{S}(t)$ yaşam fonksiyonunun KM tahminidir. $AUC^{C,D}(t)$, CD2, CD5 ya da diğer tahmin ediciler gibi bir CD zamana bağlı AUC'nin parametrik olmayan bir tahmin edicisidir. Eğer klinik olarak belirlenmiş bir seçim yoksa τ_2 değeri maksimum beklenen takip süresinin hemen altındaki değer olarak belirlenebilir [5, 34, 35].

CD8: Viallon ve Latouche (2011), koşullu mutlak risk fonksiyonunun farklı tahmin edicilerine dayanarak birkaç zamana bağlı AUC tahmin edicileri önermişlerdir [30]. Koşullu mutlak risk fonksiyonu, standart Cox orantılı tehlike modeli (CD8 Cox), Aalen eklemeli modeli (CD8 Aalen) ya da koşullu KM tahmin edicisi (CD8 KM) kullanılarak tahmin edilebilir. Zamana bağlı AUC tahmin edicisi,

$$\frac{AUC_n(t)}{= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \hat{F}_n(t; X_i) - \{ \sum_{i=1}^n \hat{F}_n(t; X_i) \}^2 / 2}{\sum_{i=1}^n \hat{F}_n(t; X_i) \{ 1 - \sum_{i=1}^n \hat{F}_n(t; X_i) \}}} \quad (21)$$

biçiminde tanımlanır.

Burada n birimlerin sayısını, X_k ; X_1, X_2, \dots, X_n belirtcene bağlı k. sıra istatistiğini gösterir [30].

Koşullu mutlak risk fonksiyonu $F(t; X = x) = P(T \leq t | X = x)$ ile tanımlanır ve tahmin edicisi $\hat{F}_n(t; X = x)$, CD8 Cox, CD8 Aalen ve CD8 KM olmak üzere üç şekilde hesaplanır:

CD8 Cox: Cox (1972) tarafından önerilen model altındaki koşullu tehlike $\lambda(t; X = x) = \lambda_0(t) \exp(\alpha x)$ olsun [36]. Burada λ_0 temel tehlike ve $\alpha, X=x'$ e ait log tehlike oranıdır. X verildiğinde $T=t'$ nin koşullu kümülatif tehlikesi, $\Lambda(t; X = x) = \int_0^t \lambda(u; X = x) du$ ile verilir. CD8 Cox modeli için koşullu mutlak risk fonksiyonunun tahmin edicisi,

$$\hat{F}_{n,Cox}(t; X = x) = 1 - \exp\{-\hat{\Lambda}_0(t) \exp(\hat{\alpha}x)\} \quad (22)$$

biçimindedir.

CD8 Aalen: Aalen (1989) eklemeli (additive) model için koşullu tehlike $\lambda(t; X = x) = \beta_0(t) + \beta_1(t)x$ biçimindedir [37]. Böylece CD8 Aalen koşullu mutlak risk fonksiyonunun tahmin edicisi aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\hat{F}_{n,Aalen}(t; X = x) = 1 - \exp(-\hat{\beta}_0(t) - \hat{\beta}_1(t)x). \quad (23)$$

CD8 KM: Koşullu mutlak risk fonksiyonunun en yakın komşu tipi tahmin edicisi CD8 KM için kullanılır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$= 1 - \prod_{Z_i \leq t} \prod_{\delta_i=1} \left\{ \frac{\hat{F}_{n,KM}(t; X = x)}{\sum_j I(Z_j \geq Z_{i-}) K_{I_n}(X_j, x)} \right\}. \quad (24)$$

Eşitlikteki I_n , 0/1 simetrik komşu çekirdek K_{I_n} 'nin düzgünleştirme parametresidir [5, 27].

CD8 tahmin edicisi, koşullu mutlak risk fonksiyonlarının tahminini zamana bağlı AUC tahmin edicisine ekleyerek hesapladığı için uygulaması kolaydır. AUC tahmin edicisine eklenmesiyle koşullu mutlak risk fonksiyonlarının özelliklerinden diğer tahmin edicilerin izlenmesini kolaylaştırır. Ayrıca, c durdurma zamanı ile (T, Z) çifti arasındaki bağımsızlık varsayımının ihlal edilebileceği durumlarda CD2'ye kıyasla CD8'in kullanılması önerilir [5, 30].

Olay duyarlılığı ve dinamik seçicilik

Olay duyarlılığı ve dinamik seçicilik (ID) tanımlamasında, olayı yaşayan ve yaşamayan birimlerin t zamanında olduğu varsayılır. Olay duyarlılığı, t zamanında olayı yaşayan birimlerin c eşik değerinden daha büyük bir belirteç değerine sahip olma olasılığıdır. Dinamik seçicilik ise t zamanında olayı yaşamayan birimlerin c eşik değerine eşit ya da küçük belirteç değerine sahip olma olasılığıdır.

ID tanımlaması, tam olay zamanının bilindiği ve olayı yaşayan birimler ile belirli bir olay zamanında olayı yaşamamış birimler arasında ayırım yapmak istenildiğinde daha uygun olmaktadır ($T_i = t$ olduğu durumda). Birçok uygulamada önceden bir t zamanı tanımlanmaz, bu nedenle genellikle genel bir doğruluk özeti istenir bu da ID tanımlamasının önemli bir avantajıdır [5, 19].

$R_i(t) = I(Z_i \geq t)$ risk belirteçidir ve $R_i(t) = (i: R_i(t) = 1)$, t zamanında risk kümesindeki birimleri gösterir. Burada R_t^1 olayı yaşayan birimleri ve R_t^0 olayı yaşamayan birimleri (kontrol grubu) ifade eder. n_t , t zamanındaki kontrol grubundaki birimlerin sayısını ve d_t , t zamanındaki olay grubundaki birimlerin sayısını temsil eder. Bu durumda t zamanı için risk kümesi olay ve kontrol grubunun birleşimi olur ve $R_t = (R_t^1 \cup R_t^0)$ ile ifade edilir [5].

ID1: Heagerty ve Zheng (2005), standart Cox modelini kullanarak duyarlılık ve seçiciliği aşağıdaki gibi tahmin etmişlerdir (ID1) [19]:

$$\text{Duyarlılık}(c, t) = \sum_i I(X_i > c) \pi_k(\hat{y}(t), t), \quad (25)$$

$$\text{Seçicilik}(c, t) = 1 - \sum_k I(X_k > c) \frac{R_k^0(t)}{n_t}. \quad (26)$$

Bu eşitlikteki $\pi_i(\gamma(t), t) = R_i(t)\exp(X_i\gamma(t))/W(t)$ orantılı tehlikeler modeli altındaki ağırlıkları ifade eder ve $W(t) = \sum_i R_i(t)\exp(U_i^T\beta)$ biçimindedir. U_i ise zamanla değişmeyen açıklayıcı değişkenlerdir [5, 19, 38].

ID2: Saha-Chaudri ve Heagerty (2013) tarafından ağırlıklı ortalama sıralaması önerilmiş ve sıralı skorlar aracılığıyla risk kümesindeki birimlerin sıralamasına dayanır [39]. t olay zamanı verildiğinde önerilen zamana bağlı AUC, $AUC(t) = P(X_i > X_j | T_i = t, T_i > t)$ biçimindedir ve

$$AUC(t) = \frac{1}{n_t d_t} \sum_{i \in R_t^1} \sum_{j \in R_t^0} 1(X_i > X_j) \quad (27)$$

olarak verilir. Genellikle, t zamanında olayı yaşayan birimlerin sayısı oldukça azdır ve $d_t = 1$ 'dir. Bu nedenle t etrafındaki komşu bilgilerinden yararlanır. Burada ID2 kullanımı önerilmiştir. ID2,

$$ID2(t) = \frac{1}{|N_t(h_n)|} \sum_{t_j \in N_t(h_n)} AUC(t_j) \quad (28)$$

biçiminde verilir. Burada, $N_t(h_n) = \{t_j: |t - t_j| < h_n\}$ ifadesi t etrafındaki komşuluğu gösterir. Saha-Chaudri ve Heagerty (2013), belirli koşullar altında, ID2(t)'nin normal dağıldığını ve potansiyel olarak sağlam olma avantajına da sahip olduğunu göstermişlerdir [39].

ID3: ID2 yönteminin özellikle bant genişliğinin hesaplama yoğunluğu açısından, Shen ve arkadaşları (2015) çok sayıda olası belirteci karşılaştırırken daha kolay ve uygulanabilir olan yarı parametrik zamana bağlı bir AUC tahmin edicisi önermişlerdir [40]. Önerilen model, kesirli polinomları kullanır. Bu modelin parametreleri sözde (pseudo) kısmi olabilirlik fonksiyonları kullanılarak tahmin edilir.

$\eta(\cdot)$ bağlantı (link) fonksiyonunu (örneğin, lojistik fonksiyon) gösterebilir. $AUC(t)$, G dereceli kesirli polinomlar kullanılarak t zamanının parametrik bir fonksiyonu olarak Eşitlik 29'daki gibi verilir:

$$\eta(AUC(t)) = \sum_{g=0}^G \beta_g t^{(p_g)} \quad (29)$$

Burada $g = 1, \dots, G$ ve

$$t^{(p_g)} = \begin{cases} t^{p_g}, & p_g \neq 0 \\ \ln(t), & p_g = 0 \end{cases} \quad (30)$$

ile tanımlıdır. Gerçek değerli güçler $p_1 \leq \dots \leq p_g$ ve β_0, \dots, β_g bilinmeyen regresyon parametreleridir. Royston ve Altman (1994), güçlerin $(-2, -1, -1/2, 0, 1/2, 1, 2)$ kümesinden seçilmesini önermişlerdir [41].

Olay duyarlılığı ve statik seçicilik

Etzioni ve arkadaşları (1999) ve Slate ve Turnbull (2000) zamana bağlı duyarlılığın ve seçiciliğin alternatif bir tanımlamasını yapmışlardır [17, 18]. Bu tanımlamada, her bir birimin olay durumu değişmez ve bir kontrol grubu ya da olay grubu olarak ele alınır. Olay duyarlılığı ve statik seçicilik (IS) tanımında olay grubu t zamanında olayı yaşayan birimlerden oluşurken kontrol grubu sabit takip süresi boyunca $(0, t^*)$ olayı yaşamayan birimlerden oluşur. Sabit takibi kullanmanın mantığı, t^* bitiş noktasının önceden belirlenmiş olması ve olayı gözlemlemek için yeterince uzun bir süre olarak kabul edilmesidir [42].

Kontrol grubu bu tanımlamada değişmezdir ve her birim sabit takip süresinde $(0, t^*)$ olay olarak veya olayı yaşamayan birim olarak yalnızca bir kez yer değiştirir. IS tanımı, birimlerin tekrarlı belirteç ölçümleri ile sabit takip zamanlı çalışmalarda kullanılabilir. Bu tanımlamada, yalnızca belirli bir ziyaret zamanındaki s belirteç değeri kullanılabilir [42, 43].

Bazı çalışmalar düzenli ziyaret zamanına sahip değildir. Ziyaret zamanları her birim için farklı olabilir. Dolayısıyla ziyaret zamanı ile olayın başlama zamanı arasındaki fark olan ve olay öncesi zaman olarak ifade edilen $T_i - s$ ile ilgilenilir. Duyarlılık ve seçicilik de $t = T_i - s$ farkına dayalı olarak tanımlanır. Olay duyarlılığı, T_i zamanında olayı yaşayan birimin t zamanındaki belirteç değeri ile test sonucunun pozitif çıkması olasılığı olarak tanımlanırken statik seçicilik ise birimin belirteç değeri ölçüldükten sonra t^* zamanına kadar olayı yaşamayan birimlerin olasılığı olarak tanımlanır.

Temel belirteç değeri ile boylamsal belirteç değerleri arasındaki farkı göstermek için X 'in yerine Y kullanılmıştır. Y_{ik} ($i=1, 2, \dots, n$; $k=1, 2, \dots, K_i$), s_{ik} 'da i . biriminden elde edilen belirteç değeri olsun. Burada s_{ik} , k . ziyaret zamanda i . birimin belirteç ölçüm zamanıdır. Duyarlılık ve seçicilik sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\text{Duyarlılık}^1(c, t) = P(Y_{ik} > c | T_i - s_{ik} = t), \quad (31)$$

$$\text{Seçicilik}^S(c, t^*) = P(Y_{ik} \leq c | T_i - s_{ik} > t^*). \quad (32)$$

Eşitlik (31) ve Eşitlik (32)'deki tanımlar, duyarlılık ve seçicilik için standart regresyon yaklaşımlarının kullanımını kolaylaştırmaktadır çünkü olaydan önceki zaman olan $T_i - s_{ik}$ basit bir açıklayıcı değişken olarak kullanılabilir [5].

IS1: Cai ve arkadaşları (2006), Leisenring ve arkadaşları (1997) tarafından verilen marjinal regresyon modellemesinden yararlanarak durdurma olduğunda kullanılacak bir tahmin edici yöntemi geliştirmişlerdir (IS1). Analize dahil edilecek veriler

$(Y_{ik}, U_i, Z_i, \delta_i, s_{ik}), i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, K_i$
biçiminde olsun.

Aşağıdaki duyarlılık ve seçicilik eşitliklerinde, U_i, Y_{ik} ile ilişkili açıklayıcı değişken vektörü, T_{ik} , ölçüm zamanı ve olay zamanı arasındaki zaman farkıdır ($T_{ik} = T_i - s_{ik}$). Cai ve arkadaşları (2006) (Y_{ik}, T_{ik}, U_i) ile ilişkili marjinal olasılığı modellemişlerdir [42]. Marjinal olasılıklı duyarlılık ve seçicilik

$$\text{Duyarlılık}(t, s_{ik}, U_i, c) = P(Y_{ik} > c | T_{ik} = t, U_i, s_{ik}) = g_D \eta \alpha_0(t, s_{ik}) + \beta'_0 U_i + h_0(c), \quad (33)$$

$$\text{Seçicilik}(t^*, s_{ik}, U_i, c) = P(Y_{ik} \leq c | T_{ik} > t^*, U_i, s_{ik}) = 1 - g_{\bar{D}} \{ \epsilon \alpha_0(s_{ik}) + b'_0 U_i + c_0(c) \} \quad (34)$$

biçiminde gösterilir. Eşitliklerdeki g_D ve $g_{\bar{D}}$ belirli bir ters bağlantı fonksiyonları, h_0 ve c_0 , c eşik değerinin belirtilmemiş temel fonksiyonlarıdır [5, 42].

IS2: ID ve IS tanımlamalarındaki farklılık kontrol gruplarıdır. ID tanımlamasında kontrol grubundaki birimler hedef zamana bağlı değişirken IS tanımlamasındaki kontrol grubundaki birimler, belirlenen bir zamanın ötesindeki statik yaşamlardır. Bu fark nedeniyle geliştirilen bu yöntem, IS tanımlamasını kullanarak Cox model tanımlamasını boylamsal tekrarlanan bir belirteç içerecek şekilde genişleterek elde edilir. Belirli bir s ziyaret zamanındaki bir belirteç değeri dikkate alınır. Bu yüzden risk kümesi tanımı, hedef zamanın ötesindeki birimleri de dahil ederek sabit bir takip süresinin ötesindekileri içerecek şekilde değiştirilir. Ancak IS ve ID tanımlamaları gibi risk kümesinin t zamanındaki sınıflandırılmasına dayanmadığından bu genişletilmiş yöntemin tehlike modellerinin doğal bir tamamlayıcısı olduğu söylenemez [5].

Naive tahmin edicisi

Naive tahmin edicisi, yalnızca gözlenen olaylarla ilgilenir. Gözlenen olayların gerçek pozitif ve gerçek negatif oranlarından yararlanılarak duyarlılık ve seçicilik değerleri hesaplanır. Eğer veri setinde herhangi bir durdurulmuş gözlem yoksa, t zamanındaki duyarlılık, t olay zamanından önce olayı yaşayan birimler arasında c eşik değerinden daha büyük belirteç değerine ($X_i > c$) sahip birimlerin oranı tahmin edilerek hesaplanır. t zamanındaki seçicilik, t zamanından sonra olayı yaşamayan birimler arasında c eşik değerine eşit ya da daha küçük belirteç değerine ($X_i \leq c$) sahip birimlerin oranı ile hesaplanır. Durdurulmuş olay zamanları olduğunda, yukarıdaki tahmin ediciler t zaman noktasından önce tüm durdurulmuş birimler çıkarılarak hesaplanır. Duyarlılık, seçicilik ve AUC değerleri sırasıyla aşağıdaki eşitliklerden elde edilir:

$$\text{Duyarlılık}(c, t) = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i I(X_i > c, Z_i \leq t)}{\sum_{i=1}^n \delta_i I(Z_i \leq t)}, \quad (35)$$

$$\text{Seçicilik}(c, t) = \frac{\sum_{i=1}^n I(X_i \leq c, Z_i > t)}{\sum_{i=1}^n I(Z_i > t)}, \quad (36)$$

$$\text{AUC}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \delta_i I(Z_i \leq t, Z_j > t) I(X_i > X_j)}{\sum_{i=1}^n \delta_i I(Z_i \leq t), \sum_{j=1}^n I(Z_j > t)}. \quad (37)$$

Burada kullanılan i ve j iki bağımsız birimin indeksini gösterir ve $I(\cdot)$ gösterge fonksiyonudur. Ancak durdurmayı ihmal ettiği için bu tahmin genellikle yanlıdır [5, 28].

2. Materyal ve Metot

Klasik ROC eğrisi analizi, bir birim için olay durumunu ve belirteç değerini zaman içinde sabit olarak ele alır, ancak uygulamada hem olay durumu hem de belirteç değeri zamanla değişir. Bu nedenle zamanın bir fonksiyonu olan ROC eğrisi analizi daha uygundur [5]. Birçok araştırmacı, olay durumunun ve belirteç değerinin zaman bağımlılığını göz ardı ederek klasik ROC eğrisi analizini kullanmaktadır. Bu çalışma ile özellikle sağlık alanında çok fazla kullanılan klasik ROC eğrisi yerine zamana bağlı ROC eğrisinin nasıl kullanıldığını ve nasıl yorumlandığını serviks kanseri verisi ile göstermek amaçlanmıştır.

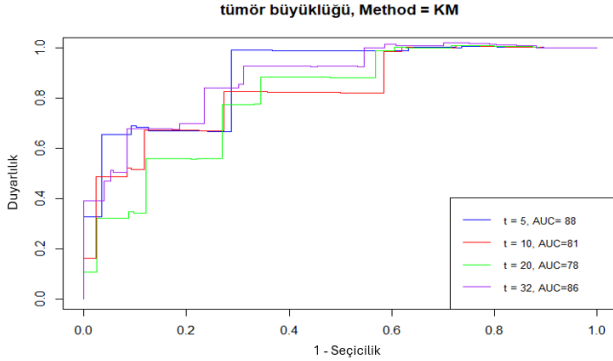
Serviks kanseri olan 114 hastanın yapılan tedaviye göre nüks durumunu içeren gerçek bir veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti, Ankara Üniversitesi Kadın Hastalıkları ve Doğum servisinden bir doktorun kendi çalışmasında kullandığı veri setidir ve daha önce iki tez çalışmasında farklı amaçlarla yararlanılmıştır [44, 45]. Takipte olan hastaların nüks olup olmamasına kadar geçen süre (ay) ve nüks durumu incelenmiştir. Nüks olmayanlar durdurulmuş, nüks olanlar ise başarısız (olay) olarak alınmıştır. Tümör büyüklüğü (tm) değişkeni belirteç değeri olarak alınmıştır. Belirteç değerindeki eksik bilgiler, zamana bağlı ROC eğrileri yöntemlerini uygularken daha düşük AUC değerleri elde edilmesine ve yöntemlerin ayırım yeteneğini hatalı vermesine sebep olmuştur. Bu nedenle tm değişkenindeki eksik gözlemler veriden çıkarıldıktan sonra kalan 90 hastadan 12'si (%13'ü) başarısız ve 78'i (%87'si) durdurulmuş gözlem olarak belirlenerek analizler yapılmıştır. Takip süresi min=2 ay, max =199 aydır. Nüks olanlarda karşılaşılan en uzun süre ise 32 aydır.

Bu verilerden yararlanılarak farklı zamanlarda (5., 10., 20. ve 32. aylar için) duyarlılık, seçicilik, ROC eğrileri ve AUC değerlerinin tahminleri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Giriş bölümünde verilen tanımlamalardan kodlarına ulaşılabilen CD1, CD2, CD4, CD5, CD6 ve ID1 yöntemlerinin uygulamaları, RStudio'da bulunan "timeROC", "survivalROC", "risksetROC", "survAUC", "timereg", "survival" paketlerinden yararlanılarak yapılmıştır [46, 47, 48, 49, 50, 51].

3. Bulgular

tm belirteci kullanılarak elde edilen CD1 tanımlamasının ROC eğrisi grafiği Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. tm belirteci ile CD1 tanımlamasının ROC eğrisi grafiği.

Şekil 2 incelendiğinde, tm belirteci ile AUC değerleri, 5. ay için 0.88, 10. ay için 0.81, 20. ay için 0.78 ve 32. ay için 0.86 olarak tahmin edilmiştir. Bu durumda, tm belirteci 5., 10., 20. ve 32. ayda serviks kanseri için hastalarda nüks yok ya da nüks var ayrımını yapmak için kullanılabilir. En yüksek AUC değeri t=5 için elde edilmiştir ve bunu t=32 takip etmektedir. Bu da sınıflandırma performansının en iyi 5. ayda ve 32. ayda elde edildiğini gösterir. CD1 tanımlaması ile tüm zaman noktalarında AUC değerlerinin 0.5'ten büyük ve 1'e daha yakın olması tm belirtecinin nüks olan ve olmayanları yakalamada kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

tm belirteci kullanılarak CD1 tanımlaması ile elde edilen duyarlılık (TP) ve 1-Seçicilik (FP) değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

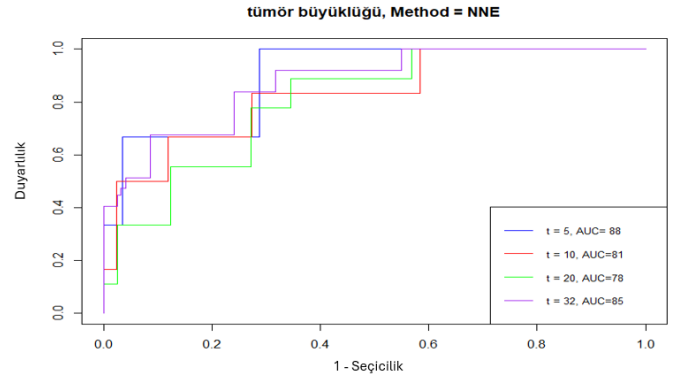
Tablo 1. tm belirteci ile CD1 tanımlamasının sonuçları

tm	t=5		t=10		t=20		t=32	
	TP	FP	TP	FP	TP	FP	TP	FP
0	1	0.90	1	0.89	1	0.89	1	0.88
1	1	0.88	1	0.88	1	0.88	1	0.87
3	1	0.86	1	0.86	1	0.85	1	0.84
5	1	0.83	1	0.82	1	0.81	1	0.80
:	:	:	:	:	:	:	:	:
30	0.99	0.37	0.83	0.36	0.78	0.34	0.85	0.31
33	0.99	0.36	0.83	0.34	0.77	0.33	0.84	0.30
35	0.67	0.29	0.67	0.27	0.56	0.27	0.70	0.23
:	:	:	:	:	:	:	:	:
80	0.33	0	0.16	0	0.11	0	8	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 1 incelendiğinde, tm için en uygun kesim değeri olarak 33 mm alınabilir. Bu durumda duyarlılık (nüks

olanları nüks var diye tahmin edebilme oranı) t= 5 için 0.99, t=10 için 0.83, t=20 için 0.77, t=32 için ise 0.84 olarak elde edilmiştir. Bu t değerlerine karşılık gelen seçicilik (nüks olmayanları nüks yok diye tahmin edebilme oranı) değerleri ise sırasıyla 0.64 (1-0.36), 0.66 (1-0.34), 0.67 (1-0.33) ve 0.70 (1-0.30) olarak bulunmuştur. Gerçekte nüksü olan hastaları nüksü var diye yakalama olasılığının en yüksek olduğu zaman t= 5'tir. Mükemmel bir doğru pozitif oranı (0.99) elde edilse de seçicilik değeri (0.64) düşüktür. İncelenen tüm zamanlar için gerçekte nüksü olan birimlerin nüksü var olarak yakalama oranı ve gerçekte nüksü olmayanları nüksü yok diye yakalama oranı en iyi t= 32. ayda elde edilmiştir. Bu durumda 32. ay için tümör büyüklüğü 33 mm ve daha büyük olanlar nüks grubuna, tümör büyüklüğü 33 mm'den daha küçük olanlar ise nüks olmayanlar grubuna atanabilir.

tm belirteci kullanılarak elde edilen CD2 tanımlamasının ROC eğrisi grafiği Şekil 3'te verilmiştir.

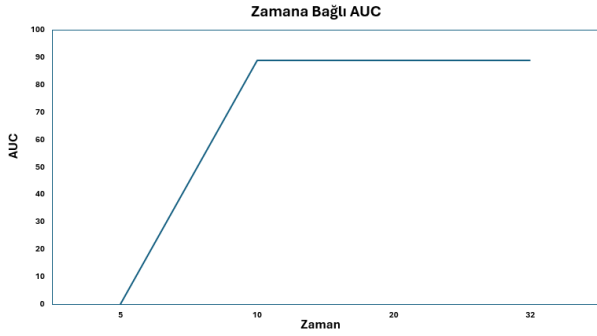


Şekil 3. tm belirteci ile CD2 tanımlamasının ROC eğrisi grafiği ($\lambda=0.05$).

tm belirteci ile t=5., 10., 20. ve 32. aylar için tahmin edilen AUC değerleri sırasıyla 0.88, 0.81, 0.78 ve 0.85'dir. t=5 ve t=32 için tm belirtecinin sınıflandırma performansının iyi olduğu söylenebilir. En yüksek AUC değeri t= 5 için elde edilmiştir ve bunu t=32 takip etmektedir. CD2 tanımlaması ile tüm zaman noktalarında AUC değerlerinin 0.5'ten büyük ve 1'e daha yakın olması tm belirtecinin nüks olan ve olmayanları yakalamada kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Tablo 1'e benzer olarak tm belirteci kullanılarak CD2 tanımlaması ile duyarlılık ve 1-Seçicilik değerleri de elde edilmiş ve CD1 tanımlamasında olduğu gibi tm için en uygun kesim değeri olarak 33 mm elde edilmiştir. Bu değere karşılık gelen duyarlılık ve seçicilik değerleri sırasıyla t=5 için 1.00 ve 0.64, t=10 için 0.83 ve 0.65, t=20 için 0.78 ve 0.67, t=32 için 0.84 ve 0.70 olarak elde edilmiştir. CD2 tanımlaması, CD1 tanımlaması ile oldukça benzer sonuçlar vermiştir. Bu nedenle, CD1 için yapılan yorumlar burada da yapılabilir.

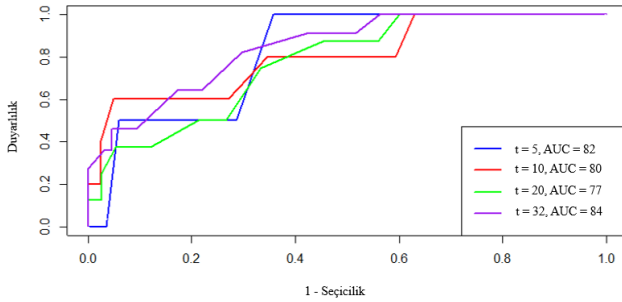
CD4 tanımlaması kullanılarak tm belirteci ile elde edilen farklı zamanlardaki AUC değerlerinin grafiği Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. tm belirtecinin (t, AUC(t)) grafiği.

Şekil 4 incelendiğinde 5. ayda tm belirteci ile tahmin edilen AUC değerinin sıfır olduğu, 10. aya kadar t zamanı arttıkça AUC değerinin arttığı, t=10 ay ve daha sonraki zamanlarda ise AUC değerinin, Giriş bölümünde bahsedildiği gibi sabit ve 0.89 olduğu görülmektedir. Bu durumda, 10. ay ve daha sonraki zamanlarda tm belirteci nüksü olanları ve olmayanları belirlemede kullanılabilir. Blanche ve arkadaşları (2013) bu yöntemin diğer yöntemlerle karşılaştırılmamasını belirtmişlerdir [28]. Ancak, t=10 ve sonraki zamanlar için tm belirtecinin sınıflandırma performansının CD1 ve CD2'ye göre daha yüksek ve mükemmelere yakın olduğu söylenebilir.

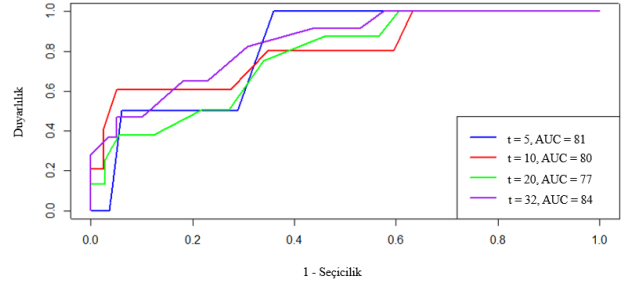
tm belirteci kullanılarak elde edilen CD5 tanımlamasının ROC eğrisi grafiği Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. tm belirteci ile CD5 tanımlamasının ROC eğrisi grafiği.

Şekil 5 incelendiğinde, tm belirteci ile 5., 10., 20. ve 32. aylar için CD5 tanımlamasıyla tahmin edilen AUC değerleri sırasıyla 0.82, 0.80, 0.77 ve 0.84'dür. tm belirtecinin sınıflandırma performansının iyi olduğu söylenebilir. tm belirtecinin nüks olan birimlerle nüks olmayan birimleri ayırt etme yeteneğinin en yüksek olduğu zaman 32. aydır. CD5 tanımlaması, CD1, CD2 ve CD4 tanımlamasına göre daha düşük AUC değerleri vermiştir.

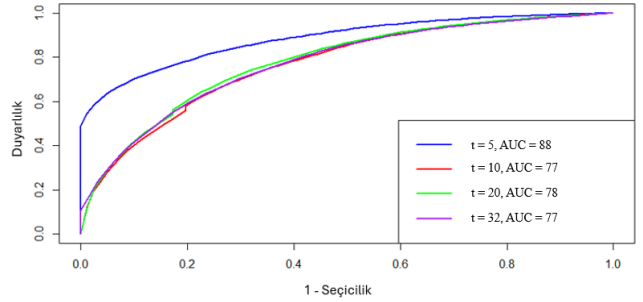
tm belirteci kullanılarak elde edilen CD6 tanımlamasının ROC eğrisi grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. tm belirteci ile CD6 tanımlamasının ROC eğrisi grafiği.

Şekil 6 incelendiğinde, tm belirteci ile 5., 10., 20. ve 32. aylar için CD6 tanımlamasıyla tahmin edilen AUC değerleri sırasıyla 0.81, 0.80, 0.77 ve 0.84 olarak elde edilmiştir. tm belirtecinin sınıflandırma performansının iyi olduğu söylenebilir. CD6 tanımlaması, CD5 tanımlaması ile aynı sonuçları vermiştir.

tm belirteci kullanıldığında ID1 tanımlaması ile elde edilen ROC eğrisi grafiği Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. tm belirteci ile ID1 tanımlamasının ROC eğrisi grafiği.

Şekil 7 incelendiğinde, tm belirteci ile 5., 10., 20. ve 32. aylar için ID1 tanımlamasıyla tahmin edilen AUC değerleri sırasıyla 0.88, 0.77, 0.78 ve 0.77 olarak elde edilmiştir. ID1 tanımlamasıyla, tm belirtecinin nüks olan birimlerle nüks olmayan birimleri ayırt etme yeteneğinin t=5 için mükemmelere yakın olduğu söylenebilir. AUC değerleri, 5. ay ve 20. ay için CD1 ve CD2 ile aynıken diğer aylarda daha düşük olduğu görülmektedir. 5. aydaki performansının CD4, CD5 ve CD6 tanımlamalarından daha iyi olduğu, 10. ve 32. aylarda ise daha düşük olduğu sonucu elde edilmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Yaşam çözümlemesinde ilgilenilen olay gerçekleşene kadar geçen süreyle ilgilenildiğinden birimleri olay ve kontrol grubuna doğru sınıflandırmak için kullanılan belirteçlerin doğruluğunu değerlendirmek için ROC eğrilerinden yararlanılmıştır. Literatürde ROC eğrileri, yaşam süreleri ile genişletilerek farklı tanımlamalar yapılmıştır.

Yaşam çözümlemesinde, t zamanına kadar olayı yaşamış olan olay grubunun, olayı henüz yaşamamış olan kontrol grubuna göre daha yüksek belirteç

değerlerine sahip olması beklenildiğinden üç tür duyarlılık ve seçicilik tanımlamalarından CD ile ifade edilen kümülatif duyarlılık ve dinamik seçicilik en sık uygulananıdır [26]. Kümülatif duyarlılık ve dinamik seçicilik başlığı altında ele alınan tanımlamalardan en çok kullanılanları ise Heagerty ve arkadaşlarının (2000), KM tahmin edicisi (CD1) ve en yakın komşu tahmin edicisidir (CD2). CD1'in dezavantajları, monoton olmayan duyarlılık ve seçicilik üretmesi ve belirtece bağlı durdurmaya karşı sağlam olmamasıdır. CD1 tanımlamasındaki sorunları gidermek için geliştirilen CD2 tanımlamasının avantajları, monoton duyarlılık ve seçicilik üretmesi ve belirtece bağlı durdurmaya izin vermesidir. Bu tanımlamanın dezavantajı ise düzgünleştirme parametresi içermesi, olay ve kontrol gruplarını ayırırken gereksiz bilgileri kullanmasıdır. CD3 tanımlamasının herhangi bir düzgünleştirme parametresi içermemesi avantajını oluştururken tekrarlı hesaplama içermesi ve monoton olmayan seçicilik üretmesi dezavantajlarıdır. Chambless ve Diao (2006), CD4'ün CD3'e göre daha etkin olduğunu ifade etmişlerdir. CD4 tanımlamasının avantajı, monoton duyarlılık ve seçicilik üretmesi ve belirtece bağlı durdurmaya izin vermesidir. Dezavantajı ise belirtecin artan dönüşümlerine karşı değişmez olmasıdır. CD5 tanımlamasının olay ve kontrol grubunu ayırırken tüm bilgileri kullanması avantajı iken, belirtece bağlı durdurmaya karşı sağlam olmaması dezavantajı olmaktadır. CD6'nın, CD5'in değiştirilmiş versiyonu olduğu, monoton duyarlılık ve seçicilik ürettiği, CD2 ve CD4 gibi belirtece bağlı durdurma için sağlam olduğu belirtilmiştir [5]. c durdurma zamanı ile (T, Z) arasındaki bağımsızlık varsayımının ihlal edilebileceği durumlarda CD2'ye kıyasla CD8'in kullanılması tavsiye edilmiştir [30]. ID2'nin ID1'e göre görece yanının daha düşük olduğu, daha sağlam olduğu ancak ID3'e göre daha karmaşık olduğu, hesaplama açısından daha yoğun olduğu, ID3'ün özellikle çok sayıda belirteç olduğunda daha kolay olduğu ve regresyon tipi bir model olduğu için anlaşılabilir olduğu belirtilmiştir [5, 41]. IS1'in duyarlılık ve seçiciliğin yansız tahminlerini sağladığı, ancak hesaplama açısından yoğun olduğu ve tüm belirteç değerleri yerine en son belirteç değerini kullandığı belirtilmiştir [5].

Bu çalışmada serviks kanseri veri seti kullanılarak RStudio'da bulunan paketlerden yararlanılarak tanımlamaların uygulanabilirliği gösterilmiştir. Tümör büyüklüğü değişkeni belirteç olarak alınarak CD1, CD2, CD4, CD5, CD6 ve ID1 tanımlamaları ile başarısızlık sürelerine göre AUC değerleri hesaplanarak bu belirtecin nüksü olanları ve nüksü olmayanları yakalama performansı değerlendirilmiştir. CD2, CD1 tanımlamasındaki sorunları gidermek için geliştirilse de CD1 ve CD2 tanımlamalarının AUC değerleri benzer çıkmıştır. Bu tanımlamalar kullanılarak tm belirtecinin nüksü olanları ve olmayanları ayırmada oldukça iyi olduğu görülmüştür. 32. ay için tümör büyüklüğü 33 mm ve daha büyük olanlar nüks grubuna, tümör büyüklüğü

33 mm'den daha küçük olanlar ise nüks olmayanlar grubuna atanabilir. Literatürdeki çalışmalarda en çok kullanılan tanımlama CD tanımlamasıdır [5]. CD ve ID tanımlamalarının uygulamalarının en yaygın alanları ise akciğer, meme ve karaciğer kanserleridir. Lu ve arkadaşları (2012), küçük hücreli akciğer kanserlerinde tümör nüksü için sağlam bir belirteç belirlemek için zaman bağımlı ROC eğrisi analizinde CD2 tanımlamasını kullanmışlardır [52]. Yue ve arkadaşları (2015) ve Yue ve arkadaşları (2016), meme kanserli hastalarla çalışmışlar ve nükse kadar geçen süreyi dikkate alarak belirteci değerlendirmek için zaman bağımlı ROC eğrisini kullanmışlardır [53, 54]. Kamarudin ve arkadaşları (2017), Mayo Clinic'te yürütülen birincil safra sirozu tedavisi için D-penisilamin ilacının randomize plasebo kontrollü bir denemesinden elde edilen verileri kullanarak zamana bağlı ROC eğrilerini tahmin etmede yöntemlerin performansını değerlendirmişlerdir [5]. Literatürdeki çalışmalarda da bu çalışmada olduğu gibi CD1 ve CD2 tanımlamalarının sonuçlarının neredeyse aynı olduğu görülmektedir [2, 5, 26, 27, 28]. Sayın ve Ünal (2022), yaptıkları çalışmada malign melanom ve paquid çalışma verileri için zamana bağlı ROC için KM (CD1) ve en yakın komşu (CD2) tahmin yöntemlerini kullanmışlar ve iki yöntemin benzer sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [55]. CD4 tanımlamasının diğerlerinden farklı olarak 10. aya kadar zaman arttıkça AUC değerinin nüksü olanları ve olmayanları ayırma yeteneğinin arttığı, 10. ay ve sonrasında ise sabit olduğu görülmüştür. Bu sonuç, literatür bilgisini desteklemektedir [5, 28, 29, 30]. CD5 ve CD6 tanımlamalarının ayırım performansı da aynı elde edilmiştir. İki tanımlama da zamana göre değişen AUC değerleri vermiştir ID1 tanımlamasında ise diğer tahmin yöntemlerine göre 5. ayın dışında daha düşük AUC değerleri elde edilmiştir. Zaman bazında bakıldığında tm belirteci kullanılarak nüksü olan ve olmayanları yakalayabilmek için t=5 için CD1, CD2 ve ID1 tanımlamaları, t=10 ve t=20 için CD4 tanımlaması, t=32 için ise en yüksek AUC değerini veren CD4 tanımlaması olmak üzere yakın AUC değerleri veren CD1, CD2, CD5 ve CD6 tanımlamaları kullanılabilir. Literatürdeki çalışmalarda da belirtildiği gibi yaşam süresi verileri zamana bağlı veriler olduğundan klasik ROC eğrisinin uygulanması yanı sıra tahminlere neden olmaktadır. Bu nedenle zamana bağlı ROC eğrisinin kullanılması ve yorumlanması gerekmektedir. Bu çalışmanın özgünlüğü, altı farklı tanımlama yöntemini kullanarak zamana bağlı ROC eğrisinin uygulanabilirliğini ve yorumlanabilirliğini gösteren ulusal bir çalışma olmasıdır.

Gelecek çalışmalarda Chambless ve Diao'nun (2006) Kaplan-Meier benzeri tahmin edicisi (CD3), ağırlıklı AUC(t) (CD7), Viallon ve Latouche (2011) tahmin edicisi (CD8), ağırlıklı ortalama sıralaması (ID2), kesirli polinom (ID3), marjinal regresyon modelleme yaklaşımı (IS1), genişletilmiş Cox regresyonu (IS2) ve Naive tahmin edicisi tanımlamalarının da uygulamaları yapılabilir ve tüm yöntemler birbirleri

ile karşılaştırılabilir. Ayrıca, bu yöntemler daha çok tıp alanında kullanılsa da mühendislik gibi alanlarda da zamanın etkisi ölçülmek istendiğinde kullanılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir. Katkılarından dolayı jüri üyelerine teşekkür ederiz.

Öneri ve eleştirileri ile makaleye katkılarından dolayı hakemlere teşekkür ederiz.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Kaplan, E. L. and Meier, P. 1958. Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. *Journal of the American Statistical Association*, 53, 457-481.
- [2] Heagerty, P. J., Lumley, T, Pepe, M. S. 2000. Time-Dependent ROC Curves for Censored Survival Data and A Diagnostic Marker. *Biometrics*, 56(2), 337-344.
- [3] Amico, M., Keilegom, V. I. and Han, B. 2021. Assessing Cure Status Prediction from Survival Data Using Receiver Operating Characteristic Curves. *Biometrika*, 108(3), 727-740.
- [4] Pepe, M. S. 2003. *The Statistical Evaluation of Medical Tests for Classification and Prediction*. Oxford University Press, USA.
- [5] Kamarudin, N. K., Cox, T. and Kolamunnage-Dona, R. 2017. Time-Dependent ROC Curve Analysis in Medical Research: Current Methods and Applications. *BMC Medical Research Methodology*, 17(53), 2-19.
- [6] Dey, R., Hanley, J.A. and Saha-Chaudhuri, P., 2023. Inference for Covariate-Adjusted Time-Dependent Prognostic Accuracy Measures, *Statistics in Medicine*, 42, 4082-4110.
- [7] Ying, A., 2024. Proximal Survival Analysis to Handle Dependent Right Censoring, *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 00, 1-21.
- [8] Swets, J. A. and Pickett, R. M. 1982. *Evaluation of Diagnostic Systems: Methods from Signal Detection Theory*. Academic Press, New York.
- [9] Hanley, J. A. 1989. Receiver Operating Characteristic (ROC) Methodology: The State of The Art. *Critical Reviews in Diagnostic Imaging*, 29, 307-335.
- [10] Begg, C. G. 1991. Advances in Statistical Methodology for Diagnostic Medicine in The 1980's. *Statistics in Medicine*, 10, 1887-1895.
- [11] Zweig, M. H. and Campbell, G. 1993. Receiver-Operator Characteristic Plots: A Fundamental Evaluation Tool in Clinical Medicine. *Clinical Chemistry*, 39(4), 561-577.
- [12] Pepe, M., Leisenring, W., and Rutter, C. 2000. Evaluating Diagnostic Tests in Public Health. *Handbook of Biostatistics*, 18, 397-422.
- [13] Beyene, K.M. and Ghouch, A. E., 2022, Time-Dependent ROC Curve Estimation for Interval-Censored Data, *Biometrical Journal*, 64, 1056-1074.
- [14] Zhou, K. H., Hall, W. J., and Shapiro, D. E. 1997. Smooth Nonparametric Receiver Operating Characteristic (ROC) Curves for Continuous Diagnostic Tests. *Statistics in Medicine*, 16, 2143-2156.
- [15] Metz, C. E., Herman, B. A., and Shen, J. 1998. Maximum Likelihood Estimation of Receiver Operating Characteristic (ROC) Curves from Continuously Distributed Data. *Statistics in Medicine* 17, 1033-1053.
- [16] Touraine, C., Winter, A., Castan, F., Azria, D. and Gourgou, S., 2023. Time-Dependent ROC Curve Analysis for Assessing the Capability of Radiation-Induced CD8 T-Lymphocyte Apoptosis to Predict Late Toxicities after Adjuvant Radiotherapy of Breast Cancer Patients, 15, 4676.
- [17] Etzioni, R., Pepe, M., Longton, G., Hu, C. and Goodman, G. 1999. Incorporating The Time Dimension in Receiver Operating Characteristic Curves: A Case Study of Prostate Cancer. *Medical Decision Making*, 19(3), 242-251.
- [18] Slate, E. H. and Turnbull, B. W. 2000. Statistical Models for Longitudinal Biomarkers of Disease Onset. *Statistics in Medicine*, 19, 617-637.
- [19] Heagerty, P. J. and Zheng, Y. 2005. Survival Model Predictive Accuracy and ROC Curves. *Biometrics*, 61(1), 92-105.
- [20] Song, X. and Zhou, X. H. 2008. A Semiparametric Approach for The Covariate Specific ROC Curve with Survival Outcome. *Statistica Sinica*, 18(3), 947-965.
- [21] Anonim. https://www.researchgate.net/figure/Three-examples-of-ROC-curves-Two-threshold-levels-labeled-A-and-B-are-identified-on_fig2_347797026 (Erişim tarihi: 05.05.2024).
- [22] Heagerty, P. J. and Zheng, Y. 2004. Semiparametric Estimation of Time-Dependent ROC Curves for Longitudinal Marker Data. *Biostatistics*, 5(4), 615-632.

- [23] Gönen, M. and Heller, G. 2005. Concordance Probability and Discriminatory Power in Proportional Hazards Regression. *Biometrika*, 92, 965–970.
- [24] Zhang, Y. and Shao, Y. 2018. Concordance Measure and Discriminatory Accuracy in Transformation Cure Models. *Biostatistics*, 19, 14–26.
- [25] Beyene, K. M., El Ghouseh, A. and Oulhaj, A. 2019. On The Validity of Time-Dependent AUC Estimation in The Presence of A Cure Fraction. *Biometrical Journal*, 61, 1430–1447.
- [26] Kim, Y. J. 2022. Review for Time-Dependent ROC Analysis Under Diverse Survival Models. *The Korean Journal of Applied Statistics*, 35(1), 35–47.
- [27] Akritas, M. G., 1994. Nearest Neighbor Estimation of a Bivariate Distribution under Random Censoring. *The Annals of Statistic*, 22(3), 1299–1327.
- [28] Blanche, P, Dartigues, J. F. and Jacqmin-Gadda, H. 2013. Review and Comparison of ROC Curve Estimators for A Time-Dependent Outcome with Marker-Dependent Censoring. *Biometrical Journal*, 55(5), 687–704.
- [29] Chambless, L. E. and Diao, G. 2006. Estimation of Time-Dependent Area Under The ROC Curve for Long-Term Risk Prediction. *Statistic in Medicine*, 25(20), 3474–3486.
- [30] Viallon, V. and Latouche, A. 2011. Discrimination Measures for Survival Outcomes: Connection Between The AUC and The Predictiveness Curve. *Biometrical Journal*, 53(2), 217–236.
- [31] Uno, H., Cai, T. X., Tian, L. and Wei, L. J. 2007. Evaluating Prediction Rules for t-Year Survivors With Censored Regression Models. *Journal of the American Statistical Association*, 102(478), 527–537.
- [32] Hung, H. and Chiang, C. 2010a. Optimal Composite Markers for Time-Dependent Receiver Operating Characteristic Curves with Censored Survival Data. *Scandinavian Journal of Statistics*, 37, 664–679.
- [33] Hung, H. and Chiang, C. 2010b. Estimation Methods for Time-Dependent AUC Models with Survival Data. *Canadian Journal of Statistics*, 38, 8–26.
- [34] Lambert, J. and Chevret, S. 2014. Summary Measure of Discrimination in Survival Models Based on Cumulative/Dynamic Time-Dependent ROC Curves. *Statistical Methods in Medical Research*, 25(5), 2088–2102.
- [35] Royston, P. and Parmar, M. K. 2011. The Use of Restricted Mean Survival Time to Estimate The Treatment Effect in Randomized Clinical Trials When The Proportional Hazards Assumption is in Doubt. *Statistic in Medicine*, 30(19), 2409–2421.
- [36] Cox, D. R. 1972. Regression Models and Life Tables. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, 34(2), 187–220.
- [37] Aalen, O. O. 1989. A Linear Regression Model for the Analysis of Life Times. *Statistic in Medicine*, 8(8), 907–925.
- [38] Xu, R. and O'Quigley, J. 2000. Proportional Hazards Estimate of The Conditional Survival Function. *Journal of the Royal Statistical Society Series B (Statistical Methodology)*, 62(4), 667–680.
- [39] Saha-Chaudhuri, P. and Heagerty, P. J. 2013. Nonparametric Estimation of A Time-Dependent Predictive Accuracy Curve. *Biostatistics*, 14(1), 42–59.
- [40] Shen, W., Ning, J. and Yuan, Y. 2015. A Direct Method to Evaluate The Time-Dependent Predictive Accuracy for Biomarkers. *Biometrics*, 71(2), 439–449.
- [41] Royston, P. and Altman, D. G. 1994. Regression Using Fractional Polynomials of Continuous Covariates: Parsimonious Parametric Modelling. *Journal of the Royal Statistical Society Series C (Applied Statistics)*, 43(3), 429–467.
- [42] Cai, T., Pepe, M. S., Lumley, T., Zheng, Y. and Jenny, N. J. 2006. The Sensitivity and Specificity of Markers for Event Times. *Biostatistics*, 7(2), 182–197.
- [43] Heagerty, P. J. and Zheng, Y. 2007. Prospective Accuracy for Longitudinal Markers. *Biometrics*, 63(2), 332–341.
- [44] Çiftçi, E. 2023. Çok durumlu modellerde geçiş olasılıklarının tahmini. Hacettepe üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 164s, Ankara.
- [45] Sertkaya, Ş. 2024. Yaşam çözümlemesinde alıcı işlem karakteristiği eğrileri. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70s, Ankara.
- [46] Blanche, P. Package 'timeROC', <https://cran.r-project.org/web/packages/timeROC/timeROC.pdf> (Erişim tarihi: 20.05.2024).
- [47] Heagerty, P. J. and Saha-Chaudhuri P. Package 'risksetROC', <https://cran.r-project.org/web/packages/risksetROC/risksetROC.pdf> (Erişim tarihi: 20.05.2024a).
- [48] Heagerty, P. J. and Saha-Chaudhuri, P., Package 'survivalROC', <https://cran.r-project.org/web/packages/survivalROC/survivalROC.pdf> (Erişim tarihi: 20.05.2024b).
- [49] Potapov, S., Adler, W. and Schmid, M., survAUC: Estimators of Prediction Accuracy,

<https://cran.r-project.org/web/packages/survAUC/survAUC.pdf> (Erişim tarihi: 20.05.2024).

- [50] Scheike, T., Timereg Package, <https://cran.r-project.org/web/packages/timereg/timereg.pdf> (Erişim tarihi: 20.05.2024).
- [51] Therneau, T. M. and Lumley, T., Package 'survival', <https://cran.r-project.org/web/packages/survival/survival.pdf> (Erişim tarihi: 20.05.2024).
- [52] Lu Y., Wang L., Liu P., Yang P. and You M. 2012. Gene-Expression Signature Predicts Postoperative Recurrence in Stage I Non-Small Cell Lung Cancer Patients. PLoS One, 7(1).
- [53] Yue Y., Cui X., Bose S., Audeh W., Zhang X. and Fraass B. 2015. Stratifying Triple-Negative Breast Cancer Prognosis Using 18 F-FDG-PET/CT Imaging. Breast Cancer Res Treat., 153(3):607–16.
- [54] Yue Y., Astvatsaturyan K., Cui X., Zhang X., Fraass B. and Bose S. 2016. Stratification of Prognosis of Triple-Negative Breast Cancer Patients Using Combinatorial Biomarkers. PLoS One. 11(3).
- [55] Sayın, C.E. and Ünal, İ. 2022. Time-Dependent Receiver Operating Characteristic Analysis and Applications in The Field of Medicine. Black Sea Journal Health Science, 5(3), 411-416.

Farklı Bakteri Yapıştırıcılarının Nohut (*Cicer arietinum* L.) Bitkisinde Nodülasyon ile Verim Performansına Etkileri

Muharrem KAYA¹ , Aykut ŞENER^{2*} , Cemile TEKELİ³ 

^{1,2,3}Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, 32000, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 09.08.2024, Kabul / Accepted: 07.11.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Aşılama,
Nohut,
Rhizobium,
Yapıştırıcı ajan,
Verim

Öz: Bu araştırma, bakteri aşılama farklı yapıştırıcı ajanların kullanılmasının nohut bitkisinin nodülasyon verileri ve verimi üzerine etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tarla denemeleri tesadüf blokları bölünmüş parseller deneme desenine göre 3 tekerrürlü olarak 2 yıl süre ile Isparta lokasyonunda yürütülmüştür. Çalışmada, test bitkisi olarak Azkan çeşidi ve İspanyol nohut genotipi kullanılmıştır. *Rhizobium* bakterilerini nohut bitkisinin tohumlarına yapıştırmak için saf su, şekerli su, süt tozu, arap zamkı ve metil selüloz kullanılmıştır.

Araştırma sonucunda, bakteri aşılama yapıştırıcı madde kullanımının yüz tane ağırlığı özelliği dışındaki diğer tüm özelliklerde olumlu etkileri olduğu gözlenmiştir. Nodül sayısı 24.3-174.0 adet bitki⁻¹, nodül ağırlığı 0.38-3.29 g bitki⁻¹, ilk çiçeklenme süresi 47.3-66.3 gün, bitki boyu 34.9-54.9 cm, bitkide bakla sayısı 23.9-42.5 adet, bitkide tane sayısı 24.4-42.1 adet, bitki tohum verimi 4.03-8.84 g, hasat indeksi % 36.5-43.7, tohum verimi 117.0-269.0 kg da⁻¹ ve yüz tane ağırlığı 38.3-49.0 g arasında değişim göstermiştir. Tane verimi bakımından en iyi bakteri yapıştırma uygulamalarının arap zamkı ve metil selüloz olduğu söylenebilir.

Effects of Different Bacteria Adhesive Agent on Nodulation and Yield Performance in Chickpea Plant (*Cicer arietinum* L.)

Keywords

Inoculation,
Chickpea,
Rhizobium,
Adhesive agent,
Yield

Abstract: This research was carried out to determine the effects of using different adhesive agents in bacterial inoculation on the nodulation and yield of chickpea plant. Field trials were conducted in the Isparta location for two years using a randomized complete block split plots design with three replications. In the study, Azkan variety and Ispanyol chickpea genotype were used as test plants. Distilled water, sugar water, milk powder, gum arabic, and methyl cellulose were used to adhere *Rhizobium* bacteria to seeds of chickpea plant.

As a result of the research, it was observed that the use of adhesive agents in bacterial inoculation had positive effects on all properties except hundred-grain weight. The number of nodules ranged from 24.3 to 174.0 per plant, nodule weight from 0.38 to 3.29 g per plant, the first flowering period from 47.3 to 66.3 days, plant height from 34.9 to 54.9 cm, the number of pods per plant from 23.9 to 42.5, the number of grains per plant from 24.4 to 42.1, seed yield per plant from 4.03 to 8.84 g, harvest index from 36.5% to 43.7%, seed yield from 117.0 to 269.0 kg da⁻¹, and hundred-grain weight from 38.3 to 49.0 g. In terms of seed yield, it can be said that the best bacterial adhesive applications were gum arabic and methyl cellulose.

*İlgili yazar: aykutsener@isparta.edu.tr

1. Giriş

Yemelik baklagil cinsleri içerisinde yer alan nohut bitkisinin kuru tanelerinin içerdiği yüksek protein oranının (%18-31) yanı sıra, mineral madde kompozisyonu ile vitaminler bakımından da zengin olması, bu ürünün yüzyıllardır insan beslenmesinde kullanılmasına yol açmıştır. *Mesorhizobium ciceri* gibi bakteriler ile simbiyotik yaşamları sonucu atmosferik azottan yararlanabilmekte olan nohut bitkisinin kökleri toprağın derinliklerine kadar inebilmekte ve toprağın verimliliğine katkı sağlamaktadır. Ayrıca tarımsal üretim açısından vejetasyon süresinin kısalığı ve yetiştiriciliğinin görece olarak kolay olması, bu bitkinin önemli avantajları arasında sayılabilir [1]. Bu bakımdan nohut, hem sulu hem de kuru tarımda ekim nöbeti sistemlerinde öncelikli bitkilerden biridir [2;3].

Ülkemizde nohut üretim miktarının azalmasının başlıca sebepleri; üretim maliyetlerinin yüksek olması, işçilik sorunları, ürün fiyatlarındaki dalgalanmalar ya da fiyatlarının düşük olması, çiftçilerin farklı ürün tercihleri, yüksek verimli çeşit sayısının azlığı, yanıklık hastalığı (*Ascochyta rabiei*), yabancı ot sorunu ve ekimden hasada kadar geçen süreçte takip edilen yetiştirme tekniklerindeki eksikliklerdir.

Nohut üretim miktarımızı arttırabilmek için yeni çeşitlerin ıslahı yanı sıra birim alandan elde edilen verimi arttırabilecek en uygun agronomik yöntemlerin de belirlenmesi son derece önemlidir.

Baklagil bitkileri yetiştiriciliğinde mikrobiyal gübre kullanımı bitki gelişimi ve tohum verimlerini olumlu yönde etkilemektedir. Konu üzerinde yapılan araştırmalara göre, baklagil tarımında bakteri aşılama ile tane verimleri; mercimekte %15-30, nohutta %20-45, maş fasulyesinde %18-35, börülcede %25-45, yer fıstığında %20-40 ve soya fasulyesinde %75-200 oranında artabilmektedir [4]. Ekim zamanı ile ekolojik koşullara göre değişmekle birlikte, nohut tarımında bitkinin kendi ihtiyacı olan azotun yaklaşık %42-70'i *Rhizobium* simbiyozu sayesinde atmosferden karşılanabilmektedir [5].

Özbağ [6], farklı nohut çeşitlerinde, bakteri aşılamanın nodülasyon ve bitki gelişimi üzerine etkilerini belirleyebilmek için yürüttüğü çalışmada; denemede kullanılan çeşitlerinin ortalaması olarak, kontrol parsellerine göre aşılama parsellerinde nodül sayısının (%787), nodül yaş ve kuru ağırlıklarının (sırasıyla %352 ve %357), bitki boyunun (%6), bitkinin yaş ve kuru ağırlığının (sırasıyla %15.3 ve %21), tane azot oranı ve toplam azot içeriğinin (sırasıyla %7.9 ve %22.6) önemli oranlarda arttığını bildirmiştir.

Toprakta bulunan mikroorganizmalar, çevre şartlarından oldukça etkilenmektedirler. İdeal koşullarda hızla çoğalırlar, olumsuz koşullarda ise hayatta kalmaya çalışırlar. Nodül oluşumu ve azot

fiksasyonu birçok faktörden etkilenmektedir [7]. Özellikle tohuma aşılama yönteminde geleneksel yöntemlerle (doğrudan kuru aşılama ya da su ile ıslatılarak) yapılan aşılama bazı problemler ortaya çıkabilmektedir. Bazı tohumlarda yeteri kadar bakteri tohuma yapışmamaktadır [8]. Ayrıca, olumsuz çevre koşullarında nodülasyon başlayınca kadar süreçte tohumlar kurumakta ve bakteriler ölebilmektedir. Nodülasyon evresine kadar bakterilerin canlılığını devam ettirebilmesi için bir miktar beslenmeye de ihtiyaçları vardır. Ekimden itibaren baklagil bitkisinin nodülasyona duyarlı hale gelmesine kadar geçen süreçte bakterilerin rekabetçi bir ortamda hayatta kalması ve çoğalması gereklidir [9]. Bakterilerin hem köklere yeter sayıda yapışabilmesi hem de beslenmeleri için su yerine farklı yapıştırıcılar kullanılabilir. Bu amaçla katı (turba tozu, granül turba, kepek, vermikülit) ya da sıvı yapıştırıcılar (arap zamkı, şekerli su, metilselüloz, duvar kâğıdı yapıştırıcısı, mısır şurubu, bal, süt tozu, suyu buharlaştırılmış süt, mineral yağ, bitkisel yağlar) kullanılabilir. Bu sayede baklagil bitkilerinde inokülasyonun etkinliği ve verim artabilmektedir. Elegba ve Rennie [8], soya fasulyesinde farklı yapıştırıcılar kullanarak yaptıkları bakteri aşılama denemesinde, aşılama ajanı olarak su, şekerli su, pelgel, nutricat, arap zamkı, metil selüloz, duvar kâğıdı yapıştırıcısı, mısır şurubu, bal, süt tozu ve suyu alınmış süt kullanmışlardır. Çalışma sonunda su ile ıslatmanın hem bakterileri kurumaktan koruyamadığını hem de bakterilerin beslenememesi nedeniyle olumsuz sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir. Tohum başına bakteri sayısı, bitkide nodül sayısı ve ağırlığı ile tane verimi gibi parametrelerin, bakterileri tohuma yapıştırmada arap zamkı, metil selüloz ve duvar kâğıdı yapıştırıcısı kullanılarak yapılan uygulamalarda en yüksek düzeye ulaştığını bildirmişlerdir.

Yapılan birçok araştırma sonucuna göre, farklı baklagil bitkilerinde tohuma bakteri aşılama özellikle sıvı yapıştırma ajanlarının kullanımıyla daha yüksek aşılama oranlarına bağlı olarak daha yüksek nodülasyon ve azot fiksasyonu ile tane verimlerinin önemli oranda arttığı belirlenmiştir [10;11].

Bu araştırmanın amacı; nohut çeşitlerinde *Mesorhizobium ciceri* bakteri suşu ile tohum aşılama farklı yapıştırma ajanları kullanımının nodülasyon verileri ve bazı verim unsurları üzerine etkilerinin belirlenmesidir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneme yeri ve materyal

Bu çalışmada; tarla denemesi, Isparta il merkezinde bulunan Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Yerleşkesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Araştırma ve Uygulama Çiftliği deneme alanında kurulmuştur. Denemeler 2022-2023 yıllarında iki yıl süreyle yürütülmüştür. Hem 2022 hem de 2023 yılında tarla

denemelerinin kurulduğu parseller, buğday/nadas ekim sistemi uygulanan tarlalarda nadas yılından sonraki alanlardan seçilmiştir.

Isparta ili konumu itibarıyla Akdeniz Bölgesinde Göller Bölgesi olarak adlandırılan coğrafyada yer almaktadır. Bölgenin iklimi Akdeniz iklimi ile İç Anadolu iklimi arasında geçit kuşağı iklimi şeklindedir. Yaz mevsimi boyunca sıcak ve kurak, kış aylarında ise soğuk ve yağışlıdır. Bölgenin rakımı ortalama 1035 m kadardır. Uzun yıllık iklim verileri ile karşılaştırıldığında; 2022 yılı iklim verilerine göre denemenin vejetasyon döneminde (nisan-temmuz arası) nisan, mayıs ve temmuz ayları toplam yağış değerleri uzun yıllar ortalamalarından düşük olup, diğer aylar birbirine yakın seyretmiştir. Ortalama sıcaklık değerleri açısından incelendiğinde, tüm ayların daha yüksek sıcaklık değerleri sergilediği gözlemlenmiştir. Oransal nem bakımından nisan ve mayıs aylarında düşük nem içeriği görülmüştür. 2023 yılında ise nisan, mayıs ve haziran aylarında yağış miktarı daha yüksek, temmuz ayında düşük olarak gerçekleşmiştir. İkinci yıl sıcaklık ve nem değerlerinin ise uzun yıllık ortalamalara benzer olduğu gözlemlenmiştir.

Toprak analizlerine göre, denemenin yürütüldüğü alanların toprak özellikleri killi tınlı yapıda, hafif alkali ve hafif tuzlu sınıfta yer almıştır. Deneme topraklarının kireç içeriği yüksek, buna karşın organik madde içeriği ise düşük olarak değerlendirilmiştir. Fosfor ve magnezyum içeriği bakımından yeterli, potasyum ve kalsiyum içeriği ise fazla olarak belirlenmiştir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Deneme yerine ait toprak analiz sonuçları

Bünye	pH	Tuzluluk Değeri ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
Killi - tınlı	7.66	322
Kireç oranı (%)	Org. madde içeriği (%)	Fosfor (mg kg^{-1})
28.7	1.54	23.5
Potas içeriği (mg kg^{-1})	Magnezyum (mg kg^{-1})	Kalsiyum (mg kg^{-1})
772.2	169.5	8229.8

Denemede tohum materyali olarak koçbaşı tane tipinde olan Azkan nohut çeşidi ile İspanyol nohut genotipi kullanılmıştır. Azkan nohut çeşidi; dik gelişme tabiatlı, orta derece dallanma özelliğinde, erkenci grupta yer alan yemeklik kullanıma uygun bir çeşittir. Kuraklık ve soğuk streslerine toleranslı, makinalı hasada uygundur. Bitkide bakla sayısı 30 adet olup, çeşidin 100 tane ağırlığı 45 grama kadar çıkabilmektedir. 3-3.5 aylık bir vejetasyon süresine sahip olup, uygun ekolojik koşullarda potansiyel verimi yaklaşık 400 kg da^{-1} kadardır. Yanıklık hastalığına toleransı oldukça yüksektir. İspanyol nohut genotipi ise popülasyon niteliğinde olup, Göller Bölgesi illerinde yetiştiricilerin tercih ettiği köy çeşididir.

Tohuma bakteri aşılama amacıyla T.C. Toprak, Gübre ve Su Kaynakları Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü laboratuvarlarından getirtilen peat kültür formunda kullanılan *Mesorhizobium ciceri* kullanılmıştır. Kullanılan bakteri preparatında toplam organik madde içeriği %33, toplam hümitik + fulvik asit içeriği %20 ve canlı organizma sayısı $1.1 \times 10^5 \text{ kob g}^{-1}$ 'dir.

Aşılama bakterileri tohuma yapıştırma ajanı olarak ise saf su, şekerli su, süt tozu (%100 inek sütü, en fazla %1.5 süt yağı), arap zıncı (Gumarabic CAS-No: 9000-01-5; EC-No: 232-519-5), methyl selüloz (CAS-No: 9004-65-3 Edukim) kullanılmıştır.

2.2. Yöntem

Ekimden önce tav durumuna göre, deneme alanı toprakları pulluk + diskaro ile işlenerek ekime hazır hale getirilmiş ve deneme planına göre deneme alanının parselasyonu yapılmıştır. 2022 yılı ekimleri 15 Nisan, 2023 yılı ekimleri ise 17 Nisan tarihlerinde, çapa ile açılan sıralara elle yapılmıştır. Tarla denemeleri, tesadüfi bloklar deneme deseni, bölünmüş parseller düzenine göre 3 tekrarlı olacak şekilde kurulmuştur. Denemede her blokta 12 parsel yer almıştır. Denemede ana parsellere çeşitler (İspanyol ve Azkan), alt parsellere ise 6 farklı yapıştırma ajanı (kontrol, saf su, şekerli su, süt tozu, arap zıncı ve methyl selüloz) yerleştirilmiştir.

Her parselin uzunluğu 3 m ve genişliği 1 m, toplam alanı 3 m^2 olacak şekilde ayarlanmıştır. Her alt parselde 4 bitki sırası yer almış, bitki sıklığı sıra arası 25 cm ve sıra üzeri 10 cm olacak şekilde, ekimler elle ekim yöntemiyle yapılmıştır. Çalışmada her alt parsel arasında 0.5 m, tekerrürler (bloklar) arasında ise 2 m boşluk bırakılarak ekim yapılmıştır. Ekimlerden önce sağlam ve sağlıklı görünen tohumlardan her parsel için 120'şer adet sayılmış ve paketlenerek ekime hazırlanmıştır. Ekimden önce her parselde dekara 13 kg ($2.34 \text{ kg N da}^{-1}$ ve $6 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ da}^{-1}$ gelecek şekilde) hesabıyla DAP (Diamonyumfosfat) gübresi temel gübreleme olarak uygulanmıştır.

Denemede sulama yapılmamıştır. Parsellerin otlama durumuna göre yabancı otları temizlemek için elle ot alma ve çapalama yöntemi uygulanmıştır.

Denemede her parsel için çeşitlere ait sağlam tohumlardan 120 adet sayılmış ve hassas terazide ekim öncesi ağırlıkları belirlenmiştir. Bakteri aşılamasından önce, %1 oranında sodyum hipoklorit içeren çözelti ile tohumların yüzeyi sterilize edilmiş, daha sonra tohumlar saf su ile yıkanmış, kurutma kağıtları ile kurutulmuştur.

Araştırmada tohumlara uygulanmak üzere bakteri yapıştırma ajanı olarak aşağıdaki solüsyonlar hazırlanmıştır.

- a) Saf su
b) Şekerli su: %10'luk şekerli su (sofra şekeri) [12]
c) Süt tozu: ağırlıkça %10 süt tozu içeren çözelti [8]
d) Arap zamkı: 40 g 100 ml⁻¹ hesabıyla [13]
e) Methyl selüloz: hacimce %4'lük çözelti [8;14]

Her parsel için tartılan tohumlara yukarıda hazırlanan çözeltilerden tohum ağırlığının %1'i kadar pülverize edilerek tohumlar ıslatılmıştır. Daha sonra gölge bir yerde ıslatılan tohumlara yine tohum ağırlığının %1 kadar *Rhizobium* bakterisi elle bulaştırılmış ve iyice karıştırılarak bakterilerin tohuma yapışması sağlanmıştır. Aşılama tohumlarının ekimleri 5-6 cm ekim derinliğinde elle açılan sıralara hiç bekletilmeden yapılmış ve tohum yatağı hemen kapatılmıştır. Kontrol parselleri için hazırlanan tohumlara herhangi bir işlem yapılmamış ve bakteri bulaşmasını engellemek için her blokta bu parsellerin ekimi ilk önce yapılmıştır.

Denemede, Meral ve ark. [12]'nin bildirdiği yöntemlere göre; bitkide nodül sayısı ve ağırlığı, ilk çiçeklenme süresi, bitki boyu, bitkide bakla ve tane sayısı, bitki verimi, hasat indeksi, tohum verimi ve yüz tane ağırlığı özellikleri incelenmiştir. Bitki ölçümleri parsellerden tesadüfi olarak seçilen 10'ar bitkide, tohum verimi alt parsellerde kenar tesirler atıldıktan sonra kalan deneme alanındaki bitkiler topluca hasat/harman edilerek, nodülasyon gözlemleri ise %50 çiçeklenme döneminde etiketlenen bitkilerin kökleri bel küreği yardımıyla dikkatlice sökülüş ve çeşme suyunda yıkanmış, bitkilerin köklerindeki nodüller sayılmış ve kuru ağırlıkları belirlenmiştir.

2.3. Verilerin değerlendirilmesi

Denemede incelenmiş olan verim ve verim özelliklerine ait verilerle, Tesadüfi Bloklar Deneme Deseninde, Bölünmüş Parseller düzenine göre, bilgisayarda istatistik paket programı (TOTEMSTAT) yardımıyla varyans analizleri; ele alınan faktörlere ait ortalamaların farklılık gruplandırılmalarını oluşturmak için 0.05 düzeyinde Duncan testi yapılmıştır [15]. Çalışmada, yıllar ayrı ayrı analiz edilmiş olup, yıl etkisini incelemek için

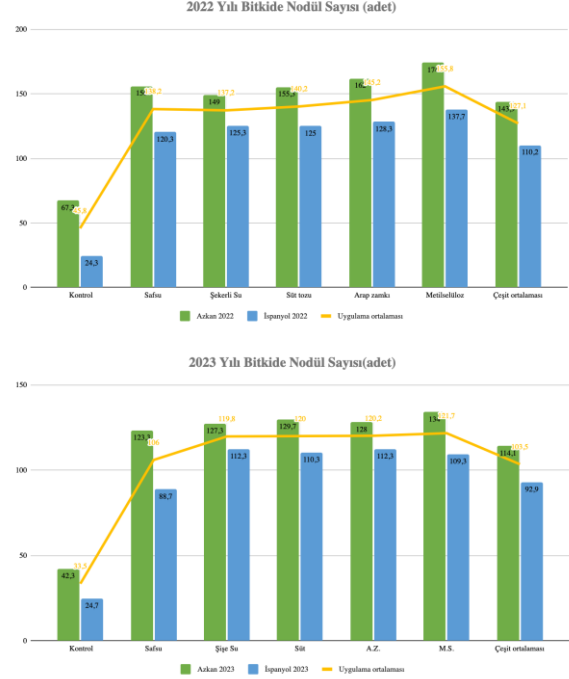
3. Bulgular ve Tartışma

Nohut bitkisinde tohuma bakteri aşılama farklı yapıştırıcı maddelerin kullanıldığı bu çalışmada; nohut çeşitlerinde bitkide nodül sayısı ve ağırlığı, ilk çiçeklenme süresi, bitki boyu, bitkide bakla ve tane sayısı, bitki verimi, hasat indeksi, tohum verimi ve yüz tane ağırlığı özellikleri yıllara göre ayrı ayrı değerlendirilmiş ve elde edilen ortalamalar ayrı başlıklar altında aşağıda açıklanmıştır.

3.1. Nodül sayısı

Bitkide nodül sayısı özelliğine ilişkin verilerle yapılan varyans analiz sonuçlarına göre, denemenin birinci

(2022 yılı) yılında çeşitler ve uygulamalar arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak ($p \leq 0.01$) önemli; çeşit x uygulama etkileşimini ise önemsiz bulunmuştur. İkinci yılda (2023 yılı) ise hem çeşitler ve uygulamalar arasındaki farklılıklar hem de çeşit x uygulama etkileşimini önemli ($p \leq 0.01$) bulunmuştur. Yıllara göre elde edilen ortalamalar Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Bitkide nodül sayısı ortalamaları

Her iki deneme yılında da en düşük nodül sayıları bakteri aşılama yapılmayan parsellerde gözlemlenmiş ve bakteri aşılama ile nodülasyonun arttığı belirlenmiştir. Genellikle kontrol dahil tüm uygulamalarda Azkan çeşidinde nodül sayısı İspanyol genotipine göre daha yüksek bulunmuştur (Şekil 1). Bunun nedeni olarak kullanılan çeşitlerin genotipik yapılarının farklı olması söylenebilir. Birinci yıl çeşitlerin ortalaması olarak en yüksek nodül sayısı 155.8 adet bitki⁻¹ ile metil selüloz uygulamasından elde edilmiştir. Ancak, bu uygulama ile arap zamkı uygulaması (145.2 adet bitki⁻¹) istatistiksel olarak aynı grupta yer almıştır. İkinci deneme yılında ise Azkan çeşidinde en yüksek nodül sayısı (134 adet bitki⁻¹) metil selüloz uygulamasında; İspanyol genotipinde ise süt tozu ve şekerli su uygulamasında (112.3 adet bitki⁻¹) saptanmıştır. Bu yıl hem Azkan çeşidinde hem de İspanyol genotipinde şekerli su, süt tozu, arap zamkı ve metil selüloz uygulamaları istatistiksel olarak aynı grupta değerlendirilmiştir. Saf su ve kontrol parselleri ise en düşük ortalamalara sahip olmuşlardır (Şekil 1).

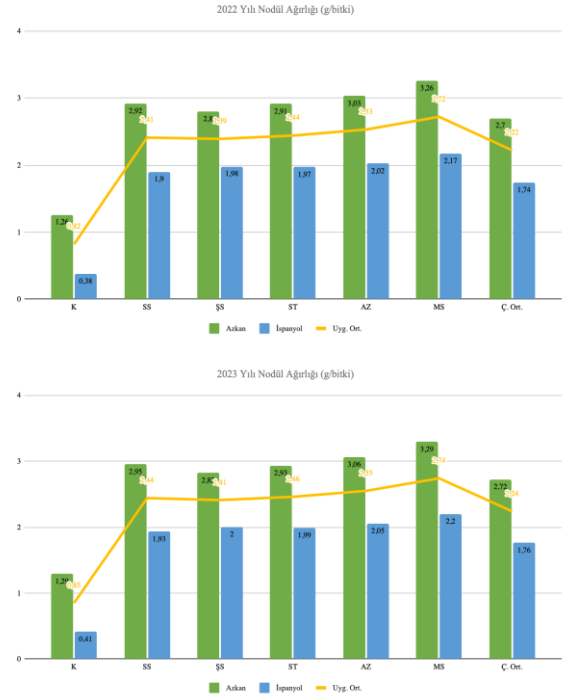
Nohut tarımının yapıldığı topraklarda yeterli sayıda *Rhizobium* bakterisi bulunmadığı takdirde, uygun bakteri suşları ile aşılama yapılması tane verimini 2.1 kat arttırabilmektedir [16]. Bu yüzden etkili bir nodülasyon hem de yüksek tohum verimi elde edebilmek için nohut tohumlarının ekimden önce türe

özgü bakteriler ile aşılması gereklidir. Farklı baklagil türleri ile yapılan çalışmalar, bakteri aşılamanın ve aşılama uygulamasında bakterileri yapıştırmak için çeşitli materyallerin kullanılmasının, bitki başına canlı bakteri ve nodül sayısını önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Tohuma bakteri aşılama farklı yapıştırıcı ajanların kullanıldığı araştırmalar; börülce çeşitlerinde nişasta ve metil selüloz [14], yonca bitkisi ile yapılan bir denemede süt tozu, sodyum aljinat ve metil selüloz karışımı [17], mung fasulyesinde arap zıncı (%20'lik çözelti) [18] ve soya çeşitlerinde biyokömür ile bazı biyopolimerlerin yapıştırıcı ajan olarak kullanıldığında bitkilerde hem nodül sayısının hem de bakteri/baklagil simbiyozunda dinitrojenaz enzim aktivitesinin arttığını göstermektedir. İsparta koşullarında saksı denemesi şeklinde yürütülen bir başka çalışmada ise bitki başına en yüksek nodül sayısının bakterilerin tohumlara arap zıncı ile yapıştırılması neticesinde elde edildiği bildirilmiştir [19].

3.2. Nodül ağırlığı

Bitkide nodül ağırlığına ilişkin varyans analiz sonuçlarına göre, 2022 yılında çeşit x uygulama interaksyonu önemsiz iken, çeşitler ve uygulamalar arasındaki farklılıklar önemli ($p \leq 0.01$) bulunmuştur. 2023 yılında ise çeşitler ve uygulamalar arasındaki farklar $p \leq 0.01$ düzeyinde; çeşit x uygulama interaksyonu $p \leq 0.05$ düzeyinde önemli olarak belirlenmiştir. Nodül ağırlığı ortalamaları Şekil 2'de verilmiştir.

Hem 2022 hem de 2023 yılı sonuçlarına göre en düşük nodül ağırlığı ortalamaları nodül sayısına benzer olarak aşılama yapılmayan kontrol parsellerinde saptanmıştır. Her iki yılda da hem kontrol parsellerinde hem de diğer uygulamalarda İspanyol genotipine göre Azkan çeşidinden daha yüksek nodül ağırlığı değerleri elde edilmiş olup, bu farklılıklar istatistiki yönden de önemli olmuştur. Birinci yıl en düşük nodül ağırlığı kontrol parsellerinde belirlenirken, bunu artan sırayla şekerli su, saf su ve süt tozu uygulamaları izlemiştir. En yüksek nodül ağırlıkları ise arap zıncı (2.44 g) ve metil selüloz (2.53 g) uygulamalarında saptanmış ve bu iki uygulama aynı ve üst istatistik grupta değerlendirilmişlerdir. 2023 yılında da en düşük nodül ağırlıkları her iki çeşitte de kontrol parsellerinde ölçülmüştür. Saf su ve diğer yapıştırıcı ajan uygulamaları nodül ağırlığını olumlu yönde etkilemiştir. Hem Azkan çeşidinde hem de İspanyol genotipinde en yüksek ortalamalar (sırasıyla 3.29 ve 2.20 g) metil selüloz ile bakterilerin tohuma yapıştırıldığı uygulamadan elde edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Bitkide nodül ağırlığı ortalamaları

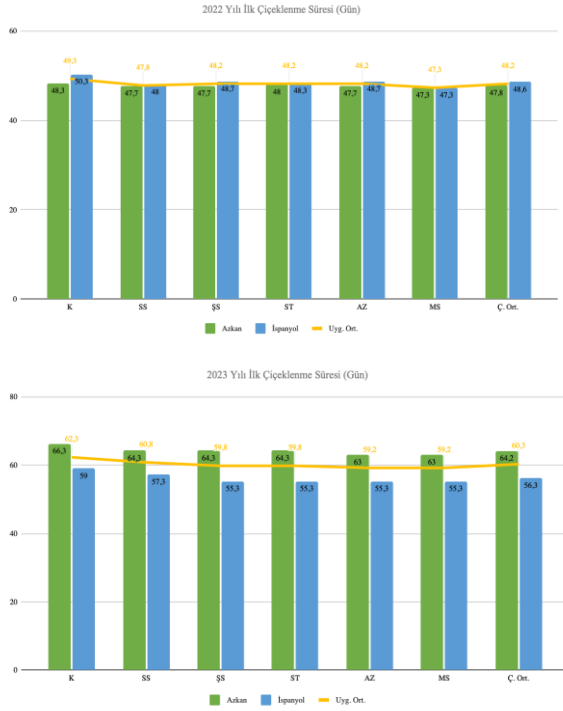
Kaya ve ark., [20]'nin yaptıkları bir araştırmaya göre, nohut yetiştiriciliğinde toprakların veya tohumların uygun bakteri (*Mesorhizobium ciceri*) suşları ile ekim öncesinde aşılmasıyla nodülasyon ve bitki gelişiminin olumlu yönde etkilenecek tane veriminin arttığı bildirilmiştir. Özbağ [6], nohut bitkisi üzerinde yapmış olduğu bir araştırmada, bakteri aşılama parsellerine göre aşılamanın bitkide nodül yaş ağırlığını 3.52 kat, kuru ağırlığını ise 3.57 kat arttırdığını vurgulamıştır. Farklı baklagil türleri üzerinde yapılan birçok araştırmada, türe uygun bakterilerle tohum aşılama bakterileri yapıştırmak için yapıştırıcı ajan kullanımının bitki başına nodül sayısını, dolayısıyla nodül ağırlıklarını da arttırdığı açıklanmıştır [13; 17; 18; 19; 21; 22; 23; 24].

3.3. İlk çiçeklenme süresi

Bakteri aşılama farklı yapıştırıcı ajanların kullanıldığı çalışmada, varyans analiz sonuçlarına göre ilk çiçeklenme süresi özelliğinde, her iki deneme yılında da çeşit x uygulama interaksyonu önemsiz olarak belirlenmiştir. Birinci yıl istatistiki bakımdan çeşitler arasındaki farklılıklar $p \leq 0.05$ düzeyinde, uygulamalar arasındaki farklılıklar $p \leq 0.01$ düzeyinde; ikinci yılda ise hem çeşitler hem de uygulamalar arasındaki farklılıklar $p \leq 0.01$ düzeyinde istatistiki olarak önemli bulunmuştur. İlk çiçeklenme süresine ait ortalamalar Şekil 3'te özetlenmiştir.

Uygulamaların ortalaması bakımından ilk çiçeklenme süresi özelliği ortalamaları incelendiğinde, birinci yıl 47.8 gün ile Azkan çeşidinin İspanyol genotipine (48.6 gün) göre daha kısa sürede çiçeklendiği, ikinci yılda ise birinci yılın tersine İspanyol genotipinin (56.3 gün) Azkan çeşidinden (64.2 gün) daha erken çiçeklendiği

görülmektedir (Şekil 3). Bu farklılığın nedeninin, deneme yıllarında özellikle vejetasyon döneminde aylık toplam yağış ve ortalama sıcaklık değerlerinin farklılık göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 2022 yılında en geç çiçeklenme gün sayısı 49.3 gün ile bakteri aşılınmayan kontrol parsellerinde saptanmıştır. Bakteri aşılama ve yapıştırıcı ajan uygulamaları çiçeklenme süresini önemli düzeyde kısaltmıştır. En erken çiçeklenme süresi 47.3 gün ile metil selüloz uygulamasında belirlenmesine karşın, bu uygulama ile saf su, şekerli su, süt tozu ve arap zıncı uygulamaları aynı istatistiksel grupta değerlendirilmiştir. 2023 yılında da birinci yıla benzer olarak en geç çiçeklenme süreleri kontrol (62.7 gün) grubunda belirlenmiştir. En kısa çiçeklenme süreleri ise 59.2 gün ile metil selüloz ve arap zıncı uygulamalarında belirlenmiş olmakla birlikte, bu iki uygulama ile süt tozu ve şekerli su uygulaması aynı istatistiksel grupta yer almıştır.



Şekil 3. İlk çiçeklenme süresi ortalamaları

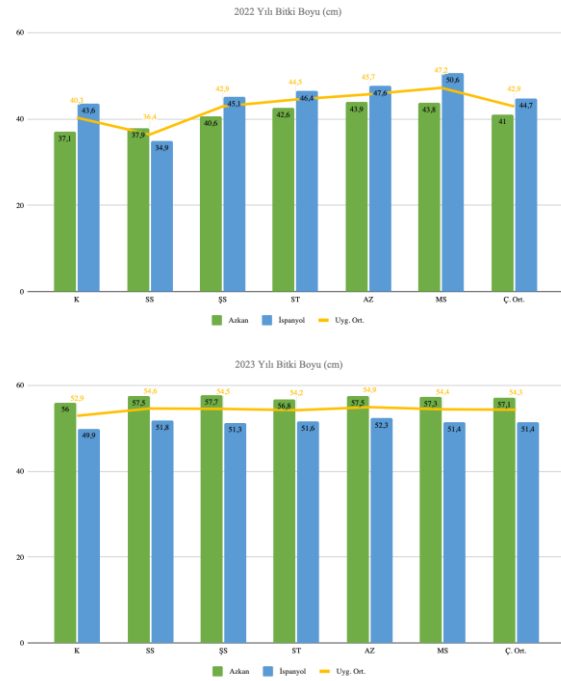
Nohut bitkisinde çiçeklenme süreleri kullanılan çeşitlerin genetik yapılarından daha çok etkilenmekte olup, bitkinin yetiştirildiği bölgenin ekolojik koşulları ile tarımsal uygulamalar da etkili olabilmektedir [25; 26]. Nohut tarımında erken çiçeklenme, tane dolum süresini uzatmakta ve çiçeklenme periyodunun yüksek sıcaklık ve kuraklık stresinin yaşanmadığı aylara denk gelmesinden dolayı tohum veriminin yükselmesine neden olmaktadır.

Ayrıca yeni nohut çeşitlerinin geliştirilmesinde kullanılan ıslah kriterlerinden birisi de çiçeklenme süresidir [26;27]. Nohutta ilk çiçeklenme süresi üzerine çeşitli araştırmalar yapılmış olup, Konya'da yürütülen bir denemede bunun yıllara ve genotiplere [25], Batı Akdeniz Bölgesi ekolojik koşullarında

yürütülen başka bir çalışmada ise lokasyon ve çeşitlere göre varyasyon gösterdiği bildirilmiştir [27]. Isparta ekolojik koşullarında nohut çeşitleri ile yürütülen çalışmada da, çeşitlere ve ekim öncesi tohum uygulamalarına göre çiçeklenme süresinin önemli düzeyde değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir [26].

3.4. Bitki boyu

Varyans analiz sonuçlarına göre, 2022 yılında yapıştırıcı ajan uygulamaları arasındaki farklılıklar $p \leq 0.05$ düzeyinde, 2023 yılında ise çeşitler arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak $p \leq 0.01$ düzeyinde önemli bulunmuştur. Birinci yıl çeşitler, ikinci yıl ise uygulamalar arasındaki farklılıklar önemsiz olarak belirlenmiştir. Şekil 4'te yıllara göre ayrı ayrı elde edilen ortalamalar gösterilmiştir.



Şekil 4. Bitki boyu ortalamaları

Tohuma bakteri aşılama farklı yapıştırıcı ajanların kullanıldığı nohut çeşitlerinde, bitki boyu bakımından elde edilen ortalamalar incelendiğinde, birinci yıl çeşitlerin ortalaması bakımından en düşük bitki boyu 36.4 cm ile saf su uygulanan parsellerde belirlenmiştir. Ancak saf su uygulaması yapılan parseller ile kontrol, şekerli su, süt tozu ve arap zıncı uygulanan parseller aynı istatistiksel grupta yer almış olup, aralarındaki farklılıklar önemsiz bulunmuştur. En yüksek bitki boyu ortalaması ise 47.2 cm ile metil selüloz uygulanan parsellerde saptanmıştır. İkinci yılda ise bitki boyuna uygulamaların etkisi önemsiz bulunmuş, sadece çeşitler arasındaki farklar anlamlı olmuştur. Bu bakımdan 57.1 cm ile Azkan çeşidinin boyu İspanyol genotipinden (51.4 cm) daha uzun olarak kaydedilmiştir (Şekil 4).

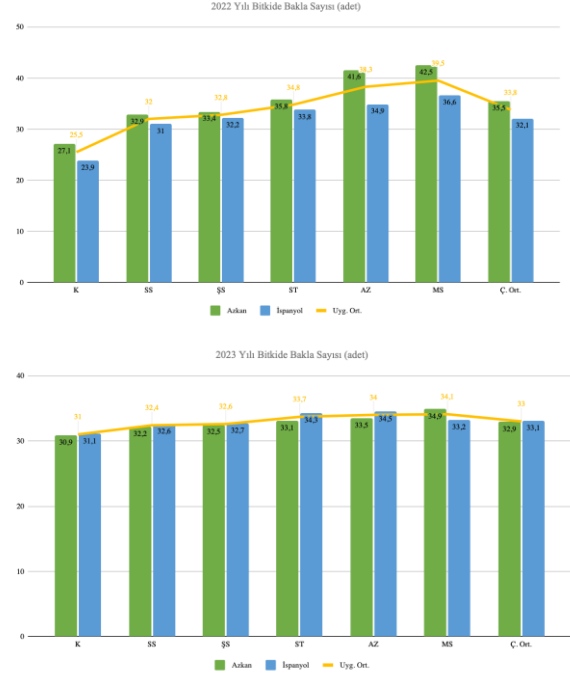
Nohutta bitki boyu özelliği açısından kalıtım derecesinin yüksek olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte bitkinin yetiştirildiği bölgelerin çevre koşulları ile ekim zamanı, ekim normu ve bitki sıklığı gibi tarımsal işlemlerin de bitki boyunu etkilediği belirtilmiştir [27; 28]. Genellikle nohut üretiminde makine ile hasat ve bitki başına yüksek verimlilik için yüksek bitki boyu istenmektedir. Ayrıca bitki boyu karakteri önemli bir ıslah kriteri olarak ele alınmaktadır [27]. Literatür bilgilerine göre, nohutta bakteri aşılama ile bitki boyu başta olmak üzere pek çok bitki gelişim parametresi olumlu yönde etkilenmektedir. Erzurum koşullarında yapılan bir çalışmada, farklı nohut çeşitlerinde bakteri aşılama ile kontrole göre bitki boyunu % 6, bitki azot içeriğini % 10.9 ve bitkinin bazı makro ve mikro besin elementleri alım oranlarını % 1.9-17.4 arasında arttırdığı belirtilmiştir [6]. Benzer şekilde Ankara'da nohutta yapılan bir çalışmada bakteri aşılama ile bitki boyu önemli düzeyde artış göstermiştir [12]. Isparta koşullarında yürütülen başka bir çalışmada, nohutta tohumla bakteri aşılama için kullanılan yapıştırıcı maddelerin bitki boyunu olumlu yönde etkilediği ve en iyi sonuçların arap zamkı ile yapıştırma uygulamasından elde edildiği vurgulanmıştır [19]. Monisha ve ark. [18], mung fasulyesi üzerinde yaptıkları çalışmada, uygulama yapılmayan ve sadece su uygulamasına göre, bakterilerin arap zamkı, guar ve ksantan zamkı ile yapıştırılmasının bitki boyunu önemli düzeyde arttırdığını belirtmişlerdir.

3.5. Bitkide bakla sayısı

Varyans analiz sonuçlarına göre, 2022 yılında çeşitler arasındaki farklılıklar $p \leq 0.05$ düzeyinde; uygulamalar arasındaki farklılıklar ile çeşit x uygulama interaksyonu $p \leq 0.01$ düzeyinde önemli bulunmuştur. 2023 yılında ise sadece uygulamalar arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak önemli ($p \leq 0.01$) olmuş, çeşitler ve çeşit x uygulama interaksyonu önemsiz çıkmıştır. Elde edilen ortalamalar Şekil 5'te özetlenmiştir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi, 2022 yılında her iki çeşitte de bakteri aşılama ve yapıştırıcı ajan uygulamalarıyla bakla sayısı artmıştır. Ele alınan tüm uygulamalarda Azkan çeşidi daha yüksek bakla sayısına sahip olmuştur. Aynı yıl hem Azkan hem de İspanyol genotipinde en düşük ortalamalar kontrol parsellerinde (sırasıyla 27.1 ve 25.5 adet) belirlenmiştir. En yüksek bakla sayısı ortalamaları ise Azkan çeşidinde metil selüloz ve arap zamkı uygulamalarında (sırasıyla 42.5 ve 41.6 adet) saptanmıştır. Benzer şekilde İspanyol genotipinde de metil selüloz (39.5 adet) ve arap zamkı (38.3 adet) uygulamalarında en yüksek ortalamalar belirlenmiştir. Bakla sayısı bakımından bu iki uygulama da aynı istatistiksel grupta yer almıştır. Çeşitlerin ortalaması bakımından 2023 yılında da en düşük bakla sayıları kontrol parsellerinde (31.0 adet) bulunmuş ve yapıştırıcı ajan uygulamaları bakla

sayısını olumlu yönde etkilemiştir. En yüksek bakla sayısı ortalamalarının 34.1 adet ile metil selüloz ve 34.0 adet ile arap zamkı uygulamalarında olduğu belirlenmiştir. Ancak bu iki uygulama ile bakteri yapıştırmada kullanılan süt tozu ve şekerli su uygulaması aynı istatistiksel grupta değerlendirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Bitkide bakla sayısı ortalamaları

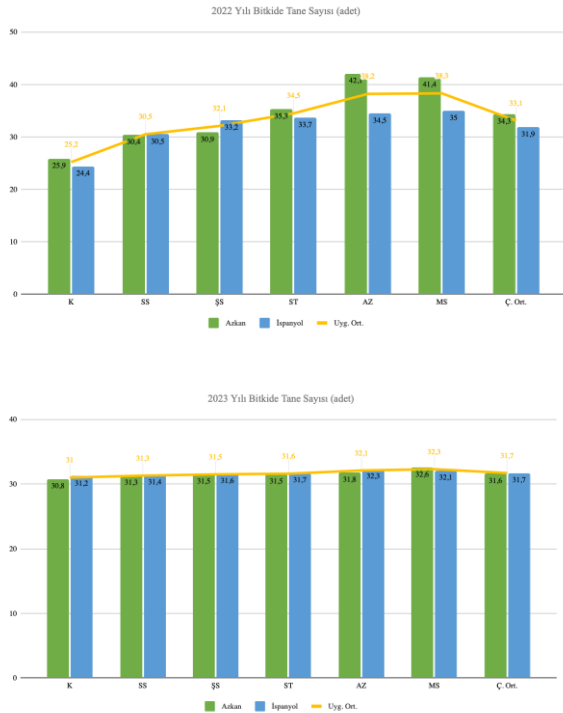
Nohutta bitki başına bakla sayısı ile bitki verimi ve birim alandaki tohum verimi arasında önemli ve pozitif korelasyonlar (0.817**) olmasına bağlı olarak bakla sayısının yüksek olması istenmektedir [29]. Nohut bitkisinde bitki başına bakla sayısı; çeşitlerin genetik yapısı, yetiştirildiği bölgelerin ekolojik koşulları, genotip x çevre interaksyonları ile yetiştirme tekniği paketindeki agronomik uygulamalara göre değişebilmektedir [26]. Yonca çeşitleri üzerinde yapılan bir çalışmada, tohumlara bakteri bulaştırılmasında yapıştırıcı ajan olarak metil selüloz ve sodyum aljinat uygulamalarının bakla sayısında önemli artışlara neden olduğu [17], kumlu toprak koşullarında nohutta yapılan bir çalışma sonucuna göre ise biyokömür kullanımının bakla sayısını olumlu etkilediği bildirilmiştir [30]. Börülcede yapılan bir çalışmada tohumla bakteri aşılama [31], nohutta tohumlara ekim öncesi çinko uygulaması [26] ve yine nohut bitkisinde tohumlara harpin proteini uygulaması ile [28] bitkide bakla sayısının arttığı belirtilmiştir. Batı Akdeniz koşullarında yürütülen bir çalışmada ise nohutta bakla sayısının çeşitler ve lokasyonlara göre önemli düzeyde değişebildiği açıklanmıştır [27].

3.6. Bitkide tane sayısı

Varyans analiz sonuçlarına göre, çeşitler arası ($p \leq 0.05$) ve uygulamalar arası ($p \leq 0.01$) farklılıklar ile

çesit x uygulama interaksyonunu ($p \leq 0.01$) istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Denemenin ikinci (2023) yılında ise sadece uygulamalar arasındaki farklılıklar istatistiki bakımdan ($p \leq 0.01$) önemli olmuştur. Çesitler arası farklar ile çesit x uygulama interaksyonunu önemsiz bulunmuştur. Tane sayısı ortalamaları Şekil 6'da özetlenmiştir.

Şekil 6'da gösterildiği üzere, 2022 yılı verilerine göre hem Azkan çeşidinde hem de İspanyol genotipinde en düşük bitki başına tane sayıları kontrol parsellerinde (sırasıyla 25.9 ve 24.4 adet) gözlemlenmiş olup, bakterileri yapıştırmak için kullanılan uygulamalar tane sayısını olumlu yönden etkilemiştir. En yüksek tane sayısı 42.1 adet ile Azkan çeşidinde arap zamkı uygulamasında saptanmıştır. Bu uygulama ile metil selüloz uygulanan parseller aynı grupta yer almıştır. İspanyol genotipinde ise en yüksek ortalama metil selüloz uygulamasında (35 adet) belirlenirken, bu uygulama ile arap zamkı ve süt tozu uygulamalarının benzer ortalamalara sahip olduğu tespit edilmiştir. Denemenin ikinci (2023) yılında sadece uygulamalar arası farklılıklar önemli olup, en düşük ortalama 31 adet ile kontrol parsellerinde, en yüksek ortalama ise 32.3 adet ile metil selüloz uygulamasında saptanmıştır. Metil selüloz ile arap zamkı uygulamaları birbirine benzer sonuçlar sergilemiş olup, istatistiki olarak aynı grupta değerlendirilmiştir.



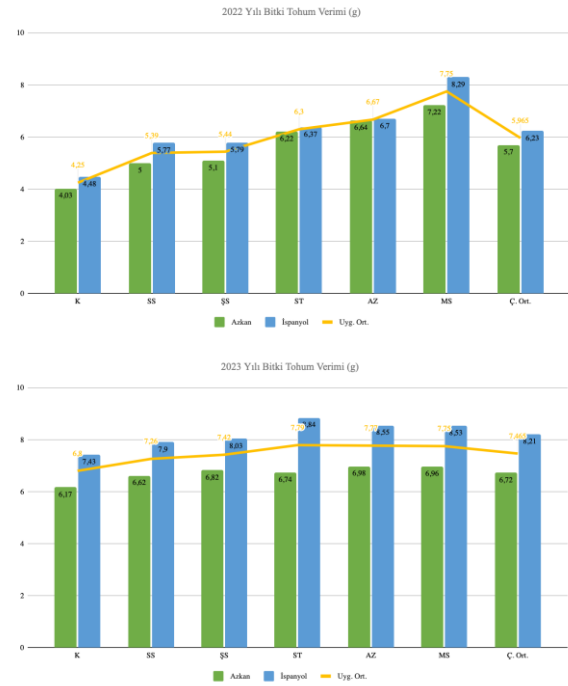
Şekil 6. Bitkide tane sayısı ortalamaları

Nohut bitkisinde çesit geliştirme ıslahında; bitkide tane sayısı tohum verimi ile olan olumlu ve pozitif korelasyonların yanında verime doğrudan ve yüksek katkı sağlaması nedeniyle seleksiyonda önemli bir kriter olarak kullanılmaktadır [29]. Tane sayısı genetik yapı, çevresel etmenler, genotip x çevre interaksyonları ve tarımsal uygulamalara göre

değişebilmektedir [26]. Konu üzerinde yapılan çalışmalarda, tuzlu koşullarda [32] ve kurak/yarı kurak iklim koşullarında [16] nohutta bakteri aşılmasının bitkide bakla ve tane sayısını önemli oranda arttırdığı çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

3.7. Bitki tohum verimi

Nohut çeşitlerinde tohuma bakteri aşılama farklı yapıştırıcı maddelerin kullanıldığı bu çalışmada, bitki tohum verimine ilişkin varyans analiz sonuçlarına göre, 2022 yılında sadece uygulamalar arasındaki farklılıklar $p \leq 0.01$ düzeyinde; 2023 yılında çeşitler ve uygulamalar arasındaki farklılıklar $p \leq 0.01$ düzeyinde, çesit x uygulama interaksyonu ise $p \leq 0.05$ düzeyinde önemli olmuştur. Şekil 7'de bitki tohum verimi ortalamaları özetlenmiştir.



Şekil 7. Bitki tohum verimi ortalamaları

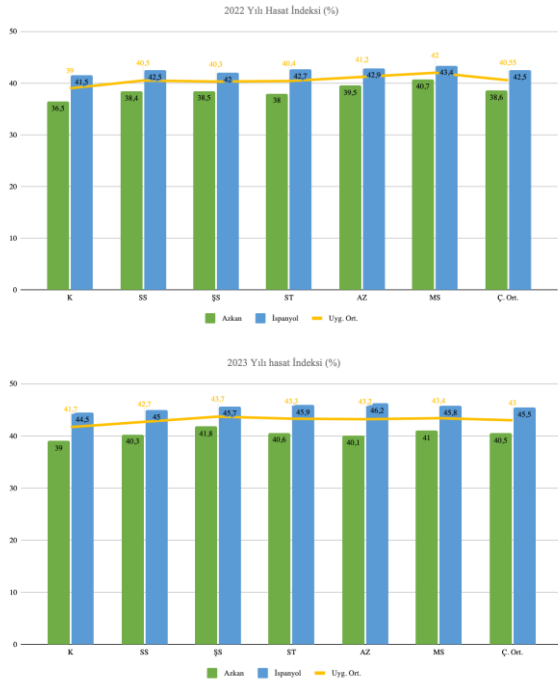
Bitki tohum verimi bakımından 2022 verileri incelendiğinde, çeşitlerin ortalaması olarak en düşük değer 4.25 g ile kontrol parsellerinde saptanmıştır. Bakteri aşılama yapıştırıcı ajan kullanımı bitki verimini olumlu yönde etkilemiş, tüm uygulamalarda verim artmıştır. En yüksek ortalamanın 7.75 g ile metil selüloz uygulanan parsellerde olduğu belirlenmiştir (Şekil 7). 2023 yılında hem Azkan çeşidinde hem de İspanyol genotipinde en düşük verim değerleri kontrol parsellerinden (sırasıyla 6.17 ve 7.73 g) elde edilmiştir. Aynı yıl Azkan çeşidinde en yüksek verim 6.98 g ile arap zamkı uygulamasında belirlenmiş olmakla birlikte; bu uygulama ile metil selüloz, süt tozu, şekerli su ve saf su uygulamalarından elde edilen değerler, istatistiksel olarak aynı grupta değerlendirilmiştir. İspanyol genotipinde ise en yüksek verim 8.84 g ile süt tozu uygulanan parsellerde

ölçülmüş, bu uygulama ile arap zamkı ve metil selüloz aynı istatistikî grupta yer almıştır.

Nohut çeşit geliştirme ıslahında bitki verimi özelliği de önemli seleksiyon kriterleri arasında yer almakta olup, ekim sıklıklarının önerilen değerlerde olması durumunda bitki verimi yüksek olan çeşitlerde birim alandan elde edilen tohum verimi de önemli oranda artmaktadır [26; 33]. Yılmaz [28], nohut genetik yapının, çevresel faktörlerin ve agronomik uygulamaların bitki tohum verimini önemli düzeyde etkilediğini bildirmiştir. Nohut üzerinde yapılan çalışma sonuçlarına göre, ekimden önce bakteri aşılama ve azot uygulamasının [16], ekimden önce tohumlara çinko uygulamasıyla [26] ve ekim öncesi tohumların ozmotik koşullandırılması uygulamasının [34] bitki tohum verimini arttırdığı belirtilmiştir. Nohut üzerinde yapılan başka bir çalışmada ise nohut tohumlarının ekimden önce bakteri ile aşılama ve bakteri bulaşmasını sağlamak için yapıştırıcı madde kullanımının bitki başına tohum verimini yükselttiği bildirilmiştir [35].

3.8. Hasat indeksi

Varyans analiz sonuçlarına göre, 2022 yılında çeşitler ve uygulamalar arasındaki farklılıklar $p \leq 0.01$ düzeyinde önemli bulunmuştur. Denemenin ikinci (2023) yılında ise sadece çeşitler arasındaki farklar $p \leq 0.05$ düzeyinde önemli olmuştur. Her iki yılda da çeşit x uygulama interaksyonları önemsiz olarak hesaplanmıştır. Hasat indeksi bakımından elde edilen değerler Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Hasat indeksi ortalamaları

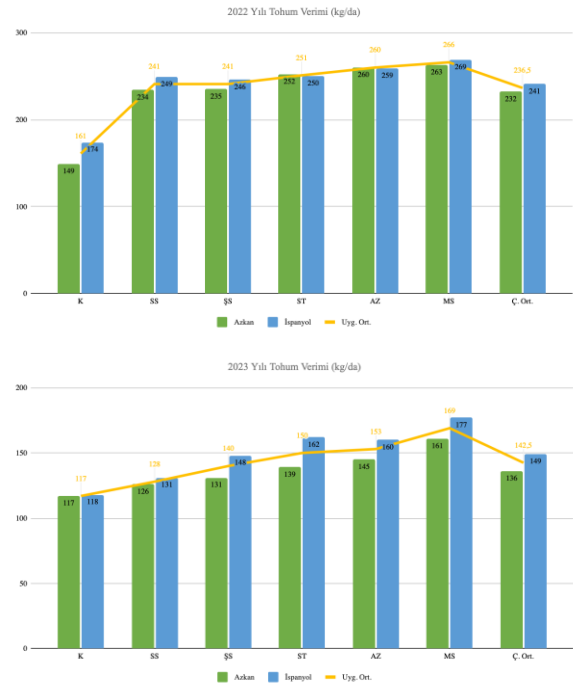
Şekil 8'de görüldüğü gibi, 2022 yılında uygulamaların ortalaması olarak, hasat indeksi İspanyol genotipinde (%42.5) Azkan çeşidine (%38.6) göre daha yüksek

bulunmuştur. Yapıştırıcı ajan uygulamaları yönünden değerlendirildiğinde en düşük değerler kontrol uygulamasında belirlenmiş olup, yapıştırıcı madde uygulamaları (şekerli su dışında) hasat indeksini arttırmıştır. En yüksek ortalama metil selüloz uygulamasında (%42) saptanmıştır. İkinci yılda ise sadece çeşitler arası farklılıklar önemli bulunmuştur. Birinci yıla benzer olarak İspanyol genotipinde daha yüksek (%45.5) hasat indeksi değerleri belirlenmiştir.

Hasat indeksi nohut çeşitlerinin genotipik özellikleri ile agronomik uygulamalara göre değişebilmekte olup, tohum verimi ile doğrusal bir korelasyon gösterdiği için yüksek olması istenen bir özelliktir [26; 33; 36]. Ankara koşullarında farklı bitkilerle yapılan çalışma sonuçlarına göre, nohutta [12] ve bezelyede [20] bakteri aşılama ile düşük azot dozlarında hasat indeksinin olumlu yönde etkilendiği bildirilmiştir. Konya'da yapılan bir çalışmada nohutta hasat indeksinin çeşitlere göre [25] ve Isparta'da yapılan bir çalışmada ise ekim öncesi tohum uygulamalarının hasat indeksini arttırdığı belirlenmiştir [28].

3.9. Tohum verimi

Birim alan tohum verimi varyans analizlerine göre, 2022 yılında uygulamalar arasındaki farklılıklar ($p \leq 0.01$) ile çeşit x uygulama interaksyonu ($p \leq 0.05$); 2023 yılında ise çeşitler ($p \leq 0.05$) ve uygulamalar arası ($p \leq 0.01$) farklılıklar ile çeşit x uygulama interaksyonu ($p \leq 0.01$) önemli bulunmuştur. Tohum verimi ortalamaları Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Tohum verimi ortalamaları

Birim alan tohum verimi değerleri incelendiğinde; 2022 yılında çeşitlerin ortalaması olarak en düşük ortalamalar 161.2 kg da^{-1} ile kontrol parsellerinde belirlenmiştir. Bakteri aşılama ve yapıştırıcı madde

kullanımı verimi olumlu yönde etkilemiştir. En yüksek verim ise 266.1 kg da⁻¹ ile metil selüloz uygulamasında saptanmış ve arap zamkı uygulaması ile aynı grupta yer almıştır. Çeşit x uygulama interaksyonu bakımından da Azkan ve İspanyol nohut çeşitlerinde en düşük verimler kontrol parsellerinden (sırasıyla 148.6 ve 173.9 kg da⁻¹) elde edilmiştir. En yüksek verimler her iki çeşitte de metil selüloz uygulanan parsellerde (sırasıyla 263.3 ve 268.8 kg da⁻¹) saptanmıştır. Azkan çeşidinde süt tozu, arap zamkı ve metil selüloz uygulamaları; İspanyol genotipinde ise arap zamkı ve metil selüloz uygulamaları aynı grupta değerlendirilmiştir. İkinci yıl (2023) verilerine göre, birinci yıla benzer olarak en düşük verimler kontrol parsellerinde görülmüştür. En yüksek verimler ise Azkan çeşidi ve İspanyol genotipinin metil selüloz parsellerinde (161.1 ve 176.8 kg da⁻¹) hesaplanmıştır. Her iki yılda da genel olarak İspanyol genotipi daha verimli olmuştur.

Nohut bitkisinde tohum verimi; çeşitlerin genotipik özellikleri, yetiştirildiği bölgenin iklim ve toprak özellikleri ile yetiştirme tekniği içerisindeki agronomik işlemlere göre değişebilmektedir. Birim alan tohum veriminin yüksekliği hem araştırmacıların hem de çiftçilerin öncelikli ve nihai hedefleri arasında sayılmaktadır. Nohutta çeşitlerin verim potansiyeli çok sayıda morfolojik özelliğin doğrudan ya da dolaylı etkilerine bağlıdır [33; 36]. Nohut çeşitleri [12] ve bezelyede yapılan bir çalışmada [20] bakteri aşılama ile tohum veriminin arttığı açıklanmıştır. Nohutta tohumlara bakteri aşılama yapıştırıcı madde olarak metil selüloz ve sodyum aljinat yanında yağsız süt tozu uygulaması ile tohum veriminin önemli düzeyde arttığı tespit edilmiştir. Gezahegn [31], börülce genotipleri ile yürüttüğü çalışmada bakteri aşılama ile tohum veriminin %53 oranında arttığını vurgulamıştır.

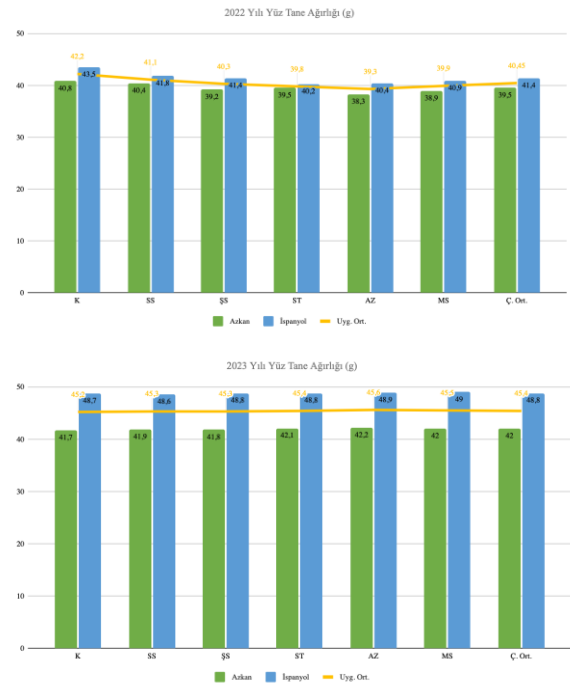
3.10. Yüz tane ağırlığı

Varyans analiz sonuçlarına göre, 2022 yılında çeşitler ve uygulamalar arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak p≤0.01 düzeyinde önemli; 2023 yılında ise çeşitler arasındaki farklılıklar p≤0.01 düzeyinde önemli olmuştur. Ortalama değerler Şekil 10'da gösterilmiştir.

Denemenin birinci yıl (2022) verilerine göre, İspanyol genotipinin (41.4 g) Azkan çeşidine (39.5 g) kıyasla daha yüksek yüz tane ağırlığına sahip olduğu görülmektedir. Uygulamalar yönünden değerlendirildiğinde en yüksek değer (42.2 g) kontrol parsellerinde saptanmıştır. Bakterileri tohumla yapıştırmak için kullanılan tüm uygulamalar tane iriliğini azaltmıştır. En düşük yüz tane ağırlığı arap zamkı uygulamasında belirlenmiştir. İkinci (2023) yıl ise bakteri aşılama yapıştırıcı madde uygulamalarının yüz tane ağırlığına etkisi olmamıştır. Birinci yıla benzer olarak İspanyol genotipinde tane

iriliği Azkan çeşidine göre önemli düzeyde yüksek bulunmuştur.

Nohutta yüz tane ağırlığı özelliğinin kalıtım derecesi oldukça yüksek olup, çeşit geliştirmek amacıyla kullanılan önemli seleksiyon kriterlerinden birisidir [26; 29]. Tane iriliği yüksek olan çeşitlerin genellikle verimleri de yüksek olmakta ve iri tanelilik nohutta pazar fiyatını olumlu yönde etkilemektedir. Ullah ve ark. [30], kumsal toprak koşullarında nohut tohumlarına biyokömür uygulaması ile tane iriliğinin arttığını belirtmişlerdir. Nohut ve börülce çeşitleri ile yapılan denemelerde bakteri aşılama ile tohum iriliğinin önemli düzeyde arttığı vurgulanmıştır [31; 37].



Şekil 10. Yüz tane ağırlığı ortalamaları

Denemeden elde ettiğimiz sonuçlar diğer araştırmacıların sonuçları ile uyumsuz bulunmuştur. Bu farklılığın nedenleri; kullanılan çeşitlerin farklı olması, bakteri aşılama yapıştırıcı madde uygulamasıyla bitki başına bakla ve tohum sayısının çok önemli düzeyde artması, bitkinin tane doldurma rekabetinin azalmasından kaynaklandığı söylenebilir.

4. Sonuç ve Öneriler

Azkan nohut çeşidi ile İspanyol genotiplerinde bakteri aşılama tohumlara bakterileri yapıştırmak için farklı yapıştırıcı maddelerin kullanıldığı bu çalışmada, nodülasyon verileri ve bazı morfolojik özellikler ele alınmıştır. Araştırmadan elde edilen sonuçlar topluca değerlendirildiğinde, yüz tane ağırlığı özelliği dışındaki diğer tüm özelliklerde bakteri aşılama yapıştırıcı madde kullanımının olumlu etkilerinin olduğu gözlenmiştir. Yüz tane ağırlığı özelliğinde bakteri aşılama yapıştırıcı madde uygulamaları kontrole göre tane iriliğinin azalmasına neden

olmuştur. Tane verimine doğrudan ya da dolaylı olarak katkısı bulunan diğer özellikler (nodül sayısı ve ağırlığı, bitki boyu, bitkide bakla ve tohum sayısı, bitki verimi, hasat indeksi özellikleri) bakımından yapıştırıcı ajan uygulamalarının olumlu etkilerinin olduğu belirlenmiştir. Üreticilerin nihai hedefi durumundaki tohum verimi üzerine, bakteri aşılama yapıştırıcı madde kullanımları kontrol parsellerine göre önemli artışlar sağlamıştır.

Her iki nohut genotipinde de bakteri aşılama yapıştırıcı madde uygulamaları hem nodülasyon özellikleri hem verim ve verim unsurları bakımından yüksek değerlerin elde edilmesine neden olmuştur. Genellikle denemede ele alınan birçok özellikte metil selüloz ve arap zamkı uygulamaları en iyi sonuçların alınmasını sağlamıştır. Bu sonuçlar nohutta tohumlara bakteri aşılama yapılırken, yapıştırıcı ajan olarak metil selüloz ve arap zammının rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın 1. yıl verileri Cemile Tekeli'nin yüksek lisans tezinden özetlenmiştir.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

Kaynakça

- [1] Avçin, A., Avci, M.1992. Soil water and inorganic nitrogen accumulation of sowing time of wheat in a two-year rotation as influenced by previous crops under central Anatolian conditions. Fertilizer use efficiency under rain-fed agriculture in west Asia and North Africa. In Proceedings of the fourth regional workshop, 5-10 May, Agadir, Morocco, 64-70.
- [2] Calcagno, F., Gallo, G., Venora, G., Iaiani, M., Raimondo, I. 1988. Early sowing increases chickpea yields in the dry, warm environment of Sicily, Italy. International Chickpea Newsletter, 18, 28-29.

- [3] Sepetoğlu, H. 1992. Yemelik Dane Baklagiller. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, İzmir, 262s.
- [4] Sattar, M. A., Podder, A. K., Chanda, M. C. 1996. Rhizobial biofertilizers: the most promising BNF technology for increased grain legume production in Bangladesh. In Biological Nitrogen Fixation Associated with Rice Production: Based on selected papers presented in the International Symposium on Biological Nitrogen Fixation Associated with Rice, 28 November–2 December, Dhaka, Bangladesh, 15-20.
- [5] Beck, D. P. 1992. Yield and nitrogen fixation of chickpea cultivars in response to inoculation with selected rhizobial strains. Agronomy Journal, 84(3), 510-516.
- [6] Özbağ, T. 2013. Tescilli Bazı Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Simbiyotik Performansları ve Bitki Besin Elementi Alımının Belirlenmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92s, Erzurum.
- [7] Şener, A. 2023. Legume (*Leguminosae*) – Microorganism (*Rhizobium*) Relationships. ss 197-210. Çolak, A. M., Mertoğlu, K. ed. 2023. Plant Microbe Interactions, İksad Publishing House, Türkiye, 246s.
- [8] Elegba, M. S., Rennie, R. J. 1984. Effect of different inoculant adhesive agents on rhizobial survival, nodulation, and nitrogenase (acetylene-reducing) activity of soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill). Canadian Journal of Soil Science, 64(4), 631-636.
- [9] Kumar, M. S., Thangaraju, M. 2002. Survival of *Rhizobium* strains on the legume seeds. Legume Research-An International Journal, 25(3), 184-187.
- [10] Rice, W. A., Clayton, G. W., Lupwayi, N. Z., Olsen, P. E. 2001. Evaluation of coated seeds as a *Rhizobium* delivery system for field pea. Canadian Journal of Plant Science, 81(2), 247-253.
- [11] Rai, A., Jha, M. N., Singh, D., Thapa, S., Chaurasia, S. K., Jha, G. 2021a. Detection of endophytic association between *Aeschynomene* nodulating *Bradyrhizobium* sp. and traditional Desariya rice roots under rice-Aeschynomene ecosystem of chaur land, Bihar, India. Biologia Futura, 73, 95–105.
- [12] Meral, N., Çiftçi, C. Y., Ünver, S. 1998. Bakteri aşılması ve değişik azot dozlarının nohut (*Cicer arietinum* L.)'un verim ve verim öğelerine etkileri. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi, 7(1), 44-59.
- [13] Rai, Q., Choudhury, R., Soti, P., Racelis, A. 2021b. Rhizobial adhesives enhance nodule formation in sunn hemp. bioRxiv, 1-10.

- [14] Junior, F., P. I., Rohr, T. G., Oliveira, P. J. D., Xavier, G. R., Rumjanek, N. G. 2009. Polymers as carriers for rhizobial inoculant formulations. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44, 1184-1190.
- [15] Düzgüneş, O., Kesici, T., Kavuncu, O., Gürbüz, F. 1987. Araştırma ve Deneme Metodları (İstatistik Metodları). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara, 381s.
- [16] Akdağ, C., Şehirli, S. 1995. The effects of inoculation (*Rhizobium* spp.), nitrogen application and plant density on the yield and yield components of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *The Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*, 12(1), 122-134.
- [17] Zhou, J., Deng, B., Zhang, Y., Cobb, A. B., Zhang, Z. 2017. Molybdate in rhizobial seed-coat formulations improves the production and nodulation of alfalfa. *PLoS One*, 12(1), e0170179.
- [18] Monisha, S., Renganayaki, P. R., Sundareswaran, S., Nakkeeran, S., Varanavasiappan, S. 2023. Seed coating with biodegradable stickers for enhancement of inoculant viability and their beneficial properties on seed germination of blackgram [*Vigna mungo* (L.) Hepper.]. *Agricultural Science Digest*, 43(4), 472-477.
- [19] Karaman, R., Kaya, M., Türkay, C. 2022. Effects of Mycorrhiza Effectiveness and Different Adhesive Agents Used in Bacteria Inoculation Process to Chickpea for Nodulation and Some Seedling Growth. IV. Balkan Agricultural Congress. 31 August – 02 September, Edirne, 552-557.
- [20] Kaya, M. D., Çiftçi, C. Y., Kaya, M. 2002. Bakteri aşılması ve azot dozlarının bezelye (*Pisum sativum* L.)'de verim ve verim öğelerine etkileri. *Journal of Agricultural Sciences*, 8(04), 300-305.
- [21] Thanni, B. M., Soretire, A. A., Adejuyigbe, C. O., Obuotor, T. M. 2017. Nitrogen fixation and nodulation of soybean as affected by rhizobial inoculation using different seed adhesives in a sandy clay loam soil. *Nigerian Journal of Biotechnology*, 33, 72-77.
- [22] Stupina, L. A. 2018. The influence of rizotorfin inoculant and carboxymethylated products on soybean photosynthetic activity and productivity in temperate-arid steppe of the Altai Region. *Bulletin of Altai State Agrarian University*, 7(165), 20-27.
- [23] Gözütok, M. 2021. Farklı Dozlarda Uygulanan Azotlu Gübre Formları ve Bakteri Aşılmasının Nohutta (*Cicer arietinum* L.) Nodül Oluşumu ve Bitki Gelişimi Üzerine Etkisi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62s, Kayseri.
- [24] Nakei, M. D., Venkataramana, P. B., Ndakidemi, P. A. 2023. Preliminary symbiotic performance of indigenous soybean (*Glycine max*)-nodulating rhizobia from agricultural soils of Tanzania. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1085843.
- [25] Bayrak, H., Önder, M. 2017. Konya ekolojisi'nde tarımı yapılan yerel nohut popülasyonları ve çeşitlerinin (*Cicer arietinum* L.) tarımsal, teknolojik ve besinsel karakterlerinin belirlenmesi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 26, 52-61.
- [26] Büyükdığan, C. 2021. Nohut (*Cicer arietinum* L.)'ta Çinko İçerikli Biyostimülatör ile Tohum Uygulamasının Verim ve Bazı Verim Öğelerine Etkileri. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78s, Isparta.
- [27] Sayılğan, Ç., Kocatürk, M. 2019. Sahil ve geçit kuşağına uygun tescilli ve yerel nohut çeşitlerinin Batı Akdeniz Bölgesi'nde yazlık ekim verim performanslarının değerlendirilmesi. *Derim*, 36(2), 207-216.
- [28] Yılmaz, E. D. 2021. Nohut (*Cicer arietinum* L.)'ta Harpin Proteini ile Tohum Uygulamasının Verim ve Bazı Verim Öğelerine Etkileri. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s, Isparta.
- [29] Babagil, G. E. 2010. Muş ekolojik koşullarında bazı nohut (*Cicer arietinum* L.) çeşitlerinin verim ve verim unsurlarının değerlendirilmesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 7(3), 181-186.
- [30] Ullah, S., Ul Haq, T., Shehzad, M. A., Ahmad, K. S., Imran, M., Matloob, A., Wang, J. 2023. Fe and Zn-loaded cotton-sticks biochar and organic amendments improves chickpea production by enhancing ionic uptake and chemical properties of sandy soils. *Cogent Food & Agriculture*, 9(2), 2265110.
- [31] Gezahegn, L. Y. 2023. Growth, Nodulation and Yield Response of Cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] Varieties to *Bradyrhizobium* Inoculation in Dale and Hawassa, Sidama Region, Doctoral Dissertation, Southern Ethiopia.
- [32] Ishaq, A. S., Hayatu, M., Sani, L. A., Ahmed, H. 2022. Effect of rhizobia inoculation on growth and yield of selected soybean (*Glycine max* L.) varieties under salt stress. *Journal of Agriculture and Environment*, 18(2), 37-48.
- [33] Koca, M. A. 2019. Çinko Uygulamasının Nohut (*Cicer arietinum* L.) Çeşitlerinin Tane Çinko İçeriğinin Zenginleştirilmesi ve Verim Öğelerine Etkisi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 255s, Ankara.
- [34] Şanlı, A., Kaya, M. 2008. Tohum muameleleri ile farklı ekim zamanlarının nohut (*Cicer arietinum* L.)'un verim ve verim unsurlarına etkileri.

Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi
Dergisi, 3(2), 42-51.

- [35] Erker, B., Brick, M. A. 2023. Legume seed inoculants. Colorado State University Cooperative Extension. <https://extension.colostate.edu/topic-areas/agriculture/legume-seed-inoculants-0-305/> (Erişim tarihi: 20.03.2023).
- [36] Adak, M. S. 2021. Yemelik Baklagiller. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara, 312s.
- [37] Söğüt, T. 2005. Aşılama ve azotlu gübre uygulamasının bazı soya çeşitlerinin verim ve verim özelliklerine etkisi. Akdeniz University Journal of the Faculty of Agriculture, 18(2), 213-218.

Tasarım Bürolarındaki Güdülenme Düzeylerinin Herzberg'in Çift Etmen Kuramı ile Değerlendirilmesi

Melisa ÖZKAN¹, Esin KASAPOĞLU²

¹ Sanko Holding Poligon İnşaat Turizm Sanayi ve Ticaret A.Ş., Gaziantep, Türkiye

² İstanbul Kültür Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul, Türkiye

(Alınış / Received: 21.08.2024, Kabul / Accepted: 06.11.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Herzberg
Çift Etmen Kuramı
Tasarım Büroları
Güdülenme
Mimar

Öz: Günümüzün zorlu pazar koşullarında, çalışma ortamının çalışanlar için uygunluğu, çalışanların memnuniyet, moral ve güdülenme düzeyleri, işverenlerin örgütün başarısı için dikkat etmesi gereken unsurlardır. Çalışmanın amacı, Türkiye'nin iki farklı bölgesinde, iki farklı kentte görev yapan mimarların güdülenme düzeylerini karşılaştırmaktır. Bu araştırma, Frederick Herzberg'in Çift Etmen Kuramında ortaya koyduğu etmenlerden yola çıkarak tasarım ofislerinde çalışan mimarların güdülenme düzeylerine odaklanmaktadır. Herzberg'in kuramında işteki yeterlilik, başarı, tanınma ve takdir gibi içsel (hijyen) ve çalışma koşulları ile işletme politikaları gibi dışsal güdülenme etmenleri olmak üzere iki ana etmen belirlenmiştir. Araştırma kapsamında, İstanbul ve Gaziantep'teki tasarım ofislerinde çalışan mimarların güdülenme düzeylerini ortaya çıkarmak için anket tekniği kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre Gaziantepli katılımcıların güdülenme ortalamaları çoğu etmende İstanbullu katılımcılara göre daha iyi durumda olup, Gaziantep'teki mimarlık ofislerinde çalışanların güdülenme düzeyleri daha yüksektir. Öte yandan araştırmadan elde edilen bir başka sonuç ise, kuramın tersine dış etmenlerin en az iç etmenler kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Evaluation of Motivation in Design Offices with Herzberg's Two-Factor Theory

Keywords

Herzberg
Two-Factor Theory
Design Offices
Motivation
Architect

Abstract: Today, in difficult market conditions, suitability of the working environment for the employees and their satisfaction, morale, and motivation levels are the factors employers should pay attention for the success of the organization. The objective of this study is comparing motivation levels of architects working in two different cities in two different regions of Turkey. This research focused on the motivation levels of architects working in design offices based on the factors put forth by Frederick Herzberg in Two-Factor Theory. Herzberg identified two main factors in his theory, intrinsic (hygiene) factors such as proficiency on the job, success, recognition and appreciation and external factors such as working conditions and business policy. A survey technique used to reveal motivation levels of architects working in design offices in Istanbul and Gaziantep. Based on the results of the research the motivation averages of Gaziantep participants were better in most factors compared to Istanbul participants and in this case the motivation level of employees at architectural offices in Gaziantep was higher. On the other hand, another result obtained from the research shows that, contrary to the theory, external factors are at least as important as internal factors.

*İlgili yazar: ekasapoglu@iku.edu.tr

1. Giriş

Bilgiye kolay ulaşılan, değişimin çok hızlı olduğu günümüzde iş yaşamı bir hayli zorlaşmış, bu durum kişilerin doğru yöntemlerle kendilerini sürekli geliştirmesini ve hayatta kalma mücadelesi vermesini zorunlu kılmıştır. İnsan gücü, örgütlerin başarılı olmalarını sağlayan en önemli etkenlerden biridir [1]. Bulduğu sektörde kalıcılığını sağlamak isteyen her firmanın, çalışanın önemini kavraması, işin kaliteli ve olması gereken standartlarda ortaya çıkması için, işi yapanların ve işin yapıldığı ortamın da çalışanlara uygun olması gerekmektedir. Kurumsal başarının en temel değeri, kurumun insana göstermiş olduğu anlayış ve özveri ile mümkün olmaktadır.

İnsanlar, gününün çoğunu çalışma ortamlarında geçirmektedir. Bu nedenle kişilerin gerek bedenlerini gerekse de zihinlerini kullandıkları ortamların çalışanlar için uygun çalışma koşullarına sahip olup doğru yönetilmesi, iş-özel hayat dengesinin sağlanması, adil ücretlendirme yapılıp kişilerin kendilerini geliştirmelerine fırsat tanıyan çalışma ortamları oluşturulması gerekmektedir [2]. Şirket ve kurumların insan kavramının ayırımında olması, onların moral ve güdü düzeylerini artırıcı izlemler geliştirmesinin bireylerin güdü düzeylerini arttırıp başarımında, dolayısıyla işletmenin başarısında ve karlılığında çok önemli bir etki oluşturacaktır.

İnsanların, yaşamları boyunca, dönemin koşullarına göre yenilenip değişebilen, birçok istekleri olmaktadır. Bu isteklerin temelinde "kişilerin gereksinimleri" yatmaktadır. Gereksinimlerin, yeterli düzeyde karşılanıp karşılanmamasına bakılmaksızın kişileri sürekli harekete geçiren bir özelliği bulunmaktadır. Bu özelliğin temelinde de "güdü" kavramı olup [3], insanların davranışlarının temelini bakıldığında, kişiyi harekete geçiren gereksinime veya harekete geçiren güce güdü denilmektedir [4].

Güdü kelimesi, Türkçe 'de motivasyon olarak da kullanılmakta olup, harekete geçirme, saik, teşvik etmek, isteklendirmek anlamına gelen Latince movere, motum kökünden türemiştir [5; 6]. Yapılan birçok güdü tanımının kesiştiği ortak noktandan yola çıkılarak [7; 8; 9; 10], kişilerin harekete geçmesinden bu hareketi devam ettirip sonuçlandırmasına kadar geçen bir süreç olarak tanımlanabilir. Bu süreç bir uyarıcı sayesinde başlayıp devamlılık göstermektedir [11]. Örgütsel anlamda güdü kavramı, çalışanların kişisel hedef ve beklentilerinin örgütün çıkarları ile ilişkilendirilmesi ve bunun sonucunda örgüt içerisinde çalışanların hem kendine hem de örgüte fayda sağlayıcı etki göstermesinin sağlanması açısından önemlidir [12].

Frederick Herzberg'in 1954 yılında ortaya koyduğu Çift Etmen Güdü Kuramı, Maslow'un Gereksinimler Hiyerarşisinden sonra en çok bilinen kuram olarak tanımlanmaktadır. Herzberg'in oluşturduğu bu

kuram, Maslow'un Gereksinimler Hiyerarşisini geliştirmek üzere yapılmıştır. Buradaki amaç diğerlerinden farklı olarak çalışan kişileri, çalışma hayatlarında mutlu ve mutsuz eden etmenleri tespit etmek olmuştur [13]. Herzberg'in yaptığı araştırmanın örneklemini 200 muhasebeci ile mühendis oluşturmaktadır. Araştırmaya dâhil olan kişilerin kendilerini mutlu hissettikleri ve doyum sağladıkları anların yaptıkları işler ile doğrudan ilgili olduğu tespit edilmiştir. Herzberg bu durumları hijyen (dışsal) etmenler olarak sınıflandırmış olup bunların öncelikle dış iş bağlamındaki aksamalar olduğunu, asıl güdüleyici (içsel) etmenlerin ise içsel zihinsel durumlarla ilgili olduğunu fark etmiştir [14]. Herzberg, bu çıkan veriler ışığında "iş doyum-verimlilik" arasında bir ilişki bularak, işi ilgilendiren etmenlerin, çalışanlarda görülen iş doyum dolayısıyla artan gizil güçleri ile verimlilikleri arasında olumlu etkilerin varlığını belirtmiştir [15]. Bir başka çalışmaya göre, çalışanların göstermiş oldukları tutum, işlerinde başarılı veya başarısız olma durumlarını doğrudan etkilemektedir [16]. Böylece Herzberg, çalışanları etkileyen etmenlere ilişkin geleneksel kavramın tek boyutlu bir sürekliliği ile çelişen ikili işten doyum kuramını sonuçlandırmıştır. Örneğin, geleneksel olarak maaşı, denetimi veya şirket politikasını artırabileceğiniz ve bunun çalışanın iş tatminini artıracığı düşünülüyordu. Herzberg'e göre, hijyen etmenlerinden herhangi birini iyileştirerek işten doyum artıramaz, bununla birlikte güdüleyici etmenleri arttırarak işten doyum arttırabilirsiniz [14]. Güdülenme eksikliği ise işlerin kalitesini ve verimliliğini etkilemekte, özellikle mimarlık büroları gibi insan kaynaklarına dayalı örgütlerde verimliliği olumsuz etkilemektedir [17].

Herzberg'in Çift Etmen Kuramı kapsamında güdüleyici etmenler olarak tanımlanan etmene bu çalışma kapsamında İçsel Güdü Etmenleri, hijyen etmenleri ise Dışsal Güdü Etmenleri olarak kullanılacaktır. Bu grupların alt başlıkları ise Tablo 1'de gösterilmekte olup dışsal güdü etmenleri, işin fizyolojik, güvenlik ve sosyal gereksinimlerini karşılamaktadır. Bunlar: ücret, işletme politikaları, fiziksel çalışma koşulları, iş güvenliği, kişiler arası ilişkiler, denetim olarak tanımlanmaktadır [11; 18].

Tablo 1. Herzberg'in Çift Etmen Kuramı [18; 19; 20]

İçsel Güdü Etmenleri	Dışsal Güdü Etmenleri
İşteki Yeterlilik	Ücret
Başarı	İşletme Politikaları
Tanınma ve Takdir	Fiziksel Çalışma Koşulları
Kariyerde İlerleme	İş Güvenliği
Sorumluluk Alma ve Özerklik	Kişiler Arası İlişkiler
Gelişme ve Terfi	Denetim

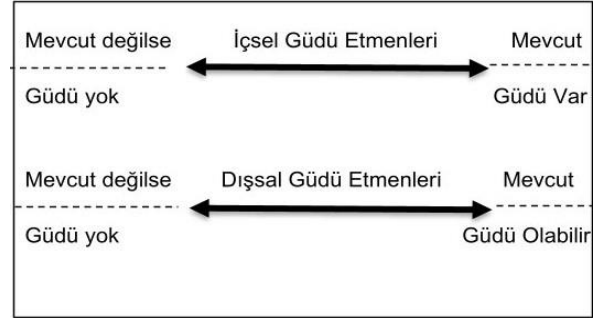
Dışsal güdü etmenleri, çalışma ortamlarında eksikliği halinde kişilerin, fiziksel ve psikolojik açıdan kötü hissederek işten ayrılmalarına, doyumсуuzluğa neden

olacak durumlara yol açan, çalışanı kötümser kılan ve işinden bezdiren durumlardır [21; 22]. Bu bağlamda, yapılan araştırmalar, iş yerlerindeki fiziksel çalışma koşullarının sosyal çevre kadar önemli olduğunu göstermektedir [23]. Salama ve Coutney [24], yaptıkları çalışmada elde ettikleri sonuçlarda da işten doyum ile en güçlü bağlantılara sahip değişkenler arasında akustik, termal konfor, görüş ve ışık, ergonomi ve mahremiyet düzeyi yer aldığı sonucunu elde etmişlerdir. Bu çalışma kapsamında, dışsal güdü etmenleri, çalışma koşulları, işletme politikaları ile denetim ve kişiler arası ilişkiler olarak üç alt etmene indirgenmiş, ücret, fiziksel çalışma koşulları, iş güvenliği çalışma koşulları başlığı altında birleştirilmiştir.

İçsel güdü etmenleri ise daha çok manevi beklentilere odaklanmakta olup işteki yeterlilik, başarı, tanınma ve takdir, kariyerde ilerleme, sorumluluk alma ve özerklik ile gelişme ve terfi olarak sıralanmaktadır [21; 22]. Çalışanların içsel ve kişisel özelliklerinden kaynaklanan, onları psikolojik açıdan mutlu hissettiren, örgütte bağlılığını arttıran durumlar olarak tanımlanmaktadır [6; 25; 26]. Örneğin çalışanlara güvenli iş statüsü verildiğinde çalışanlar işten doyum sağlamayacaktır. Bunun yerine, Herzberg'in güdülenme kuramına göre iş güvenliği içsel güdü etmenlerinden biri olduğu için daha az doyumsuz olacaktırlar [27]. Bu çalışma kapsamında, içsel güdü etmenleri, işteki yeterlilik, başarı, tanınma ve takdir; sorumluluk alma ve özerklik ile ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişme olarak üç alt etmene indirgenmiştir. Birbirleriyle ilişkili etmenler, çözümlenmelerin daha kolay yürütülebilmesi için birleştirilerek, tek ölçek olarak ele alınmıştır.

Herzberg yaptığı araştırmalar doğrultusunda, dışsal güdü etmenlerinin varlığı ile iş görenlerin doyuma ulaşmasının mümkün olduğunu savunmaktadır (Şekil 1). Bununla birlikte, bu etmenlerin eksikliği çalışanların iyi hissetmelerine, dolayısıyla işten doyum sağlamalarına engel olmaktadır [6]. Öte yandan, dışsal güdü etmenleri oluşturulmadan sadece içsel güdü etmenlerini sağlamak da çalışan kişilerin güdülenmeleri için yeterli olmamaktadır [28]. Bir başka anlatımla dışsal güdü etmenlerinin yokluğu işten doyumsuzluğa neden olmamakta, ancak işten doyum da sağlanmamaktadır [14]. Öte yandan, işten doyum, çalışanların işyerindeki duruma gösterdiği tepki olarak tanımlanabilecek olup hem örgüt hem de çalışanlar için son derece önemli bir göstergedir [29]. Dolayısıyla Çift Etmen kuramı, işten doyumun kişinin iç ve dış etmenleri tarafından ortaklaşa belirlenmesine dayanan bir kuramdır. İçsel güdü etmenleri korunduğunda memnuniyetsizliğin önüne geçilebilmektedir. Örgütlerin verimliliği artırmak amacıyla hijyen faktörlerine odaklanmasının yanlış olduğunu savunan Herzberg, memnuniyeti artırmak için güdüleyici etkenlerin iyileştirilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Hijyen gereksinimlerinin karşılanması memnuniyetsizliği ve düşük başarıyı önleyebilmekte,

ancak güdüleyici etmenlerin karşılanması ile örgütlerin aradığı verimlilik iyileştirme türünü getirmesi mümkün olacaktır [30]. Öte yandan doyumsuzluğun ortaya çıkma olasılığı en yüksek olduğunda güdülenme gerçekleşmemektedir [31].



Şekil 1. Herzberg'in Çift Etmen Kuramı [30]

Çalışanın güdülenmesi, kurumsal başarıya ulaşılmasının ana etkenlerinden olmasına rağmen, çok az örgütün işten doyumunu birinci öncelik haline getirdiği gözlemlenmektedir. Genellikle çalışanlar işlerinden memnun oldukları zaman daha yaratıcı, üretken ve işverenlerine bağlı olma eğiliminde olmaktadır. Son zamanlarda yapılan araştırmalar da çalışan memnuniyeti ile verimliliği arasında bağlantı olduğunu göstermiştir [31]. Mimar, proje bazlı örgütsel bir yapı içinde katılımcıların eşgüdümünü sağlanması, ilişkilerin düzenlenmesi, sorumluluklarının tanımlanması ve gerçekleştirilmesinde merkezi bir konumda etkin rol üstlenmektedir. Bu yapı içinde, üstlendiği rol, mesleğin kendine özgü gereksinimleri, yüklendiği sorumluluklar, mimarların üzerinde olumsuz etkiler bırakmaktadır [32]. Yapılan çalışmalar, mimarların, mesleki gereksinim ve sorumluluklarına, yoğun çalışma temposu ve uzun çalışma saatlerinin eklenmesiyle, duygusal tükenmişlik yaşadıklarını göstermektedir [33]. Mimarlık bürolarında güdülenme kaybına neden olan yedi temel etken 'örgütsel adaletsizlik', 'proje kaynaklı stres', 'işsiz tasarım ekibi', 'zayıf kişilerarası ilişkiler', 'algılanan kariyer düşüşü', 'olumsuz liderlik davranışı' ve 'zayıf organizasyon kültürü' olarak belirlenmiştir [1]. Örneğin, Yeh ve Hsieh [29] Tayvan'da mimarlık bürolarına yönelik bir çalışma yapmış, büro yönetiminin çalışanların işten doyumunu sağlayacak yaklaşımlar geliştirmesinin önemini vurgulamışlardır. Öte yandan, sanata, tasarıma ve mimariye yatırım yapan örgütlerin çalışanların eğitimi ve katılımına yönelik açık bir politika yoluyla çevreyi bilinçli bir düzeye yükseltme olasılıkları da daha yüksek olacaktır [34].

Yapım endüstrisinde çalışanların güdülenme düzeylerine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmış, güdü konusu çeşitli boyutlarıyla ele alınmıştır. Örneğin, Lam ve Tang [35], yapım projelerinde işçilerin verimliliğini arttırmak için, kullanılması gereken güdü tekniklerini araştırmıştır. Ruthankoon ve Ogunlana [36], çalışmalarında çift etmen kuramını Tayvan

yapım endüstrisi çalışanları arasında incelemişlerdir. Buldukları sonuçlar, kuramın Tayvan yapım endüstrisi çalışanlarına uymayan çeşitli yönleri olduğunu göstermektedir [36]. Parkin vd. [37] yaptıkları araştırma çerçevesinde, Türkiye'de yapım sanayisinde çalışan işçileri güdüleyen ya da güdülemeyen etmenleri belirlemişlerdir. Cao vd. [38] tasarımcıların ve yüklenicilerin yapım projelerinde Yapı Bilgi Modelleme (YBM)'yi uygulama eğilimlerini belirleyerek, ayrı güdülerin kurumsal (YBM) yeteneği ve diğer bağlamsal etmenlerden nasıl etkilendiğini araştırmışlardır. Utama vd. [39] makalelerinde, yapım firmalarının uluslararası genişlemesine ilişkin güdülenmelerine yönelik kavramsal bir çerçeve önermeyi amaçlamışlardır. Hashiguchi vd. [40] yapmış oldukları araştırmada, yapı işçileri tarafından algılanan sağlık riskleri, işe karşı güdülenme düzeyleri ile verimlilik arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Loosemore vd. [41], yürüttükleri çalışma çerçevesinde örgütlerde çalışanların karşı karşıya kaldıkları kurumsal ataletin üstesinden gelmeye iten güdülere yeni anlayışlar katmayı amaçlamışlardır. Khan vd. [42] yapmış oldukları araştırmanın amacını, küçük yapı firmalarında iş sağlığı ve güvenliğini etkileyen güdüsel etmenleri belirleyerek, çalışanların sağlık ve güvenliği üzerindeki etkileri belirlemeyi hedeflemişlerdir. Tam vd. [44] liderliğin, üç temel psikolojik doyum etmeninin (özerklik, yeterlilik ve bağlılık) ve işe karşı duyulan güdülenmenin yapı işçilerinin üretkenliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek için yeni bir model geliştirmişlerdir.

Geçmişte yapılmış çalışmaları taradığımızda, mimarlar ve mimarlık bürolarındaki güdülenme düzeylerini araştıran çalışmalar olduğu da görülmektedir. Bunlardan biri Oyedele [44] tarafından yapılmış olup, çalışmanın amacı, tasarım firmalarındaki mimar ve mühendislerin motivasyon düzeylerini etkileyen kritik etkenleri belirlemektir. Elde edilen sonuçlar, söz konusu dört etkenin olumlu proje çalışma koşulları, örgütsel destek, etkin yürütülen bir tasarım süreci ve harcanan çabanın yöneticiler tarafından fark edilmesi olduğunu göstermektedir [44]. Damcı vd. [45] tarafından yürütülen çalışma kapsamında, mimarlar ve inşaat mühendisleri tarafından önemli görülen güdüleyici unsurların altı çizilmekte ve mimarların ve inşaat mühendislerini güdüleyici etkenler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıkların varlığı araştırılmaktadır. Kendi seçtikleri projeler üzerinde çalışmak, astları olumlu etkilemek, zarar ve beladan kaçınmak, rahat fiziksel çalışma ortamı ve açıkça belirlenmiş görev ve sorumluluklar mimarlar için ön plana çıkan güdülenme etkenleri olmuştur [45]. Makuhi ve Thomas [46] tarafından yapılmış çalışmanın genel amacı Kenya'nın Nairobi City County'deki Mimarlık Şirketlerinin çalışan güdülenme düzeylerinin örgütsel başarımına etkisini belirlemektir. Elde edilen sonuçlar çalışan ücretinin örgütsel başarım üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan, çalışma

koşullarının da örgütsel başarım üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır [46].

Hem tasarım hem de yapım süreçlerinde önemli rol oynayan mimarların güdülenme düzeylerinin yükselmesi, verimliliğin artırılması için işverenlerin öncelik vermesi gereken bir konudur [47]. Çalışan kişilerin, şirketin belirlediği politika ve amaç-hedefler doğrultusunda işleri belirlenen düzeyde, kalitede yapması için gereken koşulların sağlanması, çalışma ortamlarının iyileştirilmesi ve kişileri güdüleyici yaklaşımlar geliştirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde çalışanların örgüte sundukları katkı, bağlılıkta azalma olabilecek, bu durum yetenek ve kapasitelerini kullanamamalarına, kendilerini geliştirememelerine neden olarak kişinin kendine duyduğu saygıyı olumsuz etkileyecektir. İlerleyen süreçlerde işten ayrılmalara da ortam hazırlayacaktır [48]. İşverenlerin, çalışanlar için doyumсузluk yaratan durumları ortadan kaldırdıktan sonra güdüleyici etmenleri devreye sokması gerekmektedir [49]. Çünkü doyuma ulaşma duygusu güdüleyici etmenlerin varlığıyla oluşmaktadır [50].

Bu çalışmada, Frederick Herzberg'in Çift Etmen Kuramı açısından Tasarım Bürolarında çalışan mimarların güdülenme düzeyleri araştırılmaktadır. Araştırma kapsamında, ülkemizin farklı coğrafyalarında farklı kültür, çalışma ve pazar koşulları olacağı göz önünde bulundurulduğunda çalışanların güdülenme düzeylerine etkisinin araştırılması da hedeflenmektedir. Bu çerçevede, yapım endüstrisi açısından gelişmişlik düzeyleriyle bölgelerini temsil eden İstanbul ve Gaziantep kentlerinin uygun olacağı düşünülmüştür. Mimarların beklentilerine iki farklı kent bağlamına bakıldığında getireceği farklılıkların belirlenmesi de bu çalışmanın diğer amacını oluşturmaktadır. Yapılan bu karşılaştırma ile araştırma daha önce yürütülmüş olan çalışmalardan bu yönüyle de ayrılmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Araştırma kapsamında tasarım bürolarında çalışan mimarların güdülenme düzeyleri araştırılmış, veriler anket yoluyla toplanmıştır. Söz konusu anket, 01.01.2022 tarihinde başlamış 01.03.2022 tarihine kadar da devam etmiştir. Bu tarihten sonra yapılan katılımlar araştırma kapsamına alınmamıştır. Soru kağıdı, İstanbul ve Gaziantep'teki tasarım bürolarında çalışan mimarlara yöneltilmiştir. Örneklem seçiminde, olasılıklı örnekleme yöntemlerinden basit tesadüfi örnekleme kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, anketler katılımcılara kolay ulaşabilmek amacıyla Google Anket üzerinden hazırlanmış ve katılan mimarlara e-posta yoluyla ulaştırılmıştır.

Araştırmada kullanılan soru kağıdı, katılımcıların nüfus bilimsel özellikleri, dışsal güdü etmenleri ile içsel güdü etmenleri olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır. Soru kağıdını, İstanbul'daki tasarım

bürolarında çalışan mimarlardan 61 kadın 38 erkek olmak üzere 99 katılımcı, Gaziantep'teki tasarım bürolarında çalışan mimarlardan 40 kadın, 18 erkek olmak üzere, toplam 101 kadın, 56 erkekten oluşan 157 mimar yanıtlamıştır. Ölçek, çalışanların güdülenme düzeylerini Herzberg'in Çift Etmen Kuramı çerçevesinde incelemekte olup, ölçeğin dışsal ve içsel güdü etmenleri olmak üzere 2 farklı boyutu bulunmaktadır. Araştırmanın anket kısmının, dışsal boyutunda 17, içsel boyutta ise 16 soru olmak üzere toplam 33 soru yer almakta, 5'li Likert ölçeği kullanılmaktadır.

Soru kağıdını oluşturan birinci bölümde, nüfus bilimsel özellikleri belirlemeye yönelik 12 soru bulunmaktadır. Araştırmayı oluşturan örneklemin; yaş, cinsiyet, medeni durum, öğrenim durumu, çalıştığı kent, kaç yıllık mezun, çalışmakta olduğu kaçıncı iş, kaç yıldır etkin çalıştığı, iş durumu, çalışma saatleri, çalıştığı büronun kaç yıldır pazarda da etkin olduğu ve büroların büyüklüğü ile ilgili veriler elde etmek amaçlanmıştır. İkinci ve üçüncü bölümlerde ise dışsal ve içsel güdü düzeylerini ölçmeye yönelik sorular bulunmaktadır. Dışsal ve İçsel Güdü Etmenleri için oluşturulan sorular, Yıldız [11], Kaş [26] ve Güzel [51] tarafından yürütülmüş çalışmalarda kullanılan soru kağıtlarından yararlanarak hazırlanmıştır.

Araştırma için İstanbul Kültür Üniversitesi Etik Kurulu'nun 30 Aralık 2021 tarihli ve 21/89 sayı numaralı izni alınmıştır.

2.1. Araştırmanın varsayımları

İşverenlerin çalışanlar için uygun çalışma koşulları sağlamasının kişilerin beden ve ruh sağlıkları üzerinde olumlu etki oluşturulacağı düşünülmektedir. Bu çerçevede, tasarım bürolarının, çalışma ortamlarının koşullarını göz önünde bulundurarak, iş bilimi ilkelerine göre, kişileri rahatsız etmeyecek şekilde tasarlanmasının ve çalışan kişi sayısına göre çalışma ortamlarının konforunun sağlanmasının, çalışanların güdü ve memnuniyet düzeyleri üzerinde olumlu etkilerinin olacağı düşünülmektedir. Reid [52] öncülünde yürütülen bir araştırma, kişilerin çalışma saatlerinin düzensizliğinin ruhsal gerilim düzeyini, dolayısıyla tükenmişliğini arttırdığı, bu durumdan kaynaklanan uyku düzensizliğinin bunalım, alkol bağımlılığı ve kalp hastalıklarına kadar birçok sağlık sorununa neden olarak, kişileri olumsuz etkilediğini ortaya çıkarmıştır. Ortaya çıkan ruhsal gerilim ve hastalıklar göz önünde bulundurulduğunda, çalışanların işe gitmek istemedikleri ve işten ayrılma eğilimleri gösterdiği tespit edilmiştir [52]. Öte yandan, çalışan sayısının artması ile işverenin her çalışan ile doğrudan iletişimde kopukluklar olabileceği ve bu durumun çalışanın memnuniyetini olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir. Smerek ve Peterson'a [14] göre yaşın işin kendisi ve işten doyum ile (küçük de olsa) önemli bir olumlu ilişkisi bulunmaktadır. Bu kapsamda, mesleğinde belirli bir

deneyime ulaşmış ve belirli bir yaşta olan mimarların kendilerini doyum sağlayan çalışma koşullarına sahip olduğu veya çalışma koşullarının daha iyi olduğu işleri tercih ettiği gözlemlenmektedir. Bu noktalardan yola çıkılarak aşağıdaki varsayımlar oluşturulmuştur:

Varsayım 1: Dışsal güdü etmenlerinde, en az bir ölçek çalışma saatine göre anlamlı farklılık göstermesi öngörülmektedir.

Varsayım 2: Dışsal güdü etmenlerinde en az bir ölçek çalışan sayısına göre anlamlı göstermesi öngörülmektedir.

Varsayım 3: Dışsal güdü etmenlerinde en az bir ölçek yaşa göre anlamlı farklılık göstermesi öngörülmektedir.

Mimarların mesleki anlamda belli bir deneyim ve bilgi düzeyine eriştiğinde kendilerine olan inancın, güvenin arttığı, mesleki anlamda gerekli yeterliliğe ulaşmış doyum sağladığı, verilen sorumlulukları daha kolay yerine getireceği düşünülmektedir. Peramatzis ve Galanakis [31], ilk sırada dışsal güdü etmenlerinden ücret gelse de çalışanların güdülenmelerinde gelişme, tanınma, başarı, sorumluluk ve ilerlemenin ilk sıralarda gelen içsel güdü etmenleri olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Oluwatayo [53], Nijerya'daki mimarlar arasında yaptığı çalışmada mimarların yaşları arttıkça işten doyumlarının farklılaştığını, kariyer gelişimleri desteklendikçe, yetki sahibi oldukça işe olan güdülenmelerinin arttığını bulmuştur. Deneyimli çalışanlar işlerine iyi uyum sağlamak ve işlerinden daha fazla içsel ödül almaktadırlar [14]. Bu çerçevede, mimarların meslek yaşamlarının ilk yıllarındaki güdüleyici etmenlerin deneyim yıllarının artmasıyla farklılık göstereceği, içsel güdü düzeyinin artacağı öngörülmektedir. Bu noktalardan yola çıkılarak aşağıdaki varsayım oluşturulmuştur:

Varsayım 4: İçsel güdü etmenlerinde en az bir ölçek deneyim yılına göre anlamlı farklılık göstermesi öngörülmektedir.

Herzberg'in Çift Etmen Kuramı, dışsal güdü etmenlerinin içsel etmenler kadar önemli bir etkiye sahip olmadığı ve kişilerin güdülenmelerinde içsel etmenlerin daha önemli olduğunu savunmaktadır. Bu savın günümüz koşullarında geçerli olmadığı, içinde bulunduğumuz koşullar düşünüldüğünde dışsal güdü etmenlerinin, içsel güdü etmenleri kadar önemli olduğu düşünülmektedir. Smerek ve Peterson [14] üniversite çalışanları arasında yaptığı çalışmada kuramdan farklılaşan sonuçlar bulmuştur. Bu çerçevede hem İstanbul'da hem de Gaziantep'te çalışan mimarların dışsal ve içsel güdü etmenlerinin kişilerin güdülenmelerinde aynı derecede önemli etkiye sahip olacağı öngörülmektedir. Bu noktalardan yola çıkılarak aşağıdaki varsayım oluşturulmuştur:

Varsayım 5: Katılımcıların içsel güdü etmenleri ile dışsal güdü etmenleri arasında anlamlı ilişki olduğu öngörülmektedir.

2.2 Verilerin çözümlenmesi ve değerlendirme teknikleri

Çalışmadaki verilerin istatistiksel çözümlenmeleri IBM SPSS 25.0 sürümü ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan çözümlenmelerin güven aralığı %95 düzeyinde değerlendirmeye alınmış olup, istatistiksel anlamlılık düzeyi $p < 0,05$ olarak kabul edilmiştir. Verilerin normallik dağılımı Kolmogrov Smirnov Test kullanılarak incelenmiştir. Ölçekler normal dağılım sağladıklarından dolayı parametrik testler uygulanmıştır. Katılımcının cinsiyeti, medeni durumu, öğrenim durumu, iş durumu, çalışma saati için t testi; yaş, mezuniyet yılı, iş sayısı, deneyim yılı, büronun yaşı ve çalışan sayısı için Anova Testi uygulanmış olup, Anova'da Post Hoc testlerinden Tukey testi kullanılmıştır. Anova testi sonuçları kişi sayısı (N), ortalaması (X), standart sapması (SS), testin F değeri ve P değeri olarak gösterilmiştir. T testi sonuçları kişi sayısı (N), ortalaması (X), standart sapması (SS), testin F değeri, T değeri ve P değeri olarak gösterilmiştir. Ölçeklerin arasındaki ilişkiyi belirlemek için korelasyon çözümlenmesi uygulanmış ve kişi sayısı,

ortalama, standart sapma ve korelasyon değerleri verilmiştir.

Örneklemin, uygulanan anket sorularının alt ölçeklerinin güvenilirlik çözümlenmesi sonuçları, Cronbach's Alpha değerleri $0,60 \leq \alpha < 0,80$ aralığında bulunduğundan dolayı oldukça güvenilir ve 0,80'den yüksek olduğundan dolayı yüksek derecede güvenilir olarak sınıflandırılmaktadır.

3. Bulgular

3.1 Anket katılımcılarının nüfus bilimsel özellikleri

Araştırmaya katılan mimarlar her iki kentte de ağırlıklı olarak kadın, 20 ile 30 yaş aralığında ve bekarlardır. Tablo 2'de örnekleme oluşturan mimarların cinsiyet, medeni durum ve yaş dağılımları görülmektedir.

Araştırmaya katılan mimarlar ağırlıklı olarak lisans mezunu olup, 1 ile 5 yıl arasında bir süre aralığında mezun olmuşlardır. Tablo 3'te örnekleme oluşturan mimarların öğrenim durumu ve mezuniyet yılları dağılımları görülmektedir.

Tablo 2. Katılımcıların cinsiyet, medeni durum ve yaş dağılımları tablosu

		İstanbul Kişi Sayısı	%	Gaziantep Kişi Sayısı	%
Cinsiyet	Kadın	61	61.6	40	69.0
	Erkek	38	38.4	18	31.0
Medeni Durum	Evli	88	88.9	46	79.3
	Bekar	11	11.1	12	20.7
Yaş	22-25	43	43.4	37	63.8
	26-30	46	46.5	17	29.3
	31≥ yaş	10	10.1	4	6.9
Toplam		99	100.0	58	100.0

Tablo 3. Katılımcıların öğrenim durumu ve mezuniyet yılları dağılımı

		İstanbul Kişi Sayısı	%	Gaziantep Kişi Sayısı	%
Öğrenim Durumu	Lisans	79	79.8	45	77.6
	Lisansüstü	20	20.2	13	22.4
Mezuniyet Yılı	1-2 yıl önce	44	44.4	20	34.5
	3-5 yıl önce	45	45.5	30	51.7
	6 yıl ve daha önce	10	10.1	8	13.8
Toplam		99	100.0	58	100.0

Tablo 4. Katılımcıların çalıştıkları iş sayısı, etkin çalışma süresi ve iş durumu dağılımı

		İstanbul Kişi Sayısı	%	Gaziantep Kişi Sayısı	%
Çalışmakta olduğunuz kaçınıcı işiniz?	1. iş	43	43.4	19	32.8
	2. iş	26	26.3	30	51.7
	3≥ iş	30	30.3	9	15.5
Kaç yıldır etkin çalışmaktasınız?	0-1 yıl	37	37.4	24	41.4
	2-4 yıl	42	42.4	23	39.7
	5≥ yıl	20	20.2	11	19.0
İş durumunuzu nasıl tanımlarsınız?	Stajyer / gönüllü	7	7.1	49	84.5
	Kadrolu	92	92.9	9	15.5
Toplam		99	100.0	58	100.0

Soru kağıdını yanıtlayan mimarların içinde buldukları zamana kadar İstanbul'da çalışanların ağırlıklı olarak 1. işlerinde, Gaziantep'te çalışmakta olanların ağırlıklı olarak 2. işlerinde çalışmakta oldukları görülmektedir. Her iki örnekleme de ağırlıklı olarak 0 ile 4 yıl arasında sürelerde etkin olarak çalışma yaşamının içindedirler. İstanbul'dan katılanlar büyük oranda kadrolu olarak, Gaziantep'ten katılanlar arasında stajyer/kadrolu çalışanların oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Tablo 4'te örnekleme oluşturan mimarların çalışmakta olduğu iş sayısı, etkin çalışma süresi ve iş durumu dağılımları görülmektedir.

Ankete katılan mimarlar, her iki kentte de ağırlıklı olarak düzenli çalışma saatlerine sahip olduklarını belirtmişlerdir. Tablo 5'te örnekleme oluşturan mimarların çalışma saatleri dağılımı görülmektedir.

Soru kağıdını yanıtlayan mimarın çalıştığı bürolar, her iki kentte de ağırlıklı olarak 10 yıl ve üzeri süredir etkinliklerini sürdürmektedir. İş gören sayısı dağılımı İstanbul'da ağırlıklı olarak 10 ve üzeri iken, Gaziantep'te 3-5 çalışanı olan büroların ağırlıkta olduğu görülmektedir. Tablo 6'da soru kağıdını yanıtlayan mimarların çalıştığı büroların pazarda etkin olduğu yılları ve çalışan sayılarının dağılımı görülmektedir.

Tablo 5. Katılımcıların çalışma saatleri dağılımı

		İstanbul Kişi Sayısı	%	Gaziantep Kişi Sayısı	%
Çalışma Saatlerinizi Nasıl Tanımlarsınız?	Düzenli	63	63.6	40	69.0
	Düzensiz	36	36.4	18	31.0
Toplam		99	100.0	58	100.0

Tablo 6. Büroların sektörde etkin olduğu yıllar ve çalışan sayılarının dağılımı

		İstanbul Kişi Sayısı	%	Gaziantep Kişi Sayısı	%
Çalıştığınız büro kaç yıldır sektörde etkindir?	0-4 yıl	21	21.2	14	24.1
	5-9 yıl	20	20.2	15	25.9
	10≥ yıl	58	58.6	29	50.0
İş yerinizde kaç kişi çalışmaktadır?	1-2 kişi	9	9.1	7	12.1
	3-5 kişi	24	24.2	30	51.7
	6-9 kişi	27	27.3	8	13.8
	10≥ kişi	39	39.4	13	22.4
Toplam		99	100	58	100

Tablo 7. İstanbul katılımcılarının yaş anova testi sonuçları

	Yaş	N	X	SS	F	P
Çalışma koşulları	22-25 yaş	43	3,4942	,89391	0,080	0,923
	26-30 yaş	46	3,4185	,91751		
	31≥ yaş	10	3,4500	,73409		
	Toplam	99	3,4545	,88306		
İşletme politikaları	22-25 yaş	43	3,2196	,79847	0,739	0,480
	26-30 yaş	46	3,2391	,74810		
	31≥ yaş	10	2,9222	,64799		
	Toplam	99	3,1987	,75996		
Denetim ve Kişilerarası İlişkiler	22-25 yaş	43	3,7628	,88075	0,206	0,814
	26-30 yaş	46	3,7609	,81171		
	31≥ yaş	10	3,5800	,87661		
	Toplam	99	3,7434	,84179		

Tablo 8. Gaziantep katılımcılarının yaş anova testi sonuçları

	Yaş	N	X	SS	F	P
Çalışma koşulları	22-25 yaş	37	3,6014	0,94549	3,251	0,046
	26-30 yaş	17	3,7206	0,69531		
	31≥ yaş	4	4,7500	0,35355		
	Toplam	58	3,7155	0,88908		
İşletme politikaları	22-25 yaş	37	3,2973	0,81987	1,028	0,364
	26-30 yaş	17	3,4575	0,86235		
	31≥ yaş	4	3,8889	0,59490		
	Toplam	58	3,3851	0,82237		

Denetim ve	22-25 yaş	37	3,7459	0,93648	1,226	0,301
kişilerarası	26-30 yaş	17	4,0118	0,69091		
ilişkiler	31≥ yaş	4	4,3500	0,78951		
	Toplam	58	3,8655	0,86765		

3.2 Dışsal güdü etmenleri ile ilgili bulgular

Çalışmanın ikinci adımında, nüfus bilimsel özelliklerin Dışsal Güdü Etmenlerinin oluşmasında anlamlı etkiye sahip olup olmadığına dair veri çözümlenmeleri yapılmıştır. İstanbul ve Gaziantep'teki katılımcıların yaşlarının anlamlı bir farklılaşma gösterip göstermediğini ölçmek için Anova testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Tablo 7'de görüldüğü gibi, İstanbul'daki katılımcıların yaşlarının grup ortalamaları arasında anlamlı farklılık bulunmamıştır ($p>0,05$).

Gaziantep'te, Tablo 8 'de görüldüğü gibi, katılımcıların yaşlarının grup ortalamaları arasında çalışma koşulları alt ölçeğinde anlamlı bir farklılaşma bulunmuştur ($p=0,046<0,05$). Elde edilen sonuçlara göre, Gaziantep'teki katılımcıların yaşları arttıkça güdülenme düzeylerinin de arttığı görülmektedir. Buna göre Gaziantep'te 31 yaş ve üzeri mimarların ortalamasının tüm dışsal etmenlerde diğer yaşlara nazaran daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum yapılan araştırma kapsamında, Gaziantep'te mesleğinde belirli bir deneyime sahip olup, belli yaşın üzerindeki mimarların, çalışma koşullarından doyum sağlayacak düzeye ulaştığı yorumu yapılabilir.

Katılımcıların deneyim yıllarının anlamlı bir düzeyde farklılaşma gösterip göstermediğini ölçmek için Anova testi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Tablo 9'da görüldüğü gibi, İstanbullu katılımcıların deneyim yıllarının grup ortalamaları arasında anlamlı farklılık bulunmamıştır ($p>0,05$).

Çözümlenmeler sonucunda, Tablo 10'da görüldüğü gibi Gaziantep'teki katılımcıların deneyim yıllarının grup ortalamaları arasında anlamlı bir farklılaşma bulunmamış ($p>0,05$) olup, her iki kentin ölçek ortalamaları karşılaştırıldığında, Gaziantep'te çalışan mimarların, deneyim yılına göre dışsal güdü etmenlerinin İstanbul'da çalışan mimarlara göre tüm etmenlerde ortalamaların daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle Gaziantep'te çalışan mimarlar için deneyim yılı arttıkça dışsal güdü etmenleri

açısından memnuniyet ve güdü düzeylerinin arttığı tespit edilmiştir.

Katılımcıların çalışma saati düzenlerinin anlamlı bir farklılık gösterip göstermediğini belirlemek amacıyla t testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Tablo 11'de görüldüğü gibi İstanbullu katılımcıların çalışma saatlerinin grup ortalamaları arasında çalışma koşulları, işletme politikaları alt ölçeklerinde anlamlı farklılıklar bulunmuştur ($p<0,05$). Çalışma Koşulları etmeninde ($0,001<0,05$) İstanbul'da düzenli çalışma saati olan mimarlar ile düzensiz çalışma saati olanların grup ortalaması arasında; işletme politikaları etmeninde ($0,026<0,05$) düzenli çalışma saati olan mimarlar ile düzensiz çalışma saati olanların grup ortalaması arasında anlamlı farklılıklar bulunmaktadır. Çalışma saatlerinin düzenli olması kişilerin hem işe hem de kendi özel hayatlarına zaman ayırma konusunda önemli bir durum olarak ortaya çıkmaktadır.

Yapılan çözümlenmeler, Tablo 12'de görüldüğü gibi, Gaziantep'teki katılımcıların çalışma saatlerinin grup ortalamalarında anlamlı farklılık göstermemektedir ($p>0,05$).

Günün çoğu çalışma ortamlarında geçtiği düşüldüğünde kişilerin, iş dışında kendilerini geliştirebilecekleri ortamlara daha fazla zaman ayırmasının, sosyal hayattan doyum almayı sağlayacağı düşünülmektedir. Her iki kentten elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında İstanbul'daki büroların çalışma koşulları ve işletme politikaları alt ölçeğinde çalışma saatleri grup ortalaması ile Gaziantep'e göre anlamlı farklar bulunduğu, daha düzenli çalışma saatleri olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 9. İstanbul katılımcılarının deneyim yılı anova testi sonuçları

	Yaş	N	X	SS	F	P
Çalışma koşulları	0-1 yıl	37	3,4122	,82120	0,236	0,790
	2-4 yıl	42	3,4345	,89385		
	5≥ yıl	20	3,5750	1,00033		
	Toplam	99	3,4545	,88306		
İşletme politikaları	0-1 yıl	37	3,2883	,72410	0,718	0,490
	2-4 yıl	42	3,0926	,72255		
	5≥ yıl	20	3,2556	,90274		

	Toplam	99	3,1987	,75996		
Denetim ve	0-1 yıl	37	3,8649	,80146	0,908	0,407
Kişilerarası	2-4 yıl	42	3,6143	,81497		
İlişkiler	5≥ yıl	20	3,7900	,96785		
	Toplam	99	3,7434	,84179		

Tablo 10. Gaziantep katılımcılarının deneyim yılı anova testi sonuçları

	Yaş	N	X	SS	F	P	
Çalışma koşulları	0-1 yıl	24	3,4896	1,02808	1,973	,149	
	2-4 yıl	23	3,7609	,68870			
	5≥ yıl	11	4,1136	,85413			
	Toplam	58	3,7155	,88908			
İşletme politikaları	0-1 yıl	24	3,2454	,85565	1,257	,292	
	2-4 yıl	23	3,3720	,76659			
	5≥ yıl	11	3,7172	,84234			
	Toplam	58	3,3851	,82237			
Denetim ve	0-1 yıl	24	3,5500	,95326	3,102	,053	
	Kişilerarası	2-4 yıl	23	4,0261	,75391		
	İlişkiler	5≥ yıl	11	4,2182	,71808		
	Toplam	58	3,8655	,86765			

Tablo 11. İstanbul katılımcılarının çalışma saati T testi sonuçları

	Çalışma saatleri	N	X	SS	F	T	P
Çalışma koşulları	Düzenli	63	3,6667	,77901	1,610	3,319	0,001
	Düzensiz	36	3,0833	,94112			
İşletme politikaları	Düzenli	63	3,3263	,67994	1,305	2,256	0,026
	Düzensiz	36	2,9753	,84708			
Denetim ve	Düzenli	63	3,8349	,80205	0,826	1,438	0,154
	Kişilerarası	36	3,5833	,89618			
İlişkiler							

Tablo 12. Gaziantep katılımcılarının çalışma saati T testi sonuçları

	Çalışma saatleri	N	X	SS	F	T	P
Çalışma koşulları	Düzenli	40	3,7688	0,84805	0,186	0,677	0,502
	Düzensiz	18	3,5972	0,98943			
İşletme politikaları	Düzenli	40	3,3389	0,78565	0,145	-0,634	0,529
	Düzensiz	18	3,4877	0,91398			
Denetim ve	Düzenli	40	3,8250	0,86551	0,004	-0,527	0,600
	Kişilerarası	18	3,9556	0,89062			
İlişkiler							

Mimarların çalıştıkları bürolardaki iş gören sayılarının anlamlı bir farklılaşma olup olmadığını ölçmek için Anova testi kullanılmıştır. Sonuçlar, Tablo 13'te görüldüğü gibi, İstanbul'da mimarların iş

yerlerinde çalışan sayılarının grup ortalamaları arasında anlamlı farklılık olmadığını göstermektedir ($p>0,05$).

Tablo 13. İstanbul'daki bürolarda çalışan sayısı anova testi sonuçları

	Çalışan sayısı	N	X	SS	F	P
Çalışma koşulları	1-2 kişi	9	3,1667	0,46771	1,404	0,246
	3-5 kişi	24	3,2708	1,07823		
	6-9 kişi	27	3,4167	0,97567		
	10≥ kişi	39	3,6603	0,72431		
	Toplam	99	3,4545	0,88306		
İşletme	1-2 kişi	9	2,7901	0,72530	2,558	0,060

politikaları	3-5 kişi	24	3,1343	0,93076		
	6-9 kişi	27	3,0576	0,73984		
	10≥ kişi	39	3,4302	0,60707		
	Toplam	99	3,1987	0,75996		
Denetim ve	1-2 kişi	9	3,1778	0,74461	1,562	0,204
Kişilerarası ilişkiler	3-5 kişi	24	3,8417	0,94175		
	6-9 kişi	27	3,7556	0,93205		
	10≥ kişi	39	3,8051	,70261		
	Toplam	99	3,7434	,84179		

Tablo 14. Gaziantep'teki i bürolarda çalışan sayısı anova testi sonuçları

	Çalışan sayısı	N	X	SS	F	P
Çalışma koşulları	1-2 kişi	7	4,1429	,95587	3,017	,038
	3-5 kişi	30	3,7583	,72363		
	6-9 kişi	8	2,9375	1,10801		
	10≥ kişi	13	3,8654	,88161		
	Toplam	58	3,7155	,88908		
İşletme politikaları	1-2 kişi	7	3,6667	,65420	1,017	,392
	3-5 kişi	30	3,4148	,86949		
	6-9 kişi	8	2,9583	,73688		
	10≥ kişi	13	3,4274	,82632		
	Toplam	58	3,3851	,82237		
Denetim ve Kişilerarası ilişkiler	1-2 kişi	7	4,2286	,89016	1,281	,290
	3-5 kişi	30	3,9333	,90719		
	6-9 kişi	8	3,4000	,82115		
	10≥ kişi	13	3,8000	,74833		
	Toplam	58	3,8655	,86765		

Tablo 15. İstanbul katılımcılarının yaş anova testi sonuçları

	Yaş	N	X	SS	F	P
İşteki yeterlilik, başarı, tanınma ve takdir	22-25 yaş	43	3,6227	,80202	0,518	0,597
	26-30 yaş	46	3,7222	,72379		
	31≥ yaş	10	3,4667	,79401		
	Toplam	99	3,6532	,76178		
Sorumluluk alma ve özerklik	22-25 yaş	43	3,5349	,90564	1,784	0,173
	26-30 yaş	46	3,7609	,80097		
	31≥ yaş	10	3,2500	,83333		
	Toplam	99	3,6111	,85805		
İlgi, kariyerde ilerleme ve gelişme	22-25 yaş	43	3,7829	,80634	1,922	0,152
	26-30 yaş	46	3,9638	,74113		
	31≥ yaş	10	3,4667	,65168		
	Toplam	99	3,8350	,76986		

Gaziantep'te mimarların, Tablo 14'te görüldüğü gibi, bürolardaki çalışan sayılarının grup ortalamaları arasında çalışma koşulları alt ölçeğinde anlamlı farklılık elde edilmiştir ($p=0,038<0,05$). Çalışma koşulları alt ölçeğinde bürodaki çalışan sayısına bağlı olarak anlamlı farklılık bulunmaktadır.

Gaziantep'teki bürolarda 1-2 çalışanı olan grubun çalışma koşullarının 6-9 çalışanı olan gruba göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Gaziantep'teki bürolarda çalışan sayısı arttıkça kişilerin çalışma koşulları ölçeğinden duydukları memnuniyet ve buna bağlı olarak güdü düzeyinin düştüğü tespit edilmiştir. Öte yandan, İstanbul'daki bürolarda çalışan sayısının 1-2 kişi olduğu iş yerleri tüm etmenlerde en düşük ortalamaya sahipken; Gaziantep'teki bürolarda

çalışan sayısının 1-2 kişi olduğu iş yerleri tüm etmenlerde en yüksek ortalamaya sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum İstanbul'da az kişinin çalıştığı bürolarda kişilerin üzerindeki aşırı iş yükü, az çalışanla çok iş yapılmaya çalışılmasından kaynaklanabilecek durumların kişilerde işten doyumсуuzluğa neden olduğu biçiminde yorumlanabilir.

3.3 İçsel güdü etmenleri ile ilgili bulgular

Çalışmanın üçüncü bölümünde nüfus bilimsel özelliklerin İçsel Güdü Etmenlerinin oluşmasında anlamlı etkiye sahip olup olmadığına dair verilerin çözümlemeleri yapılmıştır. Katılımcıların yaş düzeylerinde anlamlı bir ayrım olup olmadığını

ölçmek için Anova testi kullanılmıştır. Tablo 15'te görüldüğü gibi, çözümlenmeler sonucunda, İstanbul'da katılımcıların yaşlarının grup ortalamaları arasında anlamlı ayırım bulunmamıştır ($p>0,05$). Benzer şekilde, Gaziantep'teki katılımcıların, Tablo 16'da görüldüğü gibi, yaşlarının grup ortalamaları arasında anlamlı ayırım çıkmamıştır ($p>0,05$).

Katılımcıların yaşları ile içsel güdü etmenleri ortalamaları karşılaştırıldığında, İstanbul'da sorumluluk alma ve özerklik ile ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişme etmenlerinde, Gaziantep'teki mimarlara göre daha yüksek ortalamaya sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre, İstanbul'da çalışan mimarlara daha çok kararlara katılım, sorumluluk alma imkânı tanındığı yorumu yapılabilir. Bunun yanında kişilere tanınan bu olanak sayesinde kişinin kendine, mesleğine ve çalıştığı iş yerine olan güveni, bağlılığı olumlu yönde etkilenmiş olacağı düşünülmektedir. Öte yandan, kişilerin kendini geliştirmesine olanak veren çalışma ortamlarının iş doyumunu sağlaması yanında mesleği icra ettirirken kendini daha çok geliştirmesine olanak vermiş olacaktır. Gaziantep'te 31 ve üzeri yaşa sahip olan katılımcıların her etmende diğer yaşlara oranla daha yüksek ortalamaya sahip

olduğu belirlenmiştir. Bu durumda Gaziantep'teki işverenlerin kişilerin kendini geliştirmesine izin verdiği, çalışanlarını takdir ettiği bunun yanında kişilerin kendilerini geliştirmeleri için olanak sağlandığı ve çalışanların mesleği ile ilgili doyumuna ulaştığı yorumu yapılabilir.

Katılımcıların deneyim yıllarının anlamlı bir ayırım olup olmadığını ölçmek için Anova testi kullanılmıştır. Tablo 17'de görüldüğü gibi, İstanbul'da katılımcıların deneyim yıllarının grup ortalamalarında anlamlı ayırım çıkmamıştır ($p>0,05$).

Gaziantep'te katılımcıların deneyim yıllarının grup ortalamaları arasında, Tablo 18'de görüldüğü gibi, içsel güdü etmenleri arasında anlamlı farklılıklar elde edilmiştir ($p<0,05$). Gaziantep'te katılımcıların işteki yeterlilik, başarı, tanınma ve takdir etmenlerinde ($p=0,021<0,05$); sorumluluk alma ve özerklikte ($p=0,001<0,05$); ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişmede ($p=0,029<0,05$) deneyim yıllarına göre anlamlı farklılıklar elde edilmiştir. Deneyim yılı arttıkça içsel güdü etmenlerinden duyulan memnuniyetin arttığı, buna bağlı olarak da güdülenme düzeylerinin de arttığı belirlenmiştir.

Tablo 16. Gaziantep katılımcıların yaş Anova Testi sonuçları

	Yaş	N	X	SS	F	P
İşteki Yeterlilik, Başarı, Tanınma ve Takdir	22-25 yaş	37	3,6336	,82936	2,232	0,117
	26-30 yaş	17	3,9085	,71171		
	31≥ yaş	4	4,4167	,27778		
	Toplam	58	3,7682	,79234		
Sorumluluk Alma ve Özerklik	22-25 yaş	37	3,3716	1,01486	2,484	0,093
	26-30 yaş	17	3,8088	,73170		
	31≥ yaş	4	4,2500	,73598		
	Toplam	58	3,5603	,95089		
İlgi, Kariyerde İlerleme ve Gelişme	22-25 yaş	37	3,3784	1,04279	2,432	0,097
	26-30 yaş	17	3,6863	,98932		
	31≥ yaş	4	4,5000	,79349		
	Toplam	58	3,5460	1,04050		

Tablo 17. İstanbul katılımcıların deneyim yılı anova testi sonuçları

	Deneyim Yılı	N	X	SS	F	P
İşteki Yeterlilik, Başarı, Tanınma ve Takdir	0-1 yıl	37	3,6517	,79270	0,021	0,979
	2-4 yıl	42	3,6402	,67153		
	5≥ yıl	20	3,6833	,91004		
	Toplam	99	3,6532	,76178		
Sorumluluk Alma ve Özerklik	0-1 yıl	37	3,6081	,74195	0,076	0,927
	2-4 yıl	42	3,5833	,92008		
	5≥ yıl	20	3,6750	,96006		
	Toplam	99	3,6111	,85805		
İlgi, Kariyerde İlerleme ve Gelişme	0-1 yıl	37	3,7568	,84856	0,406	0,668
	2-4 yıl	42	3,9127	,68297		
	5≥ yıl	20	3,8167	,81273		
	Toplam	99	3,8350	,76986		

Tablo 18. Gaziantep katılımcılarının deneyim yılı Anova testi sonuçları

	Deneyim Yılı	N	X	SS	F	P
İşteki Yeterlilik, Başarı, Tanınma ve Takdir	0-1 yıl	24	3,4491	0,82531	4,144	,021
	2-4 yıl	23	3,9082	0,72059		
	5≥ yıl	11	4,1717	0,63316		
	Toplam	58	3,7682	0,79234		
Sorumluluk Alma ve Özerklik	0-1 yıl	24	3,0938	0,98580	7,722	,001
	2-4 yıl	23	3,7065	0,79648		
	5≥ yıl	11	4,2727	0,62704		
	Toplam	58	3,5603	0,95089		
İlgi, Kariyerde İlerleme ve Gelişme	0-1 yıl	24	3,1806	1,04940	3,765	,029
	2-4 yıl	23	3,6377	0,94769		
	5≥ yıl	11	4,1515	0,95874		
	Toplam	58	3,5460	1,04050		

Tablo 19. İstanbul katılımcılarının çalışma saatleri T testi

	Çalışma Saatleri	N	X	SS	F	T	P
İşteki Yeterlilik, Başarı, Tanınma ve Takdir	Düzenli	63	3,7443	0,74205	0,451	1,586	0,116
	Düzensiz	36	3,4938	0,78002			
Sorumluluk Alma ve Özerklik	Düzenli	63	3,6190	0,81426	2,156	0,121	0,904
	Düzensiz	36	3,5972	0,94165			
İlgi, Kariyerde İlerleme ve Gelişme	Düzenli	63	3,9524	0,72798	2,109	2,039	0,044
	Düzensiz	36	3,6296	0,80781			

Katılımcıların çalışma saati düzeylerinin anlamlı bir farklılaşma gösterip göstermediğini ölçmek için t testi kullanılmıştır. Çözümleme sonucunda, Tablo 19'da görüldüğü gibi, İstanbul'da katılımcıların çalışma saatlerinin grup ortalamaları arasında ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişme alt ölçeklerinde anlamlı ayrımlaşma bulunmuştur ($p=0,044<0,05$). İlgi, kariyerde ilerleme ve gelişme alt ölçeğinde İstanbul'da düzenli çalışma saati olan mimarların işten doyumu düzensiz çalışma saati olanlara göre daha yüksek düzeydedir.

Gaziantep'te, Tablo 20'de görüldüğü gibi, katılımcıların çalışma saatlerinin grup

ortalamalarında anlamlı ayırım bulunmamıştır ($p>0,05$). Elde edilen sonuçlara göre, düzenli çalışma saatlerine sahip mimarların hem kendi özel hayatlarına hem de iş dışında mesleki anlamda kendilerini geliştirebilecekleri etkinliklere zaman ayırabileceği ve bu durumun kişiler üzerinde iş-özel hayat dengesini de beraberinde getireceği yorumu yapılabilir.

Tablo 20. Gaziantep katılımcılarının çalışma saatleri T testi

	Çalışma Saatleri	N	X	SS	F	T	P
İşteki Yeterlilik, Başarı, Tanınma ve Takdir	Düzenli	40	3,7278	0,76317	0,349	-0,576	0,567
	Düzensiz	18	3,8580	0,86973			
Sorumluluk Alma ve Özerklik	Düzenli	40	3,5625	0,89649	1,054	0,026	0,980
	Düzensiz	18	3,5556	1,08991			
İlgi, Kariyerde İlerleme ve Gelişme	Düzenli	40	3,4750	1,03469	0,375	-0,772	0,444
	Düzensiz	18	3,7037	1,06574			

Tablo 21. İstanbul'daki bürolarda çalışan sayısı Anova testi

	Çalışan Sayısı	N	X	SS	F	P
İşteki Yeterlilik, Başarı, Tanınma ve Takdir	1-2 kişi	9	3,3333	0,85707	0,623	0,602
	3-5 kişi	24	3,6759	0,77253		
	6-9 kişi	27	3,6461	0,77841		
	10≥ kişi	39	3,7179	0,73298		
	Toplam	99	3,6532	0,76178		
Sorumluluk Alma ve Özerklik	1-2 kişi	9	3,1389	0,90235	2,484	0,065
	3-5 kişi	24	3,8750	0,89988		
	6-9 kişi	27	3,3981	0,85558		
	10≥ kişi	39	3,7051	0,77347		
	Toplam	99	3,6111	0,85805		
İlgi, Kariyerde İlerleme ve Gelişme	1-2 kişi	9	3,5556	0,76376	0,944	0,423
	3-5 kişi	24	3,8472	0,83394		
	6-9 kişi	27	3,7284	0,87724		
	10≥ kişi	39	3,9658	0,64343		
	Toplam	99	3,8350	0,76986		

Tablo 22. Gaziantep'deki bürolarda çalışan sayısı Anova testi

	Çalışan Sayısı	N	X	SS	F	P
İşteki Yeterlilik, Başarı, Tanınma ve Takdir	1-2 kişi	7	4,1905	,82580	1,035	,385
	3-5 kişi	30	3,7296	,82670		
	6-9 kişi	8	3,4861	,77423		
	10≥ kişi	13	3,8034	,69115		
	Toplam	58	3,7682	,79234		
Sorumluluk Alma ve Özerklik	1-2 kişi	7	4,1429	,83986	2,384	,079
	3-5 kişi	30	3,5083	1,00962		
	6-9 kişi	8	2,9375	,88388		
	10≥ kişi	13	3,7500	,72169		
	Toplam	58	3,5603	,95089		
İlgi, Kariyerde İlerleme ve Gelişme	1-2 kişi	7	3,9524	1,19301	,708	,551
	3-5 kişi	30	3,5333	1,08136		
	6-9 kişi	8	3,1667	,94281		
	10≥ kişi	13	3,5897	,94432		
	Toplam	58	3,5460	1,04050		

Tasarım bürolarındaki çalışan sayılarının iş gören mimarların güdülenme düzeylerinde anlamlı bir etkiye neden olup olmadığını ölçmek amacıyla Anova testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Tablo 21'de görüldüğü gibi İstanbul'daki tasarım bürolarında çalışan sayısı ile içsel güdü düzeylerinde anlamlı bir ilişki olmadığını göstermektedir ($p>0,05$). Gaziantep'te, Tablo 22'de görüldüğü gibi, tasarım bürolarındaki çalışan sayılarının grup ortalamalarının iş gören mimarların güdülenme düzeylerinde anlamlı bir etkiye neden olmadığı sonucu elde edilmiştir ($p>0,05$). İçsel güdü etmenlerinin her iki ildeki ortalamaları karşılaştırıldığında, İstanbul'daki büroların, çalışan kişi sayıları göz önünde bulundurulduğunda takdir ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişme etmenlerinin, Gaziantep'e göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

3.4 İçsel ve dışsal güdü etmenleri ile ilgili korelasyon çözümlemesi

İstanbul'da, Tablo 23'te görüldüğü gibi, çalışma koşulları ile sorumluluk alma ve özerklik arasında ($r=0,561$ $p<0,01$) olumlu yönlü orta şiddette anlamlı ilişki bulunmaktadır. Buna göre, çalışma koşullarından olan memnuniyet arttıkça sorumluluk alma ve özerklik de artmaktadır. İçsel ve dışsal güdü etmenlerinin, çalışma koşulları, işletme politikaları, denetim ve kişilerarası ilişkiler, işteki yeterlilik, başarı, tanınma ve takdir, sorumluluk alma ve özerklik, ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişme aralarında ($0,605 \leq r \leq 0,786$ $p<0,01$) olumlu yönlü yüksek şiddette anlamlı ilişkiler bulunmaktadır.

Gaziantep'te, Tablo 24'de görüldüğü üzere işletme politikaları ile sorumluluk alma ve özerklik arasında ($r=0,350$ $p<0,01$) olumlu yönlü zayıf şiddetli; işletme politikaları ile işteki yeterlilik, başarı, tanınma ve takdir, ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişme arasında ($0,527 \leq r \leq 0,542$ $p<0,01$) olumlu yönde orta şiddetli; çalışma koşulları ile sorumluluk alma ve özerklik arasında ($r=0,546$ $p<0,01$) olumlu yönlü orta şiddetli; içsel ve dışsal etmenler olan çalışma koşulları, işletme politikaları, denetim ve kişilerarası ilişkiler, işteki yeterlilik, başarı, tanınma ve takdir, sorumluluk alma ve özerklik, ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişme

aralarında ($0,601 \leq r \leq 0,796$ $p<0,01$) olumlu yönlü yüksek şiddette anlamlı ilişkiler bulunmaktadır.

Elde edilen sonuçlar dışsal güdü etmenleri ile içsel güdü etmenlerinin birbirleriyle olan ilişkisini ortaya koymaktadır. Çalışma koşulları, işletme politikaları, denetim ve kişilerarası ilişkilerden oluşan dışsal güdü etmenleri ile işteki yeterlilik, başarı, tanınma ve takdir, sorumluluk alma ve özerklik, ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişmeden oluşan içsel güdü etmenleri hem kendi aralarında hem de diğer güdü etmenleriyle ilişkili olup, iş gören mimarların birinde doyum düzeyinin yüksek olması diğerlerini de olumlu etkilemektedir.

Tablo 23. İstanbul katılımcılarının içsel ve dışsal güdü etmenlerinin korelasyon çözümlemesi

	N	X	SS	1	2	3	4	5	6
1. Çalışma Koşulları	99	3,4545	,88306	1					
2. İşletme Politikaları	99	3,1987	,75996	0,766**	1				
3. Denetim ve Kişilerarası İlişkiler	99	3,7434	,84179	0,724**	0,748**	1			
4. İşteki Yeterlilik, Başarı, Tanınma ve Takdir	99	3,6532	,76178	0,691**	0,693**	0,714**	1		
5. Sorumluluk Alma ve Özerklik	99	3,6111	,85805	0,561**	0,605**	0,638**	0,735**	1	
6. İlgi, Kariyerde İlerleme ve Gelişme	99	3,8350	,76986	0,643**	0,661**	0,676**	0,786**	0,673**	1

** Korelasyon 0,01 düzeyinde önemlidir (2-kuyruklu).

Tablo 24. Gaziantep katılımcılarının içsel ve dışsal güdü etmenlerinin korelasyon çözümlemesi

	N	X	SS	1	2	3	4	5	6
1. Çalışma Koşulları	58	3,7155	,88908	1					
2. İşletme Politikaları	58	3,3851	,82237	0,717**	1				
3. Denetim ve Kişilerarası İlişkiler	58	3,8655	,86765	0,722**	0,620**	1			
4. İşteki Yeterlilik, Başarı, Tanınma ve Takdir	58	3,7682	,79234	0,601**	0,527**	0,704**	1		
5. Sorumluluk Alma ve Özerklik	58	3,5603	,95089	0,546**	0,350**	0,644**	0,697**	1	
6. İlgi, Kariyerde İlerleme ve Gelişme	58	3,5460	1,04050	0,688**	0,542**	0,781**	0,796**	0,745**	1

** Korelasyon 0,01 düzeyinde önemlidir (2-kuyruklu).

3.5 Bulguların varsayımlar doğrultusunda tartışılması

“Varsayım 1: Dışsal güdü etmenlerinde en az bir ölçek çalışma saatine göre anlamlı farklılık göstermektedir.”

Çalışma koşulları ve işletme politikası ölçeklerinde çalışma saatlerine göre anlamlı bir ayırım olduğu görülmektedir ($p<0,05$). Araştırmadan çıkan sonuçlara göre Dışsal Güdü Etmenlerinden, çalışma koşulları ve işletme politikası ile çalışma saatlerinde anlamlı farklılık İstanbul'da çalışan mimarlarda belirlenirken, Gaziantep'te çalışan mimarlarda böyle bir ilişki tespit edilmemiştir. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda, İstanbul'daki büroların işletme politikaları, çalışma koşulları, çalışanlara tanıdıkları haklar, çalışma saatlerindeki düzen göz önünde bulundurulduğunda İstanbul'daki mimarların Gaziantep'teki mimarlara nazaran daha memnun ve güdü düzeylerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Dengesiz ve düzensiz olan çalışma saatlerinin özel hayata da olumsuz yansiyarak kişileri stresli, mutsuz, huzursuz ve ileri boyutlarda tükenmiş olmasına neden olacağı düşünülmektedir. Tasarım bürolarının çalışanların fiziksel ve psikolojik sağlıklarını göz önünde bulundurarak planlanan çalışma programları ve çalışma saatleri (genel anlamda oluşturacakları doğru şirket politikasıyla) kişilerin işte geçirdiği verimsiz zamanları alt düzeye indirip, özel ve sosyal hayatta onları mutlu eden durumlara da yüksek düzeyde zaman ayırmalarını sağlayacağı sonucuna varılmaktadır.

Varsayım 2: Dışsal güdü etmenlerinde en az bir ölçek yaşa göre anlamlı farklılık göstermektedir.

Araştırmadan çıkan sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda dışsal güdü etmenlerinden, çalışma koşulları ile yaş arasında anlamlı farklılık Gaziantep'te çalışan mimarlarda tespit edilirken İstanbul'da çalışan mimarlarda böyle bir ilişki tespit edilmemiştir. Özellikle Gaziantep katılımcılarında yaş arttıkça çalışma koşullarından duyulan memnuniyet düzeyinin arttığı da yapılan çözümler sonucu tespit edilmiştir. Bu noktada, her iki ildeki çalışma ve yaşam koşullarının böyle bir farklılığa neden olabileceği düşünülmektedir.

Varsayım 3: Dışsal güdü etmenlerinde en az bir ölçek çalışan sayısına göre anlamlı farklılık göstermektedir.

Araştırmadan elde edilen sonuçlara göre, dışsal güdü etmenlerinden çalışma koşulları ile bürolarda çalışan sayısı arasında anlamlı farklılık Gaziantep'te çalışan mimarlarda bulunurken, İstanbul'da çalışan mimarlarda böyle bir ilişki tespit edilmemiştir ($p<0,05$). Elde edilen verilere göre, Gaziantep'teki bürolarda çalışan sayısı arttıkça kişilerin güdü düzeylerinde düşüş olduğu görülmektedir. Çalışan

sayısının az olması yakın ilişkiler kurmayı ve daha çok sorumluluk almayı mümkün kılabileceği ve Gaziantep'te çalışan mimarlar için bu durumun doyum düzeyini arttırmakta olduğu sonucuna varılmıştır.

Varsayım 4: İçsel güdü etmenlerinde en az bir ölçek Gaziantep'te deneyim yılına göre anlamlı farklılık göstermektedir.

Gaziantep'te çalışan mimarların deneyim yılı ile tüm içsel güdü etmenleri (işteki yeterlilik, başarı, tanınma ve takdir, sorumluluk alma ve özerklik, ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişme) arasında anlamlı bir ayırım tespit edilmiştir ($p<0,05$). Elde edilen veriler değerlendirildiğinde, tüm dışsal güdü etmenlerinde Gaziantep'in daha iyi bir ortalamaya sahip olduğu görülmektedir. Araştırmanın başında, İstanbul'un hayat koşulları ve mesleğe bakış açıları düşünüldüğünde, İstanbul'daki mimarların dışsal güdü etmenleri açısından daha iyi bir ortalamaya sahip olduğu öngörülmekteydi, bununla birlikte yapılan çözümler bu durumun tam tersi olduğunu kanıtlamaktadır. Özellikle İstanbul ve Gaziantep'in ölçek ortalamaları karşılaştırıldığında farkın en yüksek olduğu ölçeğin, çalışma koşulları olduğu görülmektedir. Gaziantep'in çalışma koşullarının çalışanlar için daha doyum sağlayıcı bir düzeyde olduğu çıkarımı yapılmıştır.

Varsayım 5: Katılımcıların içsel güdü etmenleri ile dışsal güdü etmenleri arasında anlamlı ilişki olduğu öngörülmektedir.

Herzberg'in Çift Etmen Kuramına göre, içsel güdü etmenleri dışsal güdü etmenlerinden daha etkili olup, çalışanın güdülenmesinde birinci derecede önemlidir. Kuram, dışsal güdü etmenlerinin önemsiz ve yansız bir etki gösterdiğini öne sürmektedir. Fakat, yapılan çözümler sonucunda iki kent karşılaştırıldığında, içsel ve dışsal güdü araçlarının iş görenlerin güdülenmesi üzerindeki etkisi düşünüldüğünde (özellikle İstanbul'daki katılımcılarda) bazı etmenlerde içsel güdü araçlarının örgütün sunduğu dışsal araçlardan daha güçlü bir etkiye sahip olduğu, bazı etmenlerde ise (özellikle Gaziantep'teki katılımcılarda) dışsal güdü araçlarının içsel güdü araçlarından daha etkili olduğu görülmektedir. Elde edilen veriler, Herzberg'in kuramına farklı ekonomik ve sosyokültürel yapılar söz konusu olduğunda, içsel ve dışsal güdü etmenlerinin önem sırasının değişkenlik gösterebileceği biçiminde yorumlanabilir.

Tasarım bürolarında çalışan mimarların günümüz koşulları düşünüldüğünde ortaya çıkan geçim kaygıları, ekonomik sıkıntılar, çalışanların düzensiz çalışmalarından kaynaklanan mutsuzluğu, verdikleri emek karşısında aldıkları maddi manevi karşılığın, kişileri mutlu ve doyuma ulaştırıcı düzeyde olmadığı görülmektedir. Söz konusu koşullar göz önünde bulundurulduğunda, çalışanların gerek hayata gerekse işe olan bakışı, bağlılığı ve ilgisinin azalacağı

öngörülmekte, eldeki veriler de bunu desteklemektedir. İşverenlerin çalışanların günün koşullarına uygun olacak şekilde istek ve gereksinimlerini göz önünde bulundurmasının iş görenlerin doyuma ulaşmaları ile yapılan işin kalitesi üzerinde de olumlu etkilerinin olacağı düşünülmektedir.

Çalışma koşullarının, kişilerin güdülenmesinde önemli etkiye sahip olan ekonomik etmenler (ücret, prim) ile örgütsel koşulların (çalışma saatlerinin uygunluğu, iyi ve etkili iletişimin sağlanması, iş ve zamanın doğru planlanması) tasarım bürolarında çalışan mimarların iş doyumlarını, dolayısıyla iş görenlerin güdülenme düzeylerini artırarak, çalışma verimlerini olumlu etkileyeceği düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar, iş gören mimarlar için mesleklerinde kendilerini geliştirmeye olanak sağlayacak yeterlilikte çalışma ortamlarının oluşturulmasının önemli olduğunu göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma kapsamında, Herzberg'in Çift Etmen Kuramı, içsel ve dışsal güdü etmenlerinin tasarım bürolarında çalışan mimarların güdülenme düzeyleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma için İstanbul Kültür Üniversitesi Etik Kurulu'nun 30 Aralık 2021 tarihli ve 21/89 sayı numaralı izni alınmıştır. Elde edilen veriler yardımıyla mimarların gerek iş gerek özel yaşamlarındaki güdülenme düzeylerine ilişkin gerçekçi değerlendirmeler yapılmasının mümkün olacağı, böylece mimarların güdü ve memnuniyet düzeylerinin yükseltilmesine yönelik yapılacak olan çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Tasarım büroları tarafından yürütülen mimari tasarım süreci, projenin büyüklüğü ve kapsamına bağlı olarak ekip çalışmalarıyla yürütülmektedir. Ekip üyelerinin farklı düzeylerde katkıları olabilmekle birlikte, projenin başarısı bütün ekibin başarısına bağlı olarak gelişmektedir. Bu çerçevede, ekibin başında, genellikle, işveren mimarların olduğu tasarım süreci, iş gören mimarların katkılarıyla yürütülmekte ve başarıya ulaşabilmektedir. Farklı bölgedeki iki ilde, İstanbul ve Gaziantep'te yürütülmüş olan bu çalışma kapsamında, elde edilen bulgular çalışan mimarların yaşadıkları illere göre farklı güdülenme düzeylerine sahip olduklarını ortaya koymuştur.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara genel olarak baktığımızda, dışsal ve içsel güdü etmenlerindeki memnuniyet düzeylerinin ortalama ya da ortalamanın biraz üstünde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, Maidani [54], tarafından yapılmış çalışmayla benzerlik gösterdiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, çalışanlar için içsel veya dışsal güdü etmenlerinin önemli olduğunu göstermektedir [54].

Elde edilen sonuçlara göre dışsal güdü etmenlerinde hem İstanbul'da hem de Gaziantep'te çalışan mimarlar çalışma koşulları bakımından her yaşta ve deneyimde, çalışma saatlerinin düzenli ya da düzensiz olmasına ya da çalışan sayılarına göre farklılaşan oranlarda olsa da ortalamanın üzerinde doyuma ulaşmaktadırlar. Elde edilen sonuçlar, Oluwatayo'nun [53], çalışmasıyla benzerlik göstermekte, Nijerya Lagos'ta da çalışan mimarların genel olarak çalışma koşullarından memnun olduklarını göstermektedir. Benzer şekilde, Marisa ve Yusof [55] tarafından yürütülmüş araştırmaya göre de yapım projelerinde mimarların başarımını etkileyen etmenlerin çalışma koşulları, örgütsel destek ve etkili tasarım süreci olduğunu ortaya koymaktadır. Bowen vd. [56] de işten doyuma ulaşmada çalışma koşullarının önemine işaret etmişlerdir.

Dışsal güdü etmenlerinde, işletme politikaları bakımından çalışma koşulları ile karşılaştığımızda daha düşük oranda kalsa da hem İstanbul'da hem de Gaziantep'te çalışan mimarlar ortalamanın biraz üstünde doyuma ulaşmaktadır. Bununla birlikte, her iki ilde de bazı gruplar, İstanbul'da 31 yaşından büyük olanlar, düzensiz çalışma saati olanlar ve 1-2 çalışanı olan bürolarda işletme politikalarından memnuniyet ortalamanın biraz altına inmektedir. Gaziantep'te ise sadece 6-9 kişinin çalıştığı bürolarda işletme politikalarından memnuniyet ortalamanın biraz altına inmektedir. Elde edilen sonuçlar Peramatzis ve Galanakis [31] tarafından yapılmış çalışma ile benzerlik göstermekte olup, işletme politikalarının çalışanların işten doyumları üzerindeki etkisini desteklemektedir.

Dışsal güdü etmenlerinde, mimarlar denetim ve kişiler arası ilişkiler bakımından hem İstanbul hem de Gaziantep'te her yaşta ve deneyimde, çalışma saatlerinin düzenli ya da düzensiz olmasına ya da çalışan sayılarına göre farklılaşsa da ortalama olarak diğer gruplara göre de daha yüksek oranlarda doyuma ulaşmaktadırlar. Elde edilen sonuçlar, Damcı vd. [45] tarafından yapılmış çalışmanın sonuçlarıyla benzerlik göstermekte olup, söz konusu çalışmada mimarlar ve inşaat mühendisleri için en önemli güdülenme etkenlerinden birinin işten doyum olduğu ortaya çıkmıştır.

İçsel güdü etmenlerinde, mimarlar işteki yeterlilik, başarı, tanınma ve takdir bakımından hem İstanbul hem de Gaziantep'te her yaşta ve deneyimde, çalışma saatlerinin düzenli ya da düzensiz olmasına ya da çalışan sayılarına göre farklılaşsa da ortalamanın üzerinde doyuma ulaşmaktadırlar. Bu sonuçlar, Tabaklar ve Erbaş'ın [47] araştırmasında elde edilen sonuçlara benzer çıkmış olup, özel sektör çalışanları için motivasyon ve verimlilik arasındaki ilişkide keyif ve doyum önemli etkenler olarak belirlenmiştir.

Fugar vd. [57], Herzberg'in çift etmen güdülenme kuramına dayanarak, iş memnuniyeti endeksini

geliştirmek düşüncesinden yola çıkmışlardır. Belirledikleri sekiz kritik iş tatmini kategorisinden denetimin en kritik kategori olduğu, ardından işin özellikleri, kişilerarası ilişkiler, sorumluluk, başarı, tanınma, ilerleme/büyüme ve çalışma koşullarının izlediği ortaya çıkmıştır [57]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda da içsel güdü etmenlerinde, iş gören mimarlar sorumluluk alma ve özerklik bakımından hem İstanbul'da hem de Gaziantep'te her yaşta ve deneyimde, çalışma saatlerinin düzenli ya da düzensiz olmasına ya da çalışan sayılarına göre farklılaşan oranlarda olsa da ortalamanın üzerinde doyuma ulaşmaktadırlar. Bu sonuçlar, Akiner ve Tijhuis [58] tarafından yapılmış çalışmanın sonuçları ile benzerlik göstermektedir.

İçsel güdü etmenlerinde, mimarlar ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişme bakımından hem İstanbul hem de Gaziantep'te her yaşta ve deneyimde, çalışma saatlerinin düzenli ya da düzensiz olmasına ya da çalışan sayılarına göre farklılaşsa da ortalamanın üzerinde doyuma ulaşmaktadırlar. Fugar vd. [57] tarafından yapılmış çalışmanın sonuçları ilgi, kariyerde ilerleme ve gelişmeden elde edilen memnuniyet oranı ile de benzerlik göstermektedir.

Herzberg'in Çift Etmen Kuramı'nın kullanılıp farklı sonuçların elde edildiği çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Bresnen ve Marshal [59] yaptıkları çalışmada içsel etmenlerin (başarı ve özerklik gibi) dışsal etmenlerden daha önemli güdüleyiciler oldukları sonucuna varmışlardır. Herzberg'in Çift Etmen Kuramının araştırıldığı farklı alanlardaki çalışmalarda zaman zaman kuramı desteklemeyen sonuçlar elde edilmiştir. Sobaih ve Hasanein [60] tarafından turizm endüstrisi çalışanlarıyla yapılan çalışma bunlardan biri olup elde edilen sonuçlar, içsel etmenlerin dışsal etmenlerden daha fazla güdüleyici olduklarını göstermektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, Herzberg'in ortaya sürdüğü kuramın aksine çalışanın kendi iç dünyası ile ilgili olmayan dışsal güdü etmenlerinin de içsel güdü etmenleri kadar önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Özsoy [61] tarafından yapılmış çalışmada olduğu gibi Herzberg'in kuramına göre dışsal güdü etmenleri olarak değerlendirilen etmenlerden bazılarının önemli güdüleyiciler olduğu bulunmuştur. Herzberg'in kuramına göre maaş, çalışma koşulları, şirket politikası ve yönetimi, yöneticiyle ilişkiler gibi etmenler dışsal güdü etmenleri olarak değerlendiriliyordu. Ancak söz konusu çalışmada bunların hepsinin önemli güdüleyici etmenler olduğu ortaya çıkmıştır [61]. Kuram, çalışanların güdülenmelerinde büyük öneme sahip olan ekonomik güdüleme etmenlerini ikinci planda tutarak bu etmenlere yeterli önemi vermemiştir, bununla birlikte günümüz koşullarında çalışanlar için çok önemli bir unsur olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma da, Ihensekien ve Joel [62] tarafından yapılmış olan çalışma da olduğu gibi güdülenmenin bir paket olduğunu ve uygulamasının içsel ve dışsal

güdülenmenin bir bileşimi olması gerektiğini, bunlardan herhangi birinin çıkarılmasının bir çalışanın belirli bir gereksinimini karşılama arayışını engelleyebileceğini göstermektedir [62]. Benzer sonuçlara başka araştırmalarda da rastlanmaktadır [54; 63; 64; 65].

Çalışmanın, gelecek araştırmalara ışık tutması açısından güdü kavramına odaklanmak isteyen araştırmacılar için iyi bir yol haritası olacağı umulmakta, çizdiği yolun daha da genişletilerek devam edilmesi önerilmektedir. Ülkemizin yedi farklı bölgesinde, mimarların güdü düzeylerinin araştırılmasının farklı sonuçları da beraberinde getirebileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma XXX danışmanlığında XXX başlıklı yüksek lisans tezi esas alınarak hazırlanmıştır (Yüksek Lisans Tezi, XX Üniversitesi, X, Türkiye). Araştırma için X Üniversitesi Etik Kurulu'nun 30 Aralık 2021 tarihli ve 21/89 sayı numaralı izni alınmıştır.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Oyedele, L. O. 2013. Analysis of Architects' Demotivating Factors in Design Firms. International Journal of Project Management, 31 (3) 342-354. 10.1016/j.ijproman.2012.11.009
- [2] Göral, R. 2015. Büro Yönetimi ve Organizasyonu. 1. Baskı. Detay Yayıncılık, Ankara, 301s.
- [3] Bingöl, D. 1996. Personel Yönetimi. 2. Baskı. Beta Basım Yayım, İstanbul, 440s.
- [4] Binbaşıoğlu, C., Binbaşıoğlu, E. 1992. Endüstri Psikolojisi. Kadıoğlu Matbaası, Ankara, 149s.
- [5] Tevrüz, S. 2002. Güdülenme. ss 93-126. Aslan, A. E., ed. 2002. Örgütte Kişisel Gelişim, Nobel Yayıncılık, Ankara, 620s.
- [6] Eren, E. 2020. Örgütsel Davranış ve Yönetim Psikolojisi. Beta Basım Yayım Dağıtım, İstanbul, 642s.
- [7] Can, H., Azizoğlu, Ö. A., Aydın, E. M. 2011. Organizasyon ve Yönetim. Siyasal Yayınları, Ankara, 477s.
- [8] Ünsalan, E., Şimşeker, B. 2015. Temel İşletmecilik Bilgileri. 7. Baskı, Detay Yayıncılık, Ankara, 304s.

- [9] Yılmaz, A. 2020. İnsan Kaynakları Yönetimi ve Örnek Olaylar. Seçkin Yayıncılık, Ankara, 335s.
- [10] Ceylan, A., Anbar, A. 2014. Modern İşletmecilik. Ekin Yayınevi, Bursa. 554s.
- [11] Yıldız, B. 2010. Herzberg'in Çift Etmen Kuramı açısından ilköğretim 1.kademe öğretmenlerinin motivasyon düzeylerinin değerlendirilmesi. T.C. Beykent Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 127s, İstanbul.
- [12] Karadağ, M., Işık, O., Akbolat, M., Çelen, Ö. 2015. Örgütsel Bağlılık Açısından Gudu: Sağlık Kurumlarında Çalışan İdari Personel Üzerinde Bir Uygulama, The Journal of Academic Social Science Studies, 40, 311-320. 10.9761/JASSS.3052
- [13] Baysal, A.C., Tekarslan, E. 2004. Davranış Bilimleri. 2. Baskı. Avcıol Basım Yayım, İstanbul, 364s.
- [14] Smerek, R. E., Peterson, M. 2007. Examining Herzberg's Theory: Improving Job Satisfaction among Non-Academic Employees at a University. Research in Higher Education, 48(2), 229-250. 10.1007/s1162-006-9042-3
- [15] Hodgetts, R.M. 1999. Yönetim / Teori Süreç ve Uygulama. 2. Baskı. Beta Basım Yayım Dağıtım, İstanbul, 460s.
- [16] Aktaş, A. 2002. Turizm İşletmeciliği ve Yönetimi. Detay Yayıncılık, Ankara, 292s.
- [17] Phan, P. T., Pham, C. P., Tran, N. T. Q., Le, H. T. T., Nguyen, H. T. H., Nguyen, Q. L. H. T. T. 2020. Factors Affecting the Work Motivation of the Construction Project Manager. Journal of Asian Finance, Economics and Business, 7(12), 1035-1043. 10.13106/jafeb.2020.vol7.no12.1035
- [18] Şimşek, M. Ş., Çelik, A., Akgemci, T. 2014. Davranış Bilimlerine Giriş ve Örgütlerde Davranış. 9. Baskı. Eğitim Yayınevi, Konya, 412s.
- [19] Bilge, F., Akman, Y., Kelecioğlu, H. 2007. Öğretim Elemanlarının İş Doyumlarının Ölçülmesi. Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 32 (32), 32-41.
- [20] Topaloğlu, T., Özer, P. S. 2014. Psikolojik Sermaye ile İş Performansı Arasındaki İlişkiye Otantik Liderliğin Düzenleyici Etkisi, Organizasyon ve Yönetim Bilimleri Dergisi, 6(1), 156-171.
- [21] McClelland, D. C. 2014. Human Motivation. Cambridge University Press, Cambridge, 663s.
- [22] Hackman, J., Oldham, G. 1974. The Job Diagnostic Survey: An Instrument for the Diagnosis of Jobs and the Evaluation of Job Redesign Projects. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED099580.pdf> (Erişim Tarihi: 16/08/2023)
- [23] Frankó, L., Dúll, A. 2020. Can the Office Environment Be a Motivator? What Makes a Good Enough Working Environment on the Eve of 2020? Periodica Polytechnica Social and Management Sciences 28(2), 129-139. 10.3311/PPso.14085
- [24] Salama, A. M. Courtney, L. 2013. The Impact of the Spatial Qualities of the Workplace on Architects' Job Satisfaction. International Journal of Architectural Research, 7(1), 52-64. 10.26687/archnet-ijar.v7i1.124
- [25] Alkış, H. 2008. Frederick Herzberg'in Çift Etmen Kuramının iş görenin tatminine etkisi ve otel işletmelerinde bir uygulama. Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 189s, Ankara.
- [26] Kaş, L. 2012. Herzberg'in içsel ve dışsal güdü etmenleri ile iş görenlerin örgütsel bağlılıkları arasındaki ilişkisi Belek'teki beş yıldızlı otel işletmelerinde bir uygulama. Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, 132s, Ankara.
- [27] Hur, Y. 2018. Testing Herzberg's Two-Factor Theory of Motivation in the Public Sector: Is it Applicable to Public Managers? Public Organization Review, 18(3), 329-343. 10.1007/s11115-017-0379-1
- [28] Koçel, T. 2003. İşletme Yöneticiliği, Yönetim ve Organizasyon-Organizasyonlarda Davranış Klasik-Modern-Çağdaş Yaklaşımlar. Beta Yayıncılık, İstanbul, 759s.
- [29] Yeh, C.-H., Hsieh, T.-Y. 2017. A Study on the Management Styles and Job Satisfaction of Employees at Taiwan's Architectural Firms. The International Journal of Organizational Innovation, 10(1), 185-204.
- [30] Stello, C. M. 2011. Herzberg's Two-Factor Theory of Job Satisfaction: An Integrative Literature Review. <https://gmdconsulting.eu/nykerk/wp-content/uploads/2020/02/Review-of-Two-Factor-theory.pdf> (Erişim Tarihi: 10.07.2024)
- [31] Peramatzis, G., Galanakis, M. 2022. Herzberg's Motivation Theory in Workplace. Psychology Research, 12(12), 971-978. 10.17265/2159-5542/2022.12.009
- [32] Çivici, T. 2016. İş Doyumu, Demotivasyon Faktörleri ve Tükenmişlik Arasındaki İlişki: Mimarlar Üzerine Bir Araştırma. Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 18(2), 131-150.
- [33] Çivici, T. 2016. Mimari Tasarım Bürolarında Çalışan Mimarların Mesleki Tükenmişlik Düzeylerini Etkileyen Demotivasyon Faktörleri. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(1), 281-292. 10.21605/cukurovaummfd.317832
- [34] Bjerke, R., Ind, N., Paoli, D. D. 2007. The impact of Aesthetics on Employee Satisfaction and

- Motivation. *EuroMed Journal of Business*, 2(1): 57-73. 10.1108/14502190710749956
- [35] Lam, S.Y.W., Tang, C.H.W. 2003. Motivation of Survey Employees in Construction Projects. *Journal of Geospatial Engineering*, 5 (1), 61-66.
- [36] Ruthankoon, R. Ogunlana, S. O. 2003. Testing Herzberg's Two-Factor Theory in the Thai Construction Industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 10 (5), 333-341. 10.1108/09699980310502946
- [37] Parkin, A., Tutesigensi, A., Buyukalp, A. 2009. Motivation among Construction Workers in Turkey. 25th Annual ARCOM Conference, 7-9 Eylül, Nottingham, 105-114.
- [38] Cao, D., Li, H., Wang, G., Huang, T. 2017. Identifying and Contextualising the Motivations for BIM Implementation in Construction Projects: An Empirical Study in China. *International Journal of Project Management*, 35(4), 658-669.
- [39] Utama, W.P., Chan, A.P.C., Sesmiwati, Zahoor, H., Gao R. 2019. Internationalization of Construction Enterprises: An Overview of Motivation. *International Journal of Technology*, 10(1), 36-46.
- [40] Hashiguchi, N., Sengoku S., Kubota, Y., Kitahara, S., Lim Y., Kodama, K. 2021. Age-Dependent Influence of Intrinsic and Extrinsic Motivations on Construction Worker Performance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (1), 111. 10.3390/ijerph18010111
- [41] Loosemore, M., Keast, R., Barraket, J., Denny-Smith, G. 2021. Champions of Social Procurement in the Australian Construction Industry: Evolving Roles and Motivations. *Buildings*, 11(12), 641. 10.3390/buildings11120641
- [42] Khan, S.B., Proverbs, D.G., Xiao, H. 2022. The Motivation of Operatives in Small Construction Firms Towards Health and Safety – A Conceptual Framework. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(11), 245-261.
- [43] Tam, N.V, Watanabe T., Hai, N.L. 2022. Importance of Autonomous Motivation in Construction Labor Productivity Improvement in Vietnam: A Self-Determination Theory Perspective. *Buildings*, 12(6), 763. 10.3390/buildings12060763
- [44] Oyedele, L. O. 2010. Sustaining Architects' and Engineers' Motivation in Design Firms-An Investigation of Critical Success Factors. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 17(2), 180-196. 10.1108/09699981011024687
- [45] Damci, A., Arditi, D., Polat, G., Türkoğlu, H. 2020. Motivation of Civil Engineers and Architects in Turkey. *Organization, Technology and Management in Construction*, 12(1), 2044-2052. 10.2478/otmcj-2020-0001
- [46] Macharia, M. M., Mose, T. 2022. Effects of Employee Motivation on Organizational Performance of Architectural Companies in Nairobi City County, Kenya. *International Journal of Social Sciences Management and Entrepreneurship*, 39(3), 170-180.
- [47] Tabaklar, B. G., Erbaş, İ. 2023. The Effect of Motivational Tools on the Productivity of Staff Architects in Developing Countries: The Case of Turkey. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 1-15.
- [48] Tınaz, P. 2009. Çalışma Yaşamından Örnek Olaylar. 2. Baskı. Beta Basım, İstanbul, 321s.
- [49] Vural, Z.B.A., Değirmen, G.C. 2020. Örgüt Kültürü. 2. Baskı. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 216s.
- [50] Aşan, Ö. 2007. Motivasyon. ss 225-249. Güney, S., ed. 2007. Nobel Yayıncılık, Ankara, 580s.
- [51] Güzel, Ö. 2010. Turizm Öğrencilerinin Staj Döneminde Edindikleri Motivasyonun Herzberg Teorisine Göre Değerlendirilmesine Yönelik Bir Araştırma. *Journal of Yasar University*, 20(5), 3415-3429.
- [52] Reid, E. 2015. Embracing, Passing, Revealing, and the Ideal Worker Image: How People Navigate Expected and Experienced Professional Identities. *Organization Science*, 26(4), 997-1017.
- [53] Oluwatayo, A. A. 2015. Employee Architect's Perception of Human Resource Practices and their Job Satisfaction. *Built Environment Project and Asset Management*, 5(1), 89-102. 10.1108/BEPAM-04-2013-0008
- [54] Maidani, E. A. 1991. Comparative Study of Herzberg's Two-Factor Theory of Job Satisfaction among Public and Private Sectors. *Public Personnel Management*. 20(4)441-448. 10.1177/00910260910200040
- [55] Marisa, A., Yusof, N. A. 2020. Factors Influencing the Performance of Architects in Construction Projects. *Construction Economics and Building*, 20(3), 20-36. 10.5130/AJCEB.v20i3.7119
- [56] Bowen, P., Cattell, K., Distiller, G., Edwards, P. J. 2010. Job satisfaction of South African Quantity Surveyors: An Empirical Study. *Construction Management and Economics* 26 (7), 765-780. 10.1080/01446190801998724
- [57] Fugar, F. D. K., Boateng, E. B., Eshun, B. T. B. 2019. Development of Job Satisfaction Index for Construction Employees in Developing Countries

Based on Frederick Herzberg's Motivation Theory. West Africa Built Environment Research (WABER) Conference, 5-7 Ağustos, Accra, 423-439.

- [58] Akner, İ., Tijhuis, W. 2007. Work Goal Orientation of Construction Professionals in Turkey: Comparison of Architects and Civil Engineers. *Construction Management and Economics*, 25(11), 1165-1175. 10.1080/01446190701670365
- [59] Bresnen, M., Marshall, N. 2000. Motivation, Commitment and the Use of Incentives in Partnerships and Alliances. *Construction Management and Economics*, 18(5), 587-598. 10.1080/014461900407392
- [60] Sobaih, A. E., Hasanein, A. M. 2020. Herzberg's Theory of Motivation and Job Satisfaction: Does It Work for Hotel Industry in Developing Countries? *Journal of Human Resources in Hospitality & Tourism*, 19(3), 319-343. 10.1080/15332845.2020.1737768
- [61] Özsoy, E. 2019. An Empirical Test of Herzberg's Two-Factor Motivation Theory. *Marketing and Management of Innovations*, 10(1), 11-20. 10.21272/mmi.2019.1-01
- [62] Ihensekien, O. A., Arimie, C. J. 2023. Abraham Maslow's Hierarchy of Needs and Frederick Herzberg's Two-Factor Motivation Theories: Implications for Organizational Performance. *The Romanian Economic Journal*, 26(85), 32-49. 10.24818/REJ/2023/85/04
- [63] Thant, Z. M., Chang, Y. 2021. Determinants of Public Employee Job Satisfaction in Myanmar: Focus on Herzberg's Two Factor Theory. *Public Organization Review*, 21(1), 157-175. 10.1007/s11115-020-00481-6
- [64] Holmberg, C., Caro, J. Sobis, I. 2018. Job Satisfaction among Swedish Mental Health Nursing Personnel: Revisiting the Two-Factor Theory. *International Journal of Mental Health Nursing*, 27(2), 581-592. 10.1111/inm.12339
- [65] Bitsch, V., Hogberg, M. 2005. Exploring Horticultural Employees' Attitudes Toward their Jobs: A Qualitative Analysis Based on Herzberg's Theory of Job Satisfaction. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 37(3): 659-671. 10.1017/S1074070800027152

Delineation of the Subsurface Structures in the Central Sumatra Basin (Indonesia) through Bouguer Gravity Data

Ezgi ERBEK-KIRAN¹, Fahmi Ainun NADJIB²

^{1,2}Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 28.08.2024, Kabul / Accepted: 09.10.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Keywords

Sumatra Island,
Bouguer gravity anomaly,
Tilt,
Half-Distance,
Subduction zone

Abstract: This study presents the delineation of the boundaries of the subsurface structures and the potential hydrocarbon areas located in the eastern part of the central Sumatra basin using Bouguer gravity data. The existence of the high gravity anomalies in the eastern part displayed in this sedimentary basin takes attention. It could be said that the sedimentary basins in the region have a great importance for hydrocarbon potential. Therefore, investigation of the reason for these high anomalies is required for the region. To this end, gravity anomalies have been processed by advanced potential field methods such as the power spectrum analysis method and tilt method. The average depths of the deep and shallow causative sources have been calculated as 23.71 km and 1.61 km, respectively. Furthermore, the boundaries of the causative sources have been determined utilizing the tilt method. The tilt map has shown that the reason for these high anomalies could be the bedrock composed of high-density material rising upwards, considering the tectonic background of the region. This study has determined that the depths of the causative bodies in the region are approximately 11.2 km, 7.8 km, and 13.2 km from north to south, respectively. As a result, it could be said that such sources with deep roots could be prospective for hydrocarbon maturation.

Bouguer Gravite Verileriyle Orta Sumatra Havzasındaki (Endonezya) Yeraltı Yapılarının Belirlenmesi

Anahtar Kelimeler

Sumatra adası,
Bouguer gravite anomalisi,
Tilt,
Yarı-mesafe,
Dalma-batma zonu

Öz: Bu çalışma, Bouguer gravite verilerini kullanarak Sumatra merkez havzasının doğu kısmında yer alan yeraltı yapılarının sınırlarının ve potansiyel hidrokarbon alanlarının belirlenmesini sunmaktadır. Bu sedimanter havzanın doğu kesiminde yüksek gravite anomalilerinin varlığı dikkat çekmektedir. Bölgedeki tortul havzaların hidrokarbon potansiyeli açısından büyük öneme sahip olduğu söylenebilir. Bu nedenle bölge için bu yüksek anomalilerin nedeninin araştırılması gerekmektedir. Bu amaçla gravite anomalileri, güç spektrumu analiz yöntemi ve tilt yöntemi gibi ileri potansiyel alan yöntemleriyle işlenmiştir. Derin ve sıg nedensel kaynakların ortalama derinlikleri sırasıyla 23,71 km ve 1,61 km olarak hesaplanmıştır. Ayrıca tilt yöntemi kullanılarak anomaliye neden olan yapıların sınırları da belirlenmiştir. Tilt haritası, bölgenin tektonik arka planı dikkate alındığında bu yüksek anomalilerin nedeninin yukarıya doğru yükselen yüksek yoğunluklu malzemeden oluşan ana kaya olabileceğini göstermiştir. Yapılan çalışmada bölgedeki anomaliye neden olan cisimlerin derinliklerinin kuzeyden güneye doğru sırasıyla yaklaşık 11,2 km, 7,8 km ve 13,2 km olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak kökleri derin olan bu tür kaynakların hidrokarbon olgunlaşması açısından umut verici olabileceği söylenebilir.

* Corresponding author: ezgierbek@sdu.edu.tr

1. Introduction

Sumatra Island presents a very complex structure as it is located at the junction of many tectonic plates. The region is located at the boundary between the

Indian/Australian tectonic plate and the Eurasian tectonic plate. Moreover, the subduction zone has been developed in this region due to the subduction of the Indian Plate beneath the Sunda Plate. The speed of this movement has been determined as 50 to

70mm/year [1, 2]. The subduction zone southwest of Sumatra is determined as a part of a long convergent belt and plate-tectonics models have been created by references [3 and 4] for the region. The subduction of the Indian Plate beneath the Sunda Plate has caused the development of a volcanic arc that has intensive seismic activity. Furthermore, this movement has caused the development of many fault systems in the region. One of the prominent faults in the region is the Great Sumatran Fault which is a dextral strike-slip fault. This fault, which is 1900 km long, extends along the island of Sumatra (Fig.1).

Many basin structures have been developed with the tectonic evolution in the region. These basins located on Sumatra Island are gathered into three groups: north, central, and south Sumatra basin. The central basin, which is one of the largest tertiary sedimentation basins on the island, has a crucial importance in terms of hydrocarbon production. This basin is located in the back-arc basin region, and it extends NW-SE direction due to the tectonic background in the region [5]. The study area, which is the subject of this study, is located at the southeast end of the central basin. On the other hand, Sumatra Island has crucial importance in producing hydrocarbon and has current resources of almost 28, 15, and 6.7 billion barrels of oil equivalent in the north, central, and south Sumatra Basin, respectively [6-8]. Especially, the production in the central basin has been sourced from Oligocene-Miocene clastics [8].

The tectonic features of the southern Sumatra region have been investigated using multichannel reflection seismic profiles [9]. The hydrocarbon prospect in the west Sumatra forearc basin was explored utilizing well data and it was stated that the forearc region may have gas hydrate potential [10]. Also, the geological properties of the offshore central Sumatra basin have been interpreted utilizing the topex satellite data. [11] The results obtained from the spectral analysis showed that the average sedimentary thickness is 2.1 km in this region. Furthermore, they calculated the density values of the sedimentary rocks and granitic rocks as 2.35 and 2.67 gr/cm³, respectively. Susantoro et al. [12] explored heavy oil potential in Central Sumatra Basin by using remote sensing, gravity, and petrophysics data. They revealed the lineaments in Sumatra extended in NW-SW and N-S directions. In addition, they determined that there is a continuity between subsurface and surface lineament features. The study showed that these lineaments provide contact between reservoirs and surface water resources facilitating heavy oil generation. Reference [13] delineated the sub-basin structures in the eastern part of the central Sumatra basin based on the gravity, seismic, and well dataset. Also, they investigated the high and low anomaly pattern in Sumatra Island and it is considered that these values

could be caused by a lifting of the bedrock. Furthermore, they determined the top depth of the bedrock is approximately 750m sea level while the deep depth of the bedrock is approximately 1500m below sea level. As can be seen from the above-mentioned studies, the region has a crucial importance in terms of hydrocarbon production. Hence, it could be said that every study carried out in the region will provide a great contribution to the literature.

As can be seen from the abovementioned tectonic and geological background, this study plays an important role in understanding the subsurface structures and their boundaries in the region due to the basins including hydrocarbons. There are many studies [14-18] carried out for the north and south basins, but the studies including the central basin are limited. In this context, it could be possible to say that the current study will fill the gap in the literature. The study area, which is characterized by high Bouguer gravity anomalies, is located at the southern end of the central basin (see Fig.1). The region has a crucial importance due to tectonic features. Hence, to reveal the boundaries of the structures in this region, advanced potential field data techniques (power spectrum analysis and tilt method) have been applied to the Bouguer gravity data in the current study.

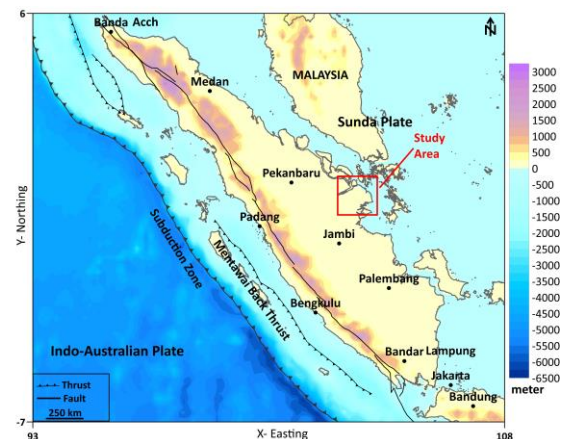


Figure 1. Bathymetric and topographic map of the Sumatra Island and its vicinity [19]

2. Material and Method

This section contains the free air and Bouguer gravity datasets used in the study and the methods applied to these datasets. The methods used in the current study are comprehensively described in the literature. However, it is briefly summarized in this paper.

2.1. Material

The free air and Bouguer gravity datasets, which are a part of the WGM project [20], are provided by the Bureau Gravimetric International (BGI) and the

support of the United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO). These data contain high-resolution terrain corrections that take into account the contribution of most surface masses (atmosphere, land, oceans, etc.). The free air anomaly map is widely used for geological interpretation of deep water. As can be seen from Fig. 2, the regions located along the subduction zone (namely Sunda trench) have displayed negative anomaly values (-20 to -150 mGal). The highest values of the free-air anomalies reached up to 300 mGal (in Fig. 2) have been seen over the volcanic arc region trending NW-SE (in the central part of the study region). The free air anomaly map of the region has some similarities to the isolines of the bathymetric map. In other words, there is a close correlation between bathymetry and free-air gravity anomalies.

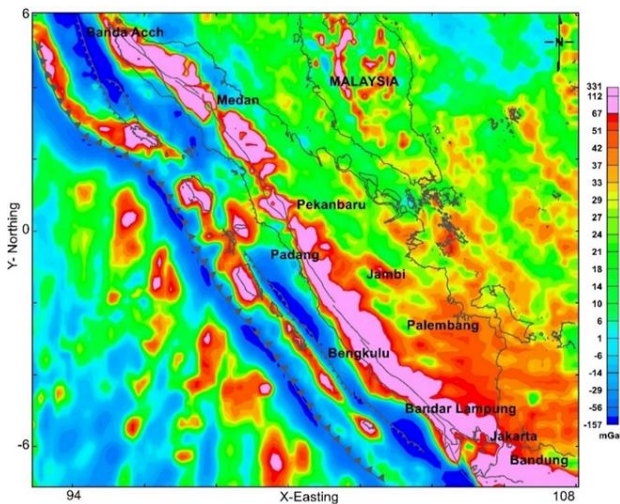


Figure 2. Free air anomaly map of the Sumatra Island and its vicinity

As well known, the Bouguer anomaly over continents displays generally negative anomalies, especially over mountain ranges while the positive Bouguer anomalies are observed over oceans. The variation of these anomalies depends on the thickness of the earth's crust [21]. In other words, the continental crusts are presented by thick, low-density crust whereas the ocean basins are presented by thin, high-density oceanic crust. To obtain Bouguer gravity anomalies, Bouguer and terrain corrections have been applied to the data. The Bouguer correction density has been taken as 2.67 g/cm³ during the application. The constituted Bouguer map is given in Fig. 3. As can be seen from Fig. 3, the gravity anomalies gradually decrease from the ocean to the subduction zone. This is associated with the variation in the thickness of the earth's crust mentioned above. Furthermore, these gravity anomalies have reached maximum gravity anomaly values (approximately 400 mgal) in the fore-arc island and the volcanic arc region in Sumatra Island. On the other hand, the basin regions located on Sumatra Island are

characterized by low gravity anomalies. Especially, the eastern part of this basin, which is selected as the study area in the current study (see Fig. 4), takes attention due to the existence of the high gravity anomalies. The low gravity anomalies in the central Sumatra basin exhibit a range of 120 to 240 mGal (see Fig. 3). The Bouguer gravity anomaly map of the study area, enlarged to better see the anomaly values, is given in Figure 4. To determine the reason for these high gravity anomalies and the boundaries of these causative bodies, advanced potential field methods such as power spectrum analysis and tilt method have been applied to these data.

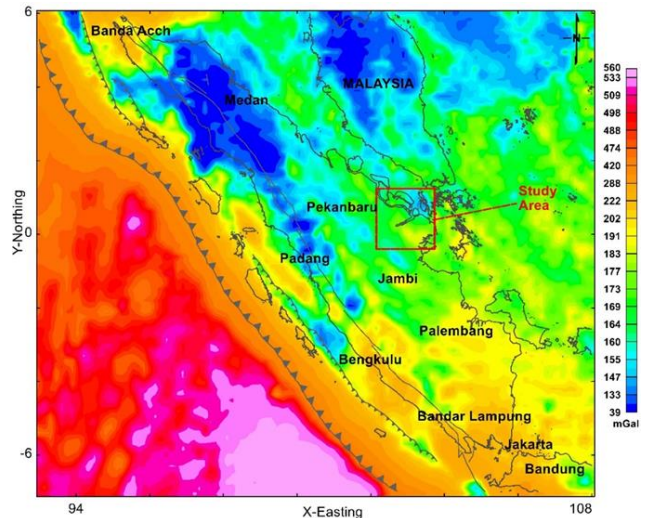


Figure 3. Bouguer gravity anomaly map of the Sumatra Island and its vicinity

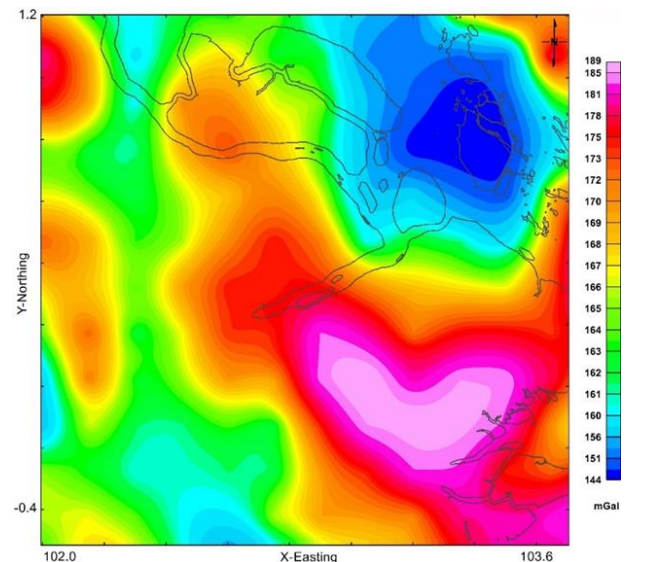


Figure 4. The Bouguer gravity anomalies of the enlarged study area. This enlarged area is shown in Fig. 3.

2.1. Methods

2.1.1 Power spectrum analysis

The Bouguer gravity anomalies are composed of two components: regional and residual anomalies.

Regional anomalies present the anomalies caused by the deep-seated bodies. These regional anomalies are characterized by long wavelength and low amplitude anomalies. The residual anomalies present the anomalies caused by the shallow bodies. These anomalies are characterized by the short longwave and high amplitude anomalies. The power spectrum developed by reference [22] is widely used to separate the anomalies from each other. This method based on the FFT transform allows the researcher to calculate the average depths of these causative bodies. The method uses the graph obtained by the logarithmically averaged power spectrum versus the wave number, and the average depths of the structures that cause anomalies are calculated. In this study, the power spectrum method has been applied to Bouguer gravity data and calculated the average depths of these bodies. Applying the power spectrum method, three segments whose depths vary between 23.71 km and 1.61 km have been determined for the region. The average depth of the regional anomalies caused by the deep sources has been calculated as 23.71 km while the average depth of the shallow sources (residual anomalies) has been calculated as 1.61 km (Fig. 5).

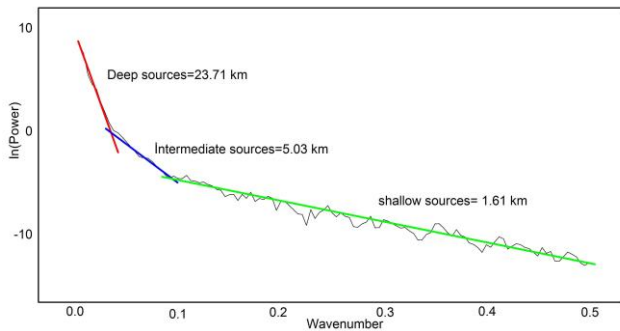


Figure 5. The radially averaged power spectrum graph

2.1.2 Tilt method

The tilt angle derivative technique is widely used for defining trends and boundaries of causative bodies and mapping shallow basement structures. This method is based on the arctangent function of the horizontal and vertical derivative of the potential field data as follows;

$$Tilt = \arctan \left[\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad (1)$$

where, $\frac{\partial f}{\partial x}$, $\frac{\partial f}{\partial y}$ and $\frac{\partial f}{\partial z}$ are the derivative of the Bouguer gravity data in the x, y and z- directions, respectively [23]. The tilt amplitudes vary between $-\pi/2$ and $+\pi/2$. The zero contours reflect the boundaries of the structures while maximum values are located over the causative bodies in this method. After developing the tilt method, the half-distance method was

proposed by [24]. According to this method, the half-distance between $\pm\pi/4$ Radians ($\pm 45^\circ$) contours allows us to estimate the source depth for vertical contacts. In this study, we have applied the tilt method to the first vertical derivative of the Bouguer gravity data in order to delineate the boundaries of the causative sources. The reason for the application to the first vertical derivative of Bouguer anomalies is explained by the Poisson relation [25]. The tilt map is given in Fig. 6. Looking closer at Fig. 6, the existence of high amplitudes takes attention in the central part of the map. The boundaries of these causative sources have been emphasized by applying the tilt method. The constituted map has shown that the causative bodies extend to the northern part of the region. The red and green lines indicate the $-\pi/4$ and $+\pi/4$ Radians contours, respectively. Similarly, the black short-dash lines show the zero contour. According to the tilt-distance method, the depth of the causative bodies located in the southeastern part of the map is calculated as 13.2 km while the depth of the structure located in the central part of the map is calculated as 7.8 km.

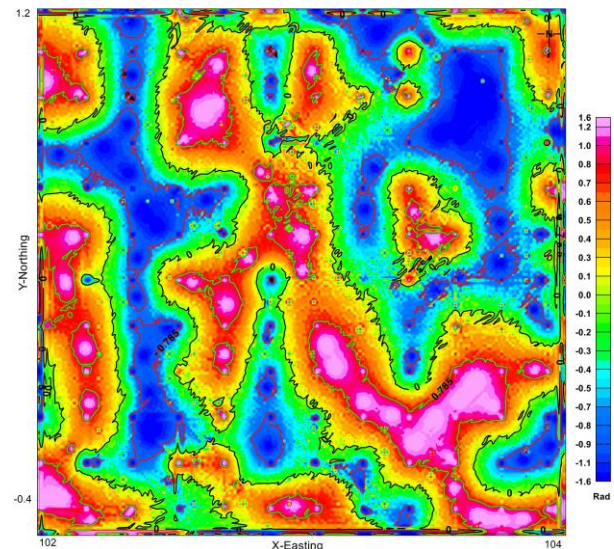


Figure 6. Tilt map of the study region. Zero contour represents the boundaries of the structure

3. Result and Discussion

This study aims to delineate the boundaries of the causative sources located in the eastern part of the central Sumatra basin. This sedimentary basin includes hydrocarbon production fields. Therefore, it can be said that revealing the structures located in this region has a crucial role for economic reasons. To this end, gravity anomalies have been analyzed and the tilt method, which is one of the boundary analysis methods, has been applied to these data to delineate the boundaries of the causative sources in the region. The study area is located between the central Sumatra basin and south Sumatra basin and this region could be evaluated as a range region. Therefore, considering the tectonic background in the region, it could be thought that the high gravity

anomalies have resulted from the bedrock composed of high-density material rising upwards. After delineating the boundaries of this structure, the tilt map has shown that the map shows that the anomaly located in the northern part of the Bouguer map has been caused by two separate structures. Furthermore, the upper depths of this high have been calculated as 11.2 km, 7.8 km, and 13.2 km, from the north to south direction, respectively utilizing the half distance method (distance between $\pm\pi/4$ radians). On the other hand, the boundaries of the basin located in the western part of this high have been clearly determined with the current study. In conclusion, the delineation of the sub-surface structure plays a key role in surveying hydrocarbon prospecting. Thus, it could be said that the current study is a basement for seismic studies that will be carried out in the future.

Acknowledgement

We thank to the Bureau Gravimetrique International (BGI) and the support of the United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO) for gravity data.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Prawirodirdjo, I. 2000. A geodetic study of Sumatra and the Indonesian region: Kinematics and crustal deformation California, from GPS and triangulation, San Diego.
- [2] Natawidjaja, D. H., Triyoso, W. 2007. The Sumatran Fault Zone —From Source to Hazard. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 1, 21–47.
- [3] Hamilton, W. 1973. Tectonics of the Indonesian Region. *Geol. Soc. Malaysia, Bull.*, 29 p.
- [4] Katili, J.A. 1975. Volcanism and plate tectonics in the Indonesian island arcs. *Tectonophysics*, 26(3), 165-188.
- [5] Nainggolan, T.B., Kusnida, D., Mimanda, E., Setiadi, I., Nugroho, E.H., Subagio, S. 2023. Delineating Sub-basins of Sedimentary Rock Structure beneath Eastern Central Sumatra Basin Using Integrated Gravity, Seismic and Well Data Analysis. *The Leading Edge*, 43(3), 138-200.
- [6] Darwis, A., Saputra, S.E. Drianto S. 2007. Exploring in mature basins in Sumatra (Sumatera) Island, Indonesia: a historical review to challenge new ideas. *AAPG Search & Discovery Article* 10139.
- [7] Meckel, L.D. 2013. Exploring a 19th-century basin in the 21st Century: seeing the North Sumatra Basin with new eyes. *AAPG Search and Discovery Article*, 10464.
- [8] Koning, T., Cameron, N., Clure, J. 2021. Undiscovered Potential in the Basement Exploring in Sumatra for oil and gas in naturally fractured and weathered basement reservoirs. *Berita sedimentologi*, 47(2), 67-79.
- [9] Schlüter, H.U., Gaedicke, C.H., Roeser, H.A., Schreckenberger, B., Meyer, H., Reichert, C. H., et al. 2002. Tectonic features of the southern Sumatra-western Java forearc of Indonesia. *Tectonics*, 21 (5), 11-1.
- [10] Putra, P., Raguwanti, R. 2020. Hydrocarbon Prospectivity and Petroleum System in West Sumatra Forearc Basin. *Berita Sedimentologi*, 46(1), 44-50.
- [11] Setiadi, I., Widodo, J., Nainggolan, T.B. 2021. Geological interpretation of offshore Central Sumatra basin using topex satellite gravity data. 4th International Conference Marine Sciences, 24-25 August 2021, Bogor, 944-012034.
- [12] Susantoro, TM., Suliantara, Setiawan, HL., Widarsono, B., Wikantika, K. 2022. Heavy Oil Potentials in Central Sumatra Basin, Indonesia Using Remote Sensing, Gravity, and Petrophysics Data: From literature Review to Interpretations and Analysis, *Indonesian Journal of Science & Technology*, 7(3), 363-384.
- [13] Nainggolan, T.B., Kusnida, D., Mimanda, E., Setiadi, I., Nugroho, E.H., Subagio, S. 2023. Delineating Sub-basins of Sedimentary Rock Structure beneath Eastern Central Sumatra Basin Using Integrated Gravity, Seismic and Well Data Analysis. *The Leading Edge*, 43(3), 138-200.
- [14] Coster, G. L. 1974. The geology of the Central and South Sumatra Basins. *Proc. of the Indonesian Petrol. Assoc.*, 3rd Annual Convention, June 3-4 Jakarta, 77- 110.
- [15] Kingstone, J. 1978. Oil and gas generation, migration and accumulation in the North Sumatra Basin. *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association 7th Annual Convention*, Jakarta, 75-104.
- [16] Davies, P.R. 1984. Tertiary structural evolution and related hydrocarbon occurrences, North Sumatra Basin. *Proceedings 13th Annual Convention. Indonesian Petroleum Association*, Indonesia, 453–495.

- [17] Ginger, D., Fielding, K. 2005. The petroleum systems and future potential of the South Sumatra Basin. Proceedings 13th Annual Convention Indonesian Petroleum Association, Indonesia, 67–89.
- [18] Syaiful, M., Hutasoit, L.M., Ramdhan, A.M., Widayat, A.H. 2020. Wireline log responses, mudweight, clay mineralogy, and implied overpressure condition: insights from Aru Field, North Sumatra Basin. Indonesian Journal on Geoscience, 7, 105-119.
- [19] NOAA, 2024. National Bathymetric Source Data was accessed on 26.08.2024 from <https://registry.opendata.aws/noaa-bathymetry>.
- [20] Bonvalot, S., Balmino, G., Briais, A., Kuhn, M., Peyrefitte, A., Vales, N., Biancale, R., Gabalda, G., Reinquin, F. 2012. World Gravity Map, 1:50.000.000. Paris, France: BGI-CGMWCNES-IRD.
- [21] Lowrie, W. 2007. Fundamentals of geophysics. Cambridge: Cambridge University Press.
- [22] Spector, A., Grant, F.S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. Geophysics, 35, 293–302.
- [23] Miller, H.G. Singh, V. 1994. Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources. Journal of Applied Geophysics, 32, 213 – 217.
- [24] Salem, A., Williams, S., Fairhead, J., Ravat, D., and Smith, R. 2007. Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. The Leading Edge, 26, 1502–1505.
- [25] Oruç, B., 2010. Edge detection and depth estimation using a tilt angle map from gravity gradient data of the Kozaklı-Central Anatolia Region, Turkey. Pure and applied geophysics, 168 (10), 1769–1780.

Theoretical Investigation of Gamma Attenuation Properties of Some Metal Oxides with GEANT4-GATE Simulation

Arzu COŞKUN *¹, Hüseyin TOPAKLI ²

¹Toros University, Vocational School of Health Services, 33100, Mersin, Türkiye

²Tarsus University, Department of Natural and Mathematical Sciences, Faculty of Engineering, 33530, Mersin, Türkiye

(Alınış / Received: 13.09.2024, Kabul / Accepted: 03.11.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Keywords

Gamma,
WinXCOM database,
Gate simulation,
Shielding

Abstract: This study investigated some oxide material's gamma radiation shielding properties. For this purpose, gamma radiation attenuation properties of composites formed by metal oxides MoO₂, La₂O₃, PbO, and their mixtures were examined at 50, 80, 120, 662, 1173, and 1332 keV gamma energies. Theoretical values were taken by using the GEANT-4 based GATE simulation and compared with the WinXCOM program. Using the theoretically calculated mass attenuation coefficient (MAC), linear attenuation coefficient (LAC), half-value layer (HVL), and mean free path (MFP) parameters were found. As a result of the study, it was seen that especially the MoLa(70)Pb mixture showed the best gamma shielding property with high La₂O₃ content.

Bazı Metal Oksitlerin Gama Absorpsiyon Özelliklerinin GEANT4-GATE Simülasyon ile Teorik İncelenmesi

Anahtar Kelimeler

Gamma,
WinXCOM veritabanı,
Gate simülasyon,
Zırhlama

Öz: Bu çalışmada bazı oksit materyallerin gama radyasyon zırhlama özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla; MoO₂, La₂O₃, PbO metal oksitleri ve bunların karışımlarının oluşturduğu kompozitlerin gama radyasyonu zayıflatma özelliklerine, 50, 80, 120, 662, 1173 ve 1332 keV gama enerjilerinde bakılmıştır. Teorik değerler GEANT-4 tabanlı GATE simülasyonundan elde edilmiş ve WinXCOM programından elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Teorik olarak elde edilen kütle zayıflatma katsayısından yararlanılarak (MAC), lineer soğurma katsayısı (LAC), yarıdeğer kalınlık (HVL), ortalama serbest yol (MFP) parametreleri bulunmuştur. Çalışma sonucunda özellikle, Mo(70)LaPb karışımında yüksek La₂O₃ içeriğiyle en iyi gama zırhlama özelliği gösterdiği görülmüştür.

1. Introduction

Concurrently with technological advancements, both ionizing and non-ionizing radiation form and nuclear sources find application in several aspects of our everyday life, ranging from agriculture to food, as well as in several medical fields for diagnostic purposes. Given its extensive usage, it is imperative to quantify the potential harm it will inflict upon living beings and implement the requisite precautionary measures. Optimization should be done by providing maximum benefit with minimum dose in the definition of target material or lesion according to the purpose of use in medicine. For this purpose, the protection methods that can be taken are known as the As

Low as Reasonably Achievable (ALARA) principle. Dose limits have been determined within the framework of the ALARA principle to reduce biological damage to acceptable levels [1,2]. However, especially in interventional applications (angiography) applied in medicine, the internationally permitted dose limits may be exceeded due to the prolongation of diagnosis or treatment time. The dose received by radiology workers, in particular, is increasing [3]. Protecting against radiation requires careful consideration of the three essential factors: distance, time, and shielding. Shielding is employed to limit ionizing radiation in circumstances where distance and time cannot be avoided. Concrete and lead are employed as the primary materials for shielding against radiation.

* Corresponding author: arzu.coskun@toros.edu.tr

Nevertheless, because of the harmful impacts of the shielding materials and the challenges of transportation, extensive research is now being conducted in the scientific community on substitute materials. Therefore, the International Atomic Energy Agency (IAEA) and World Health Organization (WHO) highly promote the development of advanced protective materials that will supplant conventional shielding materials. Especially recently, homogeneous and transparent glass materials, believed to be more widely used, are being studied. While many studies focus on glass materials for gamma-ray protection, pellets from composite materials are also used [4,5]. $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ glasses are traditional glass systems created widely [6,7]. In addition, with its ease of use and availability, new composite shielding materials such as polyurethane-containing shielding epoxy resin [8], high-density barite ore to shield X- and γ -rays, B-containing colemanite ore to stop neutron particles, and a mixture of epoxy and PbO_2 powder are available. It is intended to be produced [9]. Additionally, La_2O_3 -doped borate-based glasses strengthen the recording medium for nonlinear optical devices, laser hosts, and optoelectronic memory in optical fiber cores. There are extensive studies on this type of glass [10-13]. Dong [13] investigated the mass attenuation coefficients of sources containing element B in China in the energy range of 0.001-20 MeV with WinXCOM and GEANT-4 programs [14]. Many studies compare MCNP-X and WinXCOM data to determine the properties of radiation-shielding materials. However, there are a limited number of studies investigating the properties of protective materials using the GEANT-4 based GEANT-4 application for Tomographic Emission (GATE) simulation. GATE Simulation is a freely available software that conducts Monte Carlo simulations. It is continuously enhanced by users from around the world for applications in nuclear physics, radiology, and radiation medical fields. Other software, the National Institute of Standards (NIST) WinXCOM data, contains radiation attenuation data for commonly used protective materials [15,16]. Mass attenuation coefficients can be calculated by writing the ratios and compound formulas of compounds and mixtures in the program [17]. The search for new materials as an alternative to Pb and Pb-containing materials commonly used in gamma radiation shielding continues rapidly. In the current study, oxide compounds were added to the PbO compound at different rates for this purpose. This study investigated the gamma radiation attenuation properties of PbO , MoO_2 , and La_2O_3 . Firstly, the μ_m values determined by the GATE simulation code in the photon energy range of 50-1332 keV were compared theoretically with the WinXCOM Software program. MFP, HVL, and linear attenuation coefficients were also calculated using μ_m values.

2. Material and Method

To assess the radiation attenuation of gamma photons, one can analyze the mass attenuation coefficient, linear **Table 1.** Calculation of density values based on the materials and mixing ratios.

attenuation coefficient, half-value layer, tenth layer, and mean free path parameters of the materials to ascertain their shielding characteristics. The coefficient of linear attenuation is dependent on the density of the medium. More precisely, it illustrates the decrease in the number of photons per unit spatial separation from the radiation beam that passes through the material. A material's atomic number and physical density directly proportionally increase the extent of linear attenuation. Placement of an absorber between the radioactive source and the detector results in an exponential decrease in the released photons as they pass through the glass, following the Beer-Lambert equation. [18]:

$$I_x = I_0 (e - \Gamma_x)(e - \sigma_x)(e - \kappa_x) = I_0 e - \mu_x \quad (1)$$

In this equality, I_x = The number of photons passing through the material, I_0 = The quantity of photons reaching the material is directly proportional to the probability coefficients of the photoelectric effect, Compton scattering, pair formation, and total linearity attenuation of the material. Measurements of HVL, TVL, and MFP are calculated to evaluate the attenuation properties of gamma radiation. Half-value layer (HVL) is the minimum material thickness needed to reduce the radiation reaching the target by half. An increase in the thickness of the material produced results in a proportional decrease in the intensity of the incident photon beam. The reduction mentioned holds significant importance in the field of radiation protection. The determination of the HVL and TVL parameters is crucial in order to ascertain the shielding characteristics of materials. HVL is the material thickness that adequately decreases the initial intensity of incoming radiation by 50% by interaction with the material. The subsequent equations represent TVL values, which are defined as the material depth that decreases the intensity of incoming radiation to one-tenth magnitude.

$$X_{(1/2)} = HVL = \ln 2 / (\mu) \quad (2)$$

The mean free path is the average distance that incoming radiation travels between two interactions of a photon as it passes through a material, subject to the basic interactions it will undergo within the material.

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

The table below presents the density values based on the materials and mixture ratios employed in the investigation.

%Mole ratios

Chemical	MoO ₂	La ₂ O ₃	PbO ₂	density(g/cm ³)
MoO ₂	100	0	0	6,47
La ₂ O ₃	0	100	0	6,51
PbO ₂	0	0	100	9,38
MoLa	50	50	0	6,49
MoPb	50	0	50	7,92
LaPb	0	50	50	7,94
Mo(50)LaPb	50	25	25	7,21
MoLa(50)Pb	25	50	25	7,22
MoLa(80)Pb	10	80	10	6,89
Mo(80)LaPb	80	10	10	6,77
MoLa(70)Pb	20	70	10	6,79
Mo(70)LaPb	70	20	10	6,77

2O₃ + 15Na₂O + xMoO₃: x = 0, 1.5, 3, 4.5, 6 and 7.5 wt%

One of the theoretical methods used in our study, the WinXCOM program, is open access and provides mass attenuation coefficients, which are radiation attenuation parameters in the energy range of 1 keV to 100 GeV, in all matter interactions. When the mixture's formula information and energy values, compound, and elements are entered with this software program, the photoelectric effect, Rayleigh and Compton scattering, electron pair production, nuclear pair production cross sections, and mass attenuation coefficients can be calculated. In another theoretical study, the GATE detector properties of the NaI(Tl) detector were determined using the GEANT-4 based GATE simulation program. Radiation attenuation properties were investigated by placing shielding materials before the detector. GATE -WinXCOM comparison graphs regarding the radiation attenuation of each material are given below. Figure 1 shows the detector, source and material system prepared in GATE simulation.

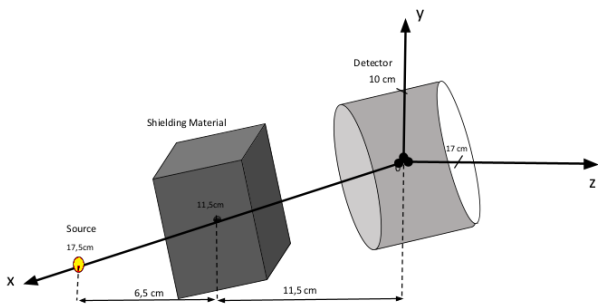


Figure 1. GEANT-4 based GATE simulation display

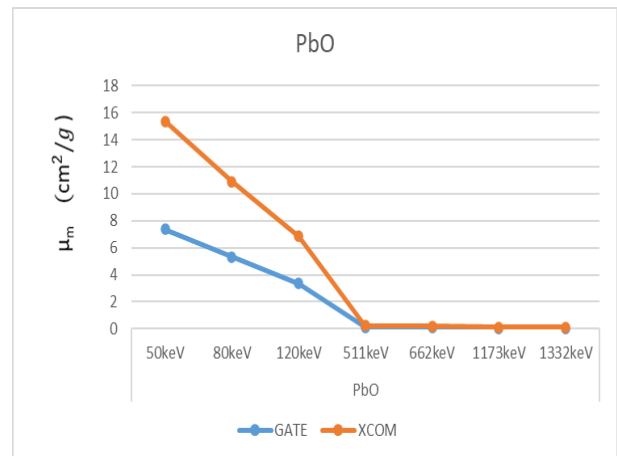
With the prepared GATE simulation setup, the NaI detector detected the mass attenuation coefficient of the shielding material placed in front of the point gamma source.

In the study by Coşkun et al., the gamma radiation shielding property of PbO compound with MoO₂ doping at 662, 1173, and 1332 keV energies was calculated with GATE simulation and XCOM (19). In the study by Tekin et al., they synthesized (65-x)B₂O₃ + 20Bi

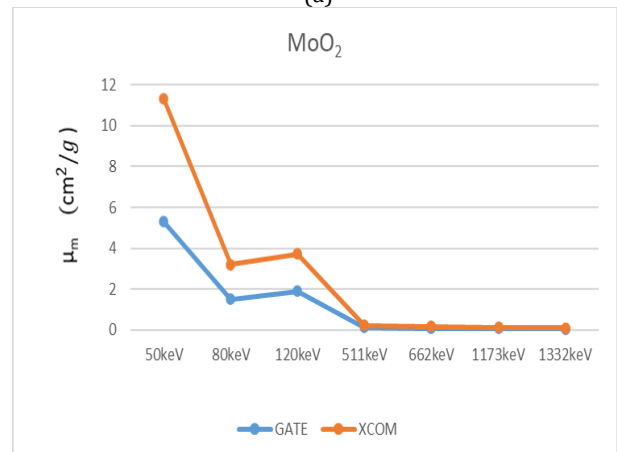
and examined it with the program MCNPX simulation code of the composite and XCOM(20). In the study conducted by Alzahrani et al., they investigated the optical and characteristic properties of La₂O₃-Fe₂O₃-Bi₂O₃ nanopowders as well as their gamma radiation attenuation properties with La₂O₃ additive using the XCOM program (21).

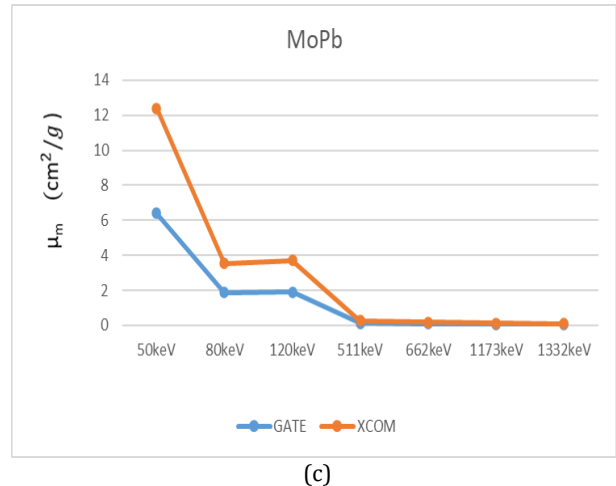
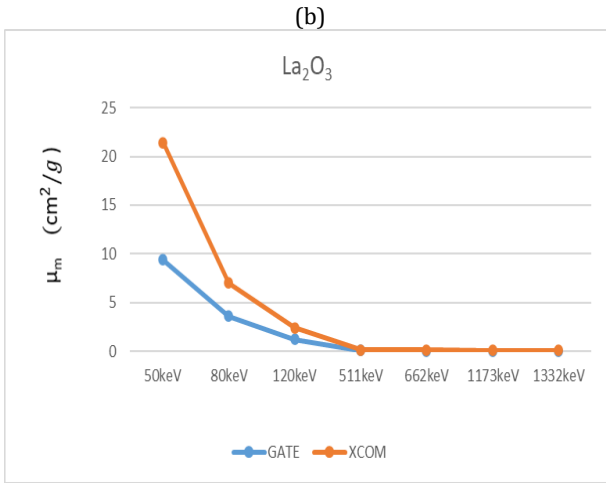
3. Results

Graphs 2-15 give the same result for different compounds.



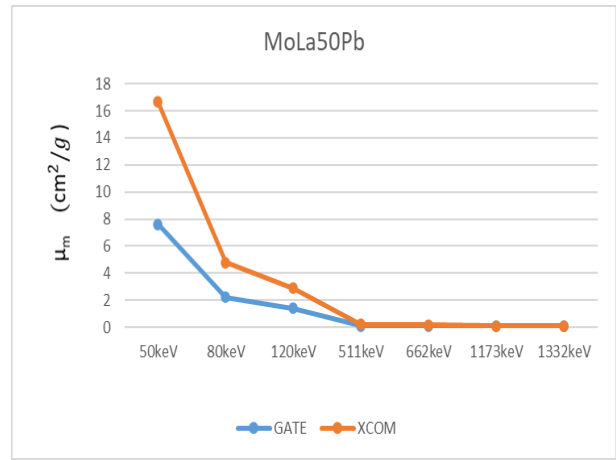
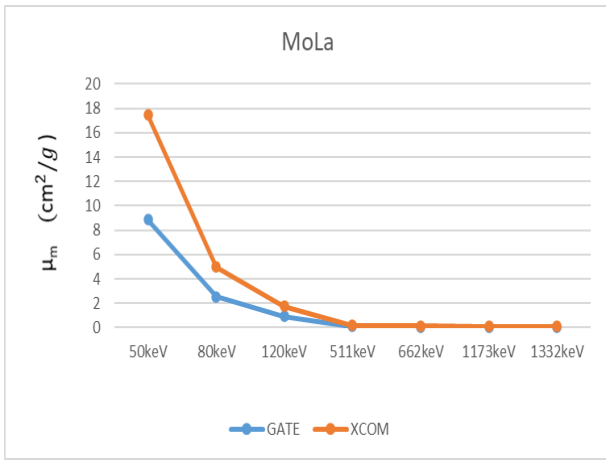
(a)



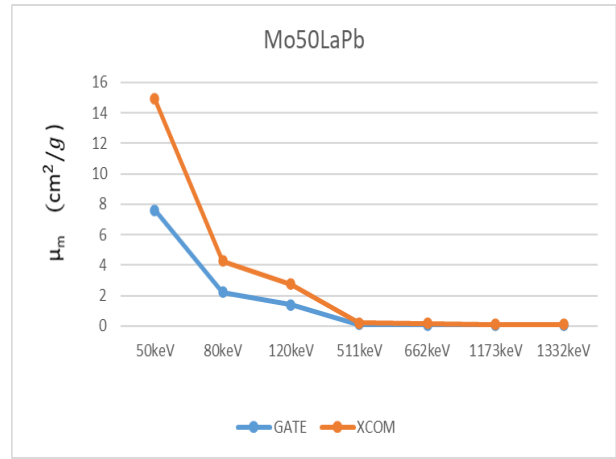
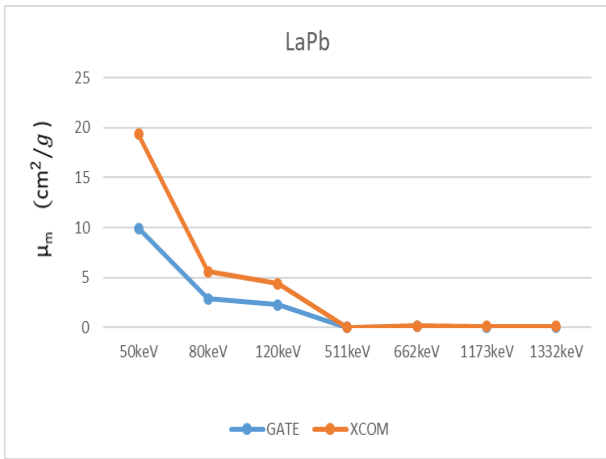


Graph 2. Mass attenuation coefficient of PbO, MoO₂, La₂O₃ (a)-(c)

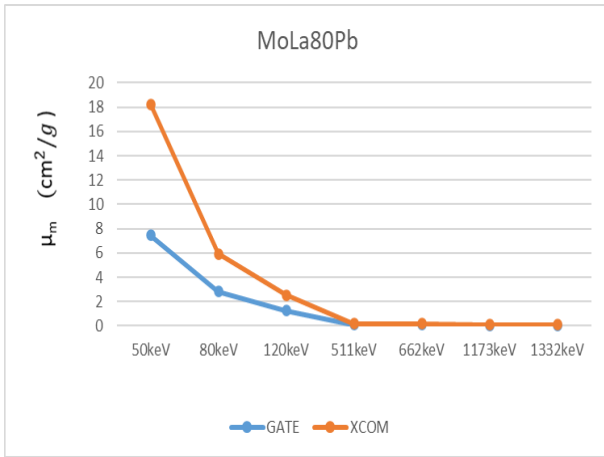
Graph 3. Mass attenuation coefficient obtained in %50 binary mixtures of compounds (a)-(c)



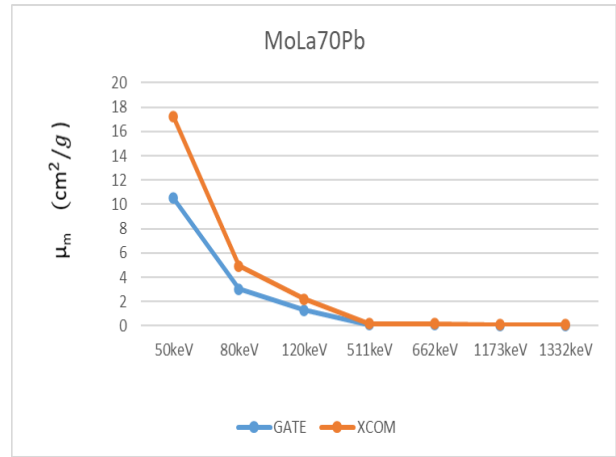
Graph 4. Mass attenuation coefficient of 20% MoO₂ and 50% La₂O₃ with constant %30 PbO



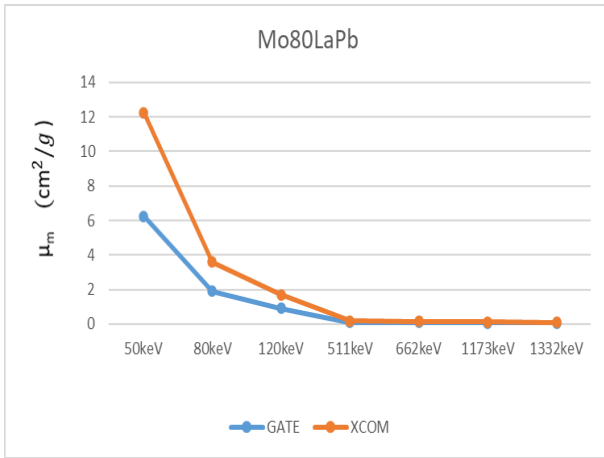
Graph 5. Mass attenuation coefficient of 50% MoO₂ and 20% La₂O₃ with constant %10 PbO



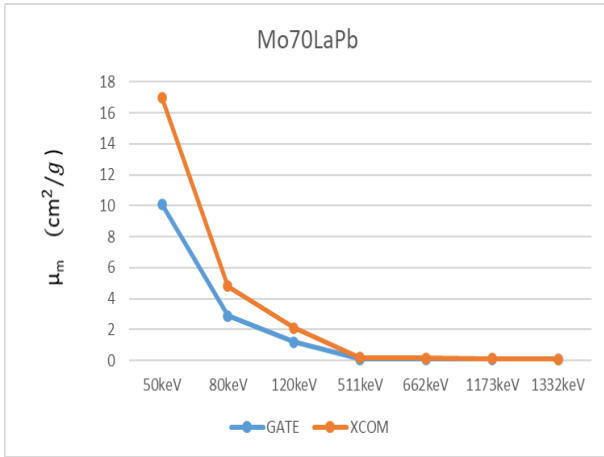
Graph 6. Mass attenuation coefficient of 10% MoO₂ and 80% La₂O₃ with constant %10 PbO



Graph 9. Mass attenuation coefficient of 20% MoO₂ and 70% La₂O₃ with constant %10 PbO

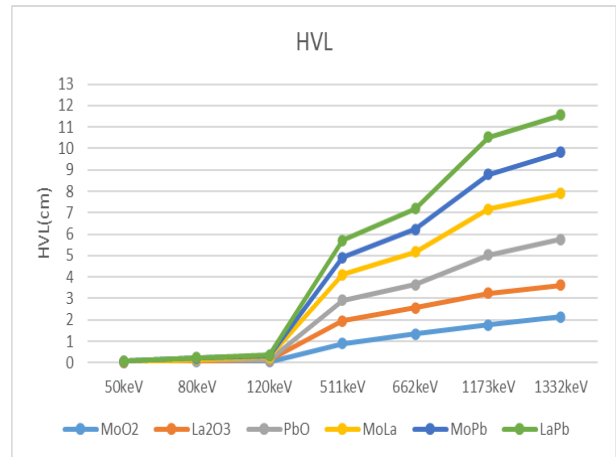


Graph 7. Mass attenuation coefficient of 80% MoO₂ and 10% La₂O₃ with constant %10 PbO

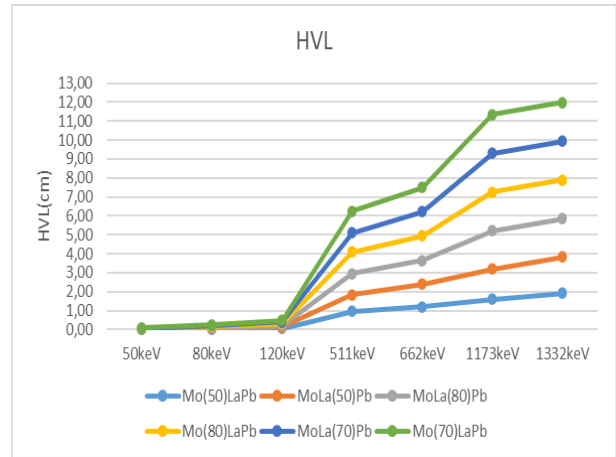


Graph 8. Mass attenuation coefficient of 70% MoO₂ and 20% La₂O₃ with constant %10 PbO

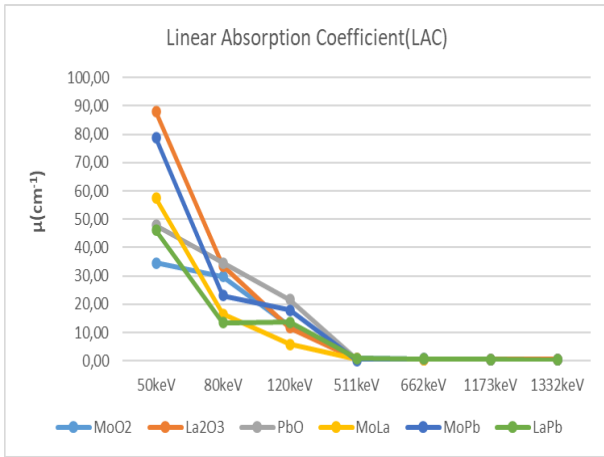
Linear attenuation coefficient, half-value layer, and mean free path data were derived from theoretical calculations of mass attenuation coefficients.



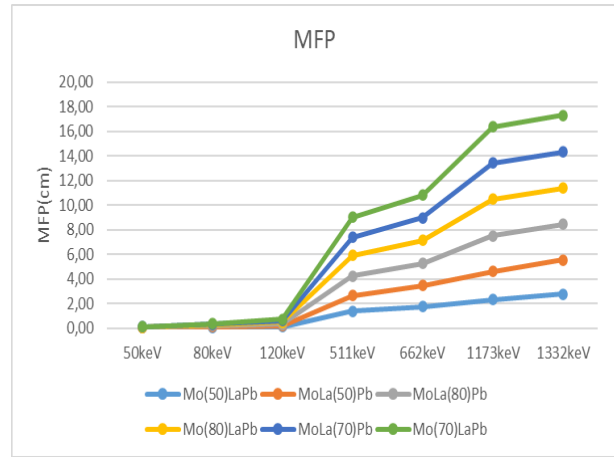
Graph 10. Half-value layer coefficient of single and binary mixtures



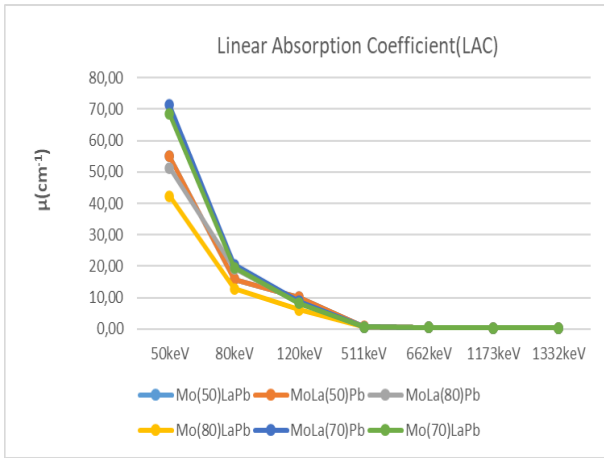
Graph 11. Half-value layer change of mixtures obtained as triple mixtures



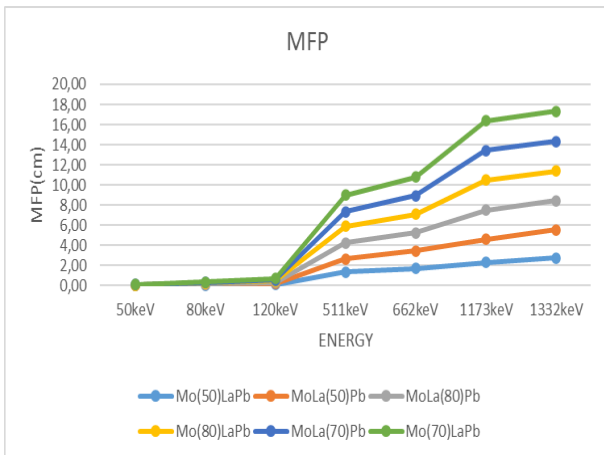
Graph 12. Linear attenuation coefficient change of single and binary mixtures



Graph 15. Mean free path change of ternary mixtures



Graph 13. Linear attenuation coefficient changes of ternary mixtures



Graph 14. Mean free path change of single and binary mixtures

4. Discussion and Conclusion

The present work aimed to examine the radiation attenuation characteristics of three particular compounds, namely PbO, MoO₂, and La₂O₃. We theoretically compared the μ_m values obtained by the GATE program within the photon energy range of 50-1332 keV with those obtained by the WinXCOM software program. In addition, the MFP, HVL, and linear attenuation coefficients were computed base on the μ_m values. It can be observed in all graphs that increasing the La₂O₃ contribution in the mixtures obtained positively affects the gamma shielding parameters. In addition, increasing the contribution as La₂O₃ increased the mass attenuation coefficient, especially in the mix named MoLa80Pb with 80% La₂O₃ contribution. When the data obtained with La₂O₃ is compared to PbO, it is seen that it has a much better attenuation value than PbO.

Both simulation and energy ranges from 356 keV to 662 keV result in a drop in the theoretical μ_m values. In the composite materials reported, the values of μ_m exhibit a significant drop as the photon energy increases. The reason for this is that the interaction between the analyzed materials and gamma radiation results in photoelectric attenuation phenomenon. Within the energy range of 1173 keV to 1332 keV, the μ_m values exhibit a modest reduction as the photon energy increases. The observed behavior can be ascribed to the compositional scattering process (CS) reaction. The shielding exhibits the highest protection capacity when the HVL, TVL, and MFP values are smaller.

Mass attenuation coefficients are given in Graph 2a-c. At a frequency of 50 keV, the PbO (Lead(II) Oxide) concentration decreases rapidly with increasing energy from GATE: 7.39 cm²/g, WinXCOM: 7.99 cm²/g to 1332 keV: GATE: 0.05 cm²/g, WinXCOM: 0.06 cm²/g. In molybdenum dioxide (MoO₂), the energy levels decrease from 50 keV: GATE: 5.3 cm²/g, WinXCOM: 6 cm²/g to 1332 keV: GATE: 0.05 cm²/g, WinXCOM: 0.05 cm²/g. The GATE/WinXCOM values for Lanthanum Oxide (La₂O₃) are 9.38 cm²/g and 12.05 cm²/g at 50 keV, respectively. The GATE/WinXCOM values at 1332 keV are 0.05 cm²/g and 0.05 cm²/g, respectively. According to the obtained results, as seen in the graphs, at low energies,

close values are observed in the two simulations, while with the increase in energy, the mass attenuation coefficient (MAC) is obtained at close values due to Compton scattering. When we look at Graphs 3a-c, the mass attenuation coefficients of the binary compounds are seen. The mass attenuation coefficients of MoLa, LaPb, MoPb mixtures at 50 keV are obtained as 8.86, 9.91, 6.39 cm²/g, respectively. After 511 keV, these values decrease to 0.05 cm²/g. When we look at the 4th-9th graphs where the mass attenuation values of the ternary mixtures are given, it is seen that the highest mass attenuation coefficients of the MoLa50Pb, Mo50LaPb, MoLa80Pb, Mo80LaPb, MoLa70Pb, Mo70LaPb compounds are at 50 keV and are calculated as 7.62, 7.62, 7.44, 6.25, 10.5, 10.1 cm²/g, respectively. When the graphs are examined; the highest mass attenuation coefficient on average in both simulations belongs to the MoLa(70)Pb mixture and is calculated as 9.6 cm²/g. The linear attenuation coefficient (LAC) values are calculated by substituting the mass attenuation coefficient and density values in equation (2.1). GEANT-4 GATE simulation values were used in the calculation. Graph 12 shows the LAC results of the single and binary mixture structures. Accordingly, at 50 keV, MoO₂ gives 34.50 cm⁻¹, La₂O₃ 87.98 cm⁻¹ and PbO 47.81 cm⁻¹. With the increase in energy, these values become 0.33 cm⁻¹, 0.47 cm⁻¹ and 0.32 cm⁻¹, respectively. In binary mixtures, especially the LaPb compound gives the highest value with 0.87 cm⁻¹ at 511 keV. MoPb shows high attenuation properties at low energies. When the data obtained by mixing the compounds in Graph 13 in different ratios are examined, the highest linear attenuation coefficient value belongs to the MoLa(70)Pb mixture, and is 0.34 cm⁻¹ at 1332 keV and 71.30 cm⁻¹ at 50 keV. As in mass attenuation coefficients, linear attenuation coefficient decreases with increasing energy depending on interaction mechanisms with matter. A high linear attenuation coefficient indicates that radiation shielding property is high. HVL values were obtained using equation (2.2). The highest value was observed in PbO compound with 2.41 cm. HVL value increases with increasing energy. HVL value of the compound at 80 keV was calculated as 0.01 cm. Graphs 10-11 show HVL values. According to the obtained data, the highest HVL value belongs to MoLa compound, which is a binary mixture. A high HVL value indicates that radiation attenuation property decreases. Mean free path (MFP) value was calculated by replacing LAC value according to equation (2.3). The obtained results are given in graphs 14 and 15. According to the results, MFP value increases with increasing energy as in half-value thickness. It is seen in graphs 10, 11, 14 and 15 that MFP and HVL values are low where the mass attenuation coefficient is high. Accordingly, As a result, due to the high attenuation ability of composite materials against gamma radiation, shielding materials. It is also concluded that PbO is an effective shielding material at high energy levels. In addition, MoLa70Pb mixture offers the best gamma shielding properties with high La₂O₃ content. These results can be optimized for radiation protection and medical imaging and provide important information for the development of composite materials.

References

- [1] Eskalen, H., Kavun , Y., Kerli S., Eken, S. 2020. An investigation of radiation shielding properties of boron-doped ZnO thin films. *Optik Mater (Amst)* 105 109871.
- [2] Issa S., AMA, M., Hanafy , TA., Dong, M., Xue, X. 2019. Comparison study of photon attenuation characteristics of Polyvinyl alcohol (PVA) doped with Pb (NO₃)₂ by MCNP5 code, XCOM, and experimental results. *Progress in Nuclear Energy* 111.15–23.
- [3] Zuguchi, M., Chida, K., Taura, M., Inaba, Y. 2008. Usefulness of non-lead aprons in radiation protection for physicians performing interventional procedures, *Radiation Protection Dosimetry* 131.531-534.
- [4] Issa, S., Hamdalla, TA., Darwish , AAA. 2017. Effect of ErCl₃ in gamma and neutron parameters for different concentrations of ErCl₃-SiO₂ (EDFA) for signal protection from nuclear radiation. *Journal Alloys Compound* 698 234–40.
- [5] Abouhaswa , A. S., Perişanoğlu, U., Tekin , H. O., Kavaz, E., Henaish, A. M. A. 2020. Nuclear shielding properties of B₂O₃-Pb₃O₄-ZnO glasses: Multiple impacts of Er₂O₃ additive. *Ceramic International* 46 27849–59.
- [6] Feller, S.A., Dell , W. J., Bray P. J. 1982. 10B NMR studies of lithium borate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids* 51 21–30.
- [7] Kodama, M., Matsushita, T., Kojima, S. 1995. Velocity of sound and elastic properties of Li₂Ob₂O₃ glasses. *Japanese Journal of Applied Physics* 34.2570–4.
- [8] Mkhiaiber, A. F., Dheyaa, A. 2018. Experimental study of some shielding parameters for composite shields. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1003, No. 1, p. 012109). IOP Publishing.
- [9] Demir, F. 2009. Determination of radiation absorbance of heavy concretes with boron and barite aggregates for neutron particles, x, and γ rays. Atatürk University, Institute of Science, PhD Thesis, Erzurum.
- [10] Chakraborty, I. N., Shelby, J. E., Condrate, R. A. 1984. Properties and structure of lanthanum borate glasses. *Journal American Ceramic Society* 67. 782–785.
- [11] Chakraborty, I. N., Day, D. E. 1985. Effect of R³⁺ ions on the structure and properties of lanthanum borate glasses. *Journal American Ceramic Society* 68 .641–645.
- [12] Verwey, J. W. M., Imbusch, G. F., Blasse, G. 1989. Laser excited spectroscopy of Gd³⁺ ions in crystalline and glass borate hosts with

- comparable composition. *Journal Physics Chemistry Solids* 50. 813–820.
- [13] Dong, H. O. 2017. Shielding properties of $80\text{TeO}_2\text{-}5\text{TiO}_2\text{-(15-x) WO}_3\text{-xAnO}_m$ glasses using WinXCom and MCNP5 code. *Radiation Physics and Chemistry*, 141 172-178.
- [14] Mcalister, D. R. 2012. *Gamma-ray* attenuation properties of common shielding materials. University Lane Lisle.
- [15] Nergiz, Y. Y. 2019. Nergiz. Gamma-ray Shielding Properties of Lithium Borate Glass Doped with Colemanit Mineral *BEU Science Journal* .8 (3) 762-771.
- [16] Erkil, İ., Altınsoy , N., Karaaslan, İ. S. , Bora A. 2016. Determination of Photon Mass Attenuation Coefficient for Some Phantom Materials using GATE Code and Comparison with Experimental and XCOM Data. *International Journal of Nuclear and Radiation Science and Technology*, 1 (2) 11-13.
- [17] Özyurt, O., Altınsoy , N., Ş., Karaaslan, İ., Bora, A., Büyük, B., Eril, İ. 2018. Calculation of gamma-ray attenuation coefficient of some granite samples using a Monte Carlo simulation code, *Radiation Physics and Chemistry* 144. 271-275.
- [18] Aral, İ. 2019. Investigation of Nuclear Shielding Capabilities of Alumina and Zirconia Based Ceramics with MCNP-X Code. Ağrı İbrahim Çeçen University, Master Thesis, Ağrı.
- [19] COŞKUN, A., YİĞİTOĞLU, İ., TOPAKLI, H., & CETİN, B. (2023). Determination of the Radiation Shielding Performance of MoO₂ Addition On PbO by Monte Carlo Simulation. In *International Conference on Pioneer and Innovative Studies* (Vol. 1, pp. 223-227).
- [20] Tekin, H. O., Abouhaswa, A. S., Kilicoglu, O., Issa, S. A., Akkurt, I., & Rammah, Y. S. (2020). Fabrication, physical characteristic, and gamma-photon attenuation parameters of newly developed molybdenum reinforced bismuth borate glasses. *Physica Scripta*, 95(11), 115703.
- [21] Alzahrani, J. S., Hessien, M., Alrowaili, Z. A., Kebaili, I., Olarinoye, I. O., Arslan, H., & Al-Buriahi, M. S. (2022). Fabrication and characterization of La₂O₃-Fe₂O₃-Bi₂O₃ nanopowders: Effects of La₂O₃ addition on structure, optical, and radiation-absorption properties. *Ceramics International*, 48(16), 22943-22952.

Bazı Bitki Uçucu Yağlarının Elma Yeşil Yaprakbiti *Aphis pomi* De Geer (Hemiptera: Aphididae)'ye Karşı İnsektisidal Etkilerinin Belirlenmesi

Hasan BİLGİÇ^{1*}, Ali Kemal BİRGÜCÜ²

¹Akdeniz Üniversitesi, Elmalı Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, 07700, Antalya, Türkiye

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, 32000, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 27.09.2024, Kabul / Accepted: 10.12.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Aphis pomi De Geer
Çay ağacı,
Lavanta,
Limon,
Uçucu yağ

Öz: Elma yeşil yaprakbiti *Aphis pomi* De Geer (Hemiptera: Aphididae) elma üretim alanlarında yaygın olarak bulunan yaprakbiti türleri arasındadır. Hızlı çoğalma yeteneği, döl ve konukçu sayısının çok olması nedeniyle mücadelesi zor olan zararlılardan birisidir. Bu çalışmada, çay ağacı, limon ve lavanta uçucu yağlarının zararlı böceğin ikinci veya üçüncü dönem nimfleri üzerine insektisidal etkisi araştırılmıştır. Denemeler, 20, 40 ve 60 µl/L dozları için 5 tekerrürlü ve her bir tekerrürde 10 birey olacak şekilde düzenlenmiştir. Sağlıklı bireyler dezenfekte edilmiş taze sürgünlerin üzerine zarar görmeyecek şekilde bırakılmış ve hazırlanan uçucu yağ solüsyonları el pülverizatörü yardımıyla taze sürgünler üzerine püskürtülmüştür. Çay ağacı, limon ve lavanta uçucu yağları uygulandıktan sonra 9 gün boyunca sayım yapılmış ve bireylerin yüzde ölüm değerleri hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, 60 µl/L dozunda bu uçucu yağların yaprakbitine karşı LT₅₀ değerleri sırasıyla 4.80, 6.00 ve 5.14 gün bulunmuştur. Elma yeşil yaprakbitine karşı çay ağacı uçucu yağı en etkili uygulama olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, zararlıya karşı bu uçucu yağların öldürücü insektisidal etkilerinden Entegre zararlı yönetimi kapsamında yararlanması kimyasal mücadeleye alternatif olabilecek insan ve çevre dostu bir mücadeleye katkıda bulunabilecektir.

Determination of the Insecticidal Activities of Some Plant Essential Oils Against Apple Green Aphid, *Aphis pomi* De Geer (Hemiptera: Aphididae)

Keywords

Aphis pomi De Geer,
Tea tree,
Lavender,
Lemon,
Essential oil

Abstract: Apple green aphid *Aphis pomi* De Geer (Hemiptera: Aphididae) is one of the aphid species commonly found in apple production areas. In addition, it is one of the pests that are difficult to control due to its ability to reproduce quickly, and the large number of offspring and hosts. In this study, the insecticidal effect of tea tree, lemon and lavender essential oils on the second or third stage nymphs of the pest was investigated. The experiments were designed with 5 replications for each dose and 10 individuals in each replication. Then, these individuals were left on disinfected fresh shoots without being damaged and the prepared essential oil solutions were sprayed on the fresh shoots with the help of a hand sprayer. After the application of tea tree, lemon and lavender essential oils, counts were made for 9 days and percentage mortality values were calculated. As a result of the study, the LT₅₀ values of these essential oils against the pest were found to be 4.80, 6.00 and 5.14 days, respectively. Tea tree essential oil was determined to be the most effective treatment against apple green aphids. As a result, utilizing the lethal effects of these essential oils against pest within the scope of integrated pest management will contribute to a human and environmentally friendly control that can be an alternative to chemical struggle.

*İlgili yazar: hasanbilgic@akdeniz.edu.tr

1. Giriş

Elma, ülkemizin çeşitli bölgelerinde yoğun olarak yetiştirilmekle birlikte üretim bakımından kıyaslandığında Antalya ili Elmalı ilçesi önemli bir konumda bulunmaktadır. Türkiye'deki elma üretiminin yaklaşık %8'si Elmalı bölgesinde üretilmektedir [1].

Türkiye'de elma üretimi yapılan alanlarda ana zararlı olan Elma iç kurdu *Cydia pomonella* (L.) (Lep.: Tortricidae)'nın yanı sıra birçok zararlı böcek türü üretimde kalite ve ürün kayıplarına neden olmaktadır. Elma yetiştiriciliğinde 15'ten daha fazla yaprakbiti türünün zarar meydana getirdiği bilinmektedir. Bu zararlı türlerden bir tanesi de elma yeşil yaprakbiti *Aphis pomi* De Geer (Hem.: Aphididae)'dir [2-8].

Elma yeşil yaprakbiti, genç yapraklar, taze sürgünler ve yaprak sapları üzerinde koloniler halinde bitkinin özsuyunu emerek elma ağaçlarına zarar vermektedir. Hızlı üreme yeteneğine sahip olması, döl ve konukçu sayısının çok olması nedeniyle de mücadelesi zor olan zararlılardan birisidir. Ayrıca, beslenme sırasında çıkardığı tatlı madde sonucunda fumajin zararına neden olmasının yanı sıra bazı virüs vektörlerinin taşınmasında rol oynadığı bilinmektedir. Popülasyonun çok yoğun olduğu zamanlarda ise meyvelerde de zarar meydana getirebilmektedir. Zarara uğrayan meyvelerde deformasyonlar ve meyvenin küçük kalmasına neden olmaktadır [7,9].

Üreticiler, etkinliğinin kısa sürede görülmesinden dolayı *A. pomi*'ye karşı genellikle kimyasal mücadeleye başvurmaktadır. Kimyasal mücadelenin bu denli yoğun kullanılması sonucunda da insektisitlere karşı zararlı direnç geliştirebilmektedir [4,10-16]. Zararlının insektisitlere karşı hızlı direnç geliştirmesiyle birlikte mücadelenin etkinliğinde azalma meydana gelmektedir. Bunun sonucunda da zararlıya karşı daha yoğun mücadele edilmesinden dolayı hem ekonomik kayıplar artmakta hem de doğal düşmanların yanı sıra insan ve çevre sağlığı olumsuz etkilenmektedir. Pestisitlere karşı direnç sorunu da tarımsal üretimde sürdürülebilirliği etkileyen önemli sorunlardan bir tanesidir [7]. Bu nedenlerden dolayı Entegre zararlı yönetimi kapsamında alternatif mücadele yöntemlerine ağırlık verilmesi gerekmektedir. Zararlılara karşı uçucu yağ kullanımı, alternatif mücadele yöntemleri arasında yer almaktadır. Uçucu yağların, zararlılara değme, fumigant ve mide olmak üzere farklı etki yolları bulunmaktadır [17]. Böceklerin, bitkilerden elde edilen bileşiklere karşı direnç geliştirme riski düşüktür [18,19]. Ayrıca, sentetik içerikli pestisitlerle kıyaslandığında bitkisel kökenli pestisitlerin çevresel faktörlerle daha çok uyumlu olduğu bilinmektedir [20].

Uçucu yağ bileşenlerinin ve ekstraktlarının zararlılara karşı yumurta öldürücü, çekici, beslenme engelleyici, fumigant ve uzaklaştırıcı gibi etkilerinin olduğu yapılan çalışmalarda kanıtlanmıştır [21-35]. Bu çalışma kapsamında, *A. pomi*'ye karşı kimyasal mücadeleye alternatif olabilecek çay ağacı, lavanta ve limon uçucu yağlarının etkili olup olmadığı araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan bitkisel uçucu yağlar ve *Aphis pomi*'nin üretimi

Bu çalışmada, çay ağacı, lavanta ve limon uçucu yağları ve *Aphis pomi* De Geer (Hemiptera: Aphididae)'nin ikinci veya üçüncü dönem nimfleri ana materyali oluşturmuştur. Çalışmada kullanılan uçucu yağların hangi bitkilerden ve bitkilerin hangi kısımlarından elde edildiği Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Denemede kullanılan uçucu yağların elde edildiği bitkilerin bilimsel isimleri ve elde edildiği bitki kısımları*

İsim	Bilimsel isim	Familya	Elde edilen kısım
Lavanta	<i>Lavandula hybrida</i>	Lamiaceae	Yaprak ve çiçek/tomurcuk
Çay ağacı	<i>Melaleuca alternifolia</i>	Myrtaceae	Yaprak
Limon	<i>Citrus limon</i>	Rutaceae	Meyve kabuğu

*Denemede Doğal Ürünler Üretim Gıda Kozmetik San. Tic. Ltd. Şti.'ne ait Lokman Aktar® ticari uçucu yağlar kullanılmıştır.

Zararlı böceğin üretimi için Antalya ili Elmalı ilçesindeki elma bahçelerinden toplanan yaprakbiti bireyleri zarar görmeyecek şekilde laboratuvara getirilmiştir. Laboratuvara getirilen bireyler önce ön kültüre alınarak içerisinden sağlıklı olanlar seçilmiş ve stok kültür oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan yaprakbiti bireyleri bu stok kültürden temin edilmiştir. Bu amaçla elma ağaçlarından alınan taze sürgünler temizlenerek içi saf su ile dolu küçük boydaki şeffaf şişeler içerisine yerleştirilmiş ve gövdesine sarılan pamuk yardımıyla sabitlenmiştir. Daha sonra bitki üzerine dikkatli bir şekilde ince samur fırça yardımıyla sağlıklı *A. pomi* bireyleri aktarılarak stok kültür oluşturulmuştur. Yaprakbiti bireylerinin kaçmaması için taban kısmında ve yan taraflarından tül ile kapatılmış delikler bulanana ağzı kesilerek genişletilmiş 1,5 L büyüklüğündeki su şişesi ters çevrilerek kapatılmıştır. Gerekli görüldükçe düzenek içerisindeki bitki kısımları yenilenmiştir.

2.2. Denemelerin kurulması

Çay ağacı, lavanta ve limon uçucu yağlarının *A. pomi*'ye karşı bir etkisini belirlemek amacıyla her bir uçucu yağın 20, 40 ve 60 µl/L dozları 50 ml'lik solüsyonlar halinde hazırlanmıştır. Ayrıca Antalya ili Elmalı ilçesindeki ilaçlama yapılmayan elma bahçelerinden sürgünler toplanmıştır. Laboratuvara getirilen sürgünler önce %0,1 Sodyum hipoklorit

(NaClO) ilave edilmiş saf su ile dezenfekte edilmiştir. Sonra dezenfekte edilmiş taze sürgünler içi saf su ile dolu küçük boydaki şeffaf şişeler içerine yerleştirilip gövdesi pamuk ile sarılarak sabitlenmiştir. Daha sonra ince samur fırça yardımıyla 10 adet ikinci veya üçüncü dönem sağlıklı nimfler bitki parçası üzerine aktarılmıştır. Her bir uçucu yağ solüsyonları el pülverizatörü yardımıyla nimflerin aktarıldığı taze sürgünler üzerinde film tabakası oluşturacak şekilde püskürtülmüştür. Ayrıca, kontrol grubunu oluşturması amacıyla sadece saf su püskürtülmüştür. En sonunda da nimflerin kaçmasını engellemek için taban kısmında ve yan taraflarından tül ile kapatılmış delikler bulunan ağzı kesilerek genişletilmiş 1,5 L büyüklüğündeki su şişesi ters çevrilerek düzeneğin üzeri kapatılmıştır. Gerekli görüldükçe düzeneğin içerisindeki sürgünler yenilenmiştir. Stok kültür üretimi ve yapılan tüm denemeler $27\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve %50-60 RH ve 16:8 saat (A:K) koşullarına sahip ayrı iklimlendirme kabinlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneme kurulup uçucu yağların her bir dozu ve kontrol uygulaması yapıldıktan sonra 9 gün boyunca canlı ve ölü birey sayıları takip edilmiş ve yavru bireyler düzenekten uzaklaştırılmıştır.

2.3. İstatiksel analizler

Tesadüf parselleri deneme desenine göre 5 tekerrürlü olarak düzenlenen denemelerden her bir tekerrürde 10 birey olmak üzere her bir doz uygulaması için toplam 50 birey kullanılmıştır ve 9 gün boyunca canlı ve ölü birey sayıları kaydedilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak başlangıçtaki birey sayısına oranla yüzde ölüm değerleri hesaplanmış ve bu yüzde değerlere açı transformasyonu uygulanmıştır. Daha sonra transforme edilen değerlere tek yönlü varyans analizi (One-Way ANOVA) ve ardından Tukey's HSD çoklu karşılaştırma testi yapılmıştır [36]. İstatistiksel analizler SPSS® 20.0 paket programı ile yapılmıştır. Şekil ve çizelgelerde transforme edilmeden önceki veriler kullanılmıştır.

3. Bulgular

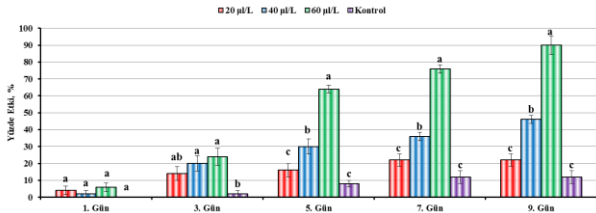
Çay ağacı, lavanta ve limon uçucu yağlarının *Aphis pomi* bireyleri üzerine etkilerinin araştırıldığı çalışmada, kontrol amacıyla kullanılan bireyler ile farklı uçucu yağların uygulandığı taze sürgünler üzerindeki bireylerin yüzde ölüm değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Elma yeşil yaprakbiti üzerine uygulanan bu üç uçucu yağında bireyler üzerinde öldürücü etkiye sahip olduğu görülmüştür. Elma yeşil yaprakbitine karşı uygulanan çay ağacı uçucu yağı içlerinden en etkili olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Çay ağacı, lavanta ve limon uçucu yağlarının 20, 40 ve 60 $\mu\text{L/L}$ dozlarına maruz kalmış *Aphis pomi* bireylerinde görülen ölüm değerleri (%)*

	Doz	1. Gün	3. Gün	5. Gün	7. Gün	9. Gün
Çay Ağacı	20 $\mu\text{L/L}$	4,00 \pm 2,45 a	14,00 \pm 4,00 ab	16,00 \pm 4,00 c	22,00 \pm 3,74 c	22,00 \pm 3,74 c
	40 $\mu\text{L/L}$	2,00 \pm 2,00 a	20,00 \pm 4,47 a	30,00 \pm 4,47 b	36,00 \pm 2,45 b	46,00 \pm 2,45 b
	60 $\mu\text{L/L}$	6,00 \pm 2,45 a	24,00 \pm 5,10 a	64,00 \pm 2,45 a	76,00 \pm 2,45 a	90,00 \pm 5,48 a
	Kontrol	0,00 \pm 0,00 a	2,00 \pm 2,00 b	8,00 \pm 2,00 c	12,00 \pm 3,74 c	12,00 \pm 3,74 c
Limon	20 $\mu\text{L/L}$	0,00 \pm 0,00 a	2,00 \pm 2,00 a	12,00 \pm 2,00 b	16,00 \pm 4,00 bc	20,00 \pm 3,16 bc
	40 $\mu\text{L/L}$	2,00 \pm 2,00 a	8,00 \pm 2,00 a	16,00 \pm 2,45 b	30,00 \pm 4,47 b	32,00 \pm 3,74 b
	60 $\mu\text{L/L}$	0,00 \pm 0,00 a	10,00 \pm 4,47 a	38,00 \pm 3,74 a	62,00 \pm 2,00 a	78,00 \pm 2,00 a
	Kontrol	0,00 \pm 0,00 a	2,00 \pm 2,00 a	8,00 \pm 2,00 b	12,00 \pm 3,74 c	12,00 \pm 3,74 c
Lavanta	20 $\mu\text{L/L}$	0,00 \pm 0,00 a	14,00 \pm 4,00 ab	16,00 \pm 4,00 bc	22,00 \pm 3,74 bc	22,00 \pm 3,74 bc
	40 $\mu\text{L/L}$	0,00 \pm 0,00 a	20,00 \pm 4,47 a	30,00 \pm 4,47 b	36,00 \pm 2,45 b	46,00 \pm 2,45 b
	60 $\mu\text{L/L}$	2,00 \pm 2,00 a	24,00 \pm 5,10 a	54,00 \pm 4,00 a	74,00 \pm 2,45 a	86,00 \pm 5,10 a
	Kontrol	0,00 \pm 0,00 a	2,00 \pm 2,00 b	8,00 \pm 2,00 c	12,00 \pm 3,74 c	12,00 \pm 3,74 c

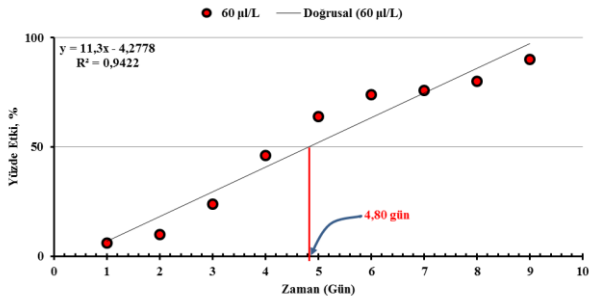
*Her bir uçucu yağ için farklı olmak üzere aynı sütunda farklı harfleri taşıyan ortalamalar (\pm standart hatalar) arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir (Tukey's HSD test, $p < 0.05$, $n=5$, her bir doz uygulaması 50 birey üzerinden yürütülmüştür).

Çay ağacı uçucu yağı *A. pomi* bireyleri üzerine 20,40 ve 60 µL/L'lik dozda uygulanmıştır. Her bir doz uygulandıktan sonra 9 gün boyunca canlı ve ölü birey sayıları takip edilmiş ve yavru bireyler düzenekten uzaklaştırılmıştır. Yapılan günlük sayımlarda doz oranının artmasıyla birlikte yaprakbiti bireylerinde gerçekleşen ölüm oranının da arttığı görülmüştür. Çay uçucu yağı *A. pomi* bireyleri üzerine 20, 40 ve 60 µL/L'lik dozlarda uygulandıktan sonra 3. gün sonunda sırasıyla %14, 20 ve 24'lük ölüm meydana gelmiştir. Kontrol amacıyla saf su uygulanan bireyler üzerinde ise ölüm oranı %2 olmuştur. Beşinci gün sonunda 60 µL/L'lik dozda gerçekleşen ölüm oranı %64 olarak görülmüştür (Şekil 1).



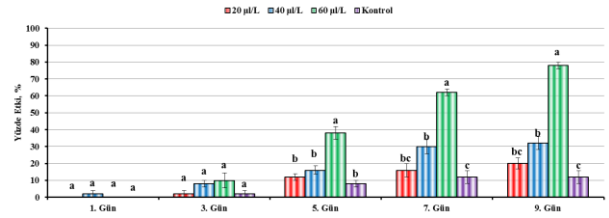
Şekil 1. Çay ağacı uçucu yağın 20, 40 ve 60 µL/L dozları uygulanmış *Aphis pomi* bireylerinin yüzde ölüm oranları (Tukey's HSD test, $p < 0.05$, $n = 5$, her bir doz uygulaması 50 birey üzerinden yürütülmüştür).

Çay ağacı uçucu yağın 60 µL/L dozuna maruz kalmış *A. pomi* bireylerinin yüzde ölüm değerleri üzerinden regresyon eğrisi elde edilmiştir ve bu sonuçlar doğrultusunda LT_{50} değeri 4.80 gün olarak belirlenmiştir (Şekil 2).



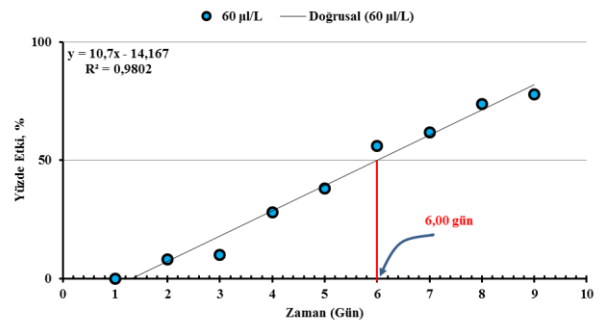
Şekil 2. Çay ağacı uçucu yağın 60 µL/L dozunu uygulananmış *Aphis pomi* bireylerinin yüzde ölüm değerleri üzerinden elde edilmiş regresyon eğrisi ($P < 0.01$) ve LT_{50} değeri.

Limon uçucu yağı *A. pomi* bireyleri üzerine 20,40 ve 60 µL/L'lik dozda uygulanmıştır. Yapılan günlük sayımlarda doz oranının artmasıyla birlikte çay ağacı uçucu yağında olduğu gibi yaprakbiti bireylerinde gerçekleşen ölüm oranının arttığı görülmüştür. 20, 40 ve 60 µL/L'lik limon uçucu yağı uygulandıktan sonra 3. gün sonunda sırasıyla %2, 8 ve 10 ölüm meydana gelmiştir. Beşinci gün sonunda 60 µL/L'lik dozda gerçekleşen ölüm oranı %38 olarak görülmüştür (Şekil 3).



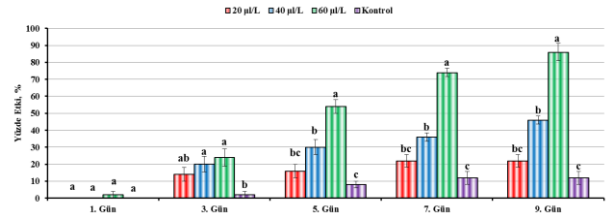
Şekil 3. Limon uçucu yağın 20, 40 ve 60 µL/L dozları uygulanmış *Aphis pomi* bireylerinin yüzde ölüm oranları (Tukey's HSD test, $p < 0.05$, $n = 5$, her bir doz uygulaması 50 birey üzerinden yürütülmüştür).

Limon uçucu yağın 60 µL/L dozunu uygulanan bireyler üzerindeki LT_{50} değeri ise 6.0 gün olarak bulunmuştur (Şekil 4). Uygulama yapılan üç uçucu yağ içerisinde *A. pomi* üzerine etkinliği en az olan uçucu yağ limon olmuştur.



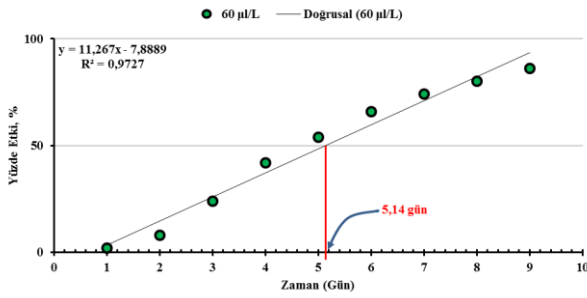
Şekil 4. Limon uçucu yağın 60 µL/L dozunu uygulananmış *Aphis pomi* bireylerinin yüzde ölüm değerleri üzerinden elde edilmiş regresyon eğrisi ($P < 0.01$) ve LT_{50} değeri.

Lavanta uçucu yağı *A. pomi* bireyleri üzerine 20,40 ve 60 µL/L'lik dozda uygulanmıştır. Yapılan günlük sayımlarda doz oranının artmasıyla birlikte limon ve çay ağacı uçucu yağlarında olduğu gibi yaprakbiti bireylerinde gerçekleşen ölüm oranının arttığı görülmüştür. 20, 40 ve 60 µL/L'lik lavanta uçucu yağı uygulandıktan sonra 3. gün sonunda sırasıyla %14, 20 ve 24 ölüm meydana gelmiştir. Beşinci gün sonunda 60 µL/L'lik dozda gerçekleşen ölüm oranı %54 olarak görülmüştür (Şekil 5).



Şekil 5. Lavanta uçucu yağın 20, 40 ve 60 µL/L dozları uygulanmış *Aphis pomi* bireylerinin yüzde ölüm oranları (Tukey's HSD test, $p < 0.05$, $n = 5$, her bir doz uygulaması 50 birey üzerinden yürütülmüştür).

Lavanta uçucu yağın 60 µL/L dozunu uygulanan bireyler üzerindeki LT_{50} değeri ise 5.14 gün olarak bulunmuştur (Şekil 6).



Şekil 6. Lavanta uçucu yağın 60 µL/L dozu uygulanmış *Aphis pomi* bireylerinin yüzde ölüm değerleri üzerinden elde edilmiş regresyon eğrisi ($P < 0.01$) ve LT_{50} değeri.

4. Tartışma ve Sonuç

Günümüzde yaprakbitlerini de içeren zararlılara karşı kimyasal mücadeleye alternatif olabilecek bitkisel insektisitler uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir [38]. Yapılan çalışmalarda, *Foeniculum vulgare* (Apiales: Apiaceae) (Rezene), *Pimpinella anisum* (Anason), *Mentha piperita* (Lamiales: Lamiaceae) (Bahçe nanesi), *M. Pulegium* (Yarpuz, Filiskin) ve *Ocimum basilicum* (Fesleğen) bitkilerinden elde edilen uçucu yağların hem kontak hem de fumigant testlerinde yüksek oranda bir etkinlik gösterdiği ve bu nedenle de yaprak bitlerine karşı bitkisel insektisitlerin geliştirilmesinde oldukça önemli olduğu kanıtlanmıştır [37]. Uçucu yağların hedef organizmalar üzerindeki insektisit etkilerine ilişkin çok sayıda çalışma yayınlanmıştır [33,34,35,39]. Bu çalışmada ise elma yeşil yaprakbitine karşı yukarıda bahsedilen uçucu yağlara alternatif olabilecek çay ağacı, limon ve lavanta uçucu yağlarının etkinliği araştırılmıştır.

Çalışmadan elde edilen verilerden yola çıkarak, üç uçucu yağın LT_{50} değerine bakıldığında *A. pomi* üzerine en etkili yağın çay ağacı uçucu yağı olduğu ortaya çıkarılmış ve bu değer 4.80 gün olduğu saptanmıştır. Budak vd (2021), bazı uçucu yağların *Macrosiphum rosae* (L.) (Hemiptera: Aphididae)'ye insektisidal etkilerinin belirlenmesi amacıyla yürüttükleri çalışmada, Çay ağacı (*Melaleuca alternifolia*) uçucu yağının *M. rosae* üzerine %1'lik dozu uygulandıktan 96 saat sonra yapılan sayımda ölüm oranı %80 bulunmuştur. Yine aynı saatte yapılan sayımda LC_{50} ve LC_{90} değeri sırasıyla 0.31 ve 1.15 saptanmıştır. Çay ağacı uçucu yağının %1'lik dozu uygulandıktan 24 ve 72 saat sonra yapılan sayımlarda sırasıyla %42 ve %66'lık ölüm kaydedilmiştir. Zararlı ile mücadelede uçucu yağların kullanılabilceğini ifade etmişlerdir [40].

Uygulama yapılan üç uçucu yağ içerisinde LT_{50} değerine bakıldığında lavanta uçucu yağının *A. pomi* üzerine etkinliği çay ağacından düşük limon uçucu yağından yüksek bulunmuş ve bu değer 5.14 gün olarak belirlenmiştir. Mülâyim vd (2020), bazı bitkisel uçucu yağların *Aphis craccivora* (Koch) ve *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae)'ye

karşı fumigant etkilerini araştırdığı çalışmada, *A. craccivora*'ya karşı lavanta uçucu yağını uygulandıktan 24 saat sonra 30 µL/L dozda %46.67 ve 60 µL/L dozda ise %86.67'lik ölüm meydana gelmiştir. Uygulamadan 72 saat sonra ise %100'lük ölüm meydana gelmiştir. *M. persicae*'ye karşı ise lavanta uçucu yağını uygulandıktan 24 saat sonra 10 µL/L dozda %40 ve 30 µL/L dozda ise %86.67'lik ölüm meydana gelmiştir. Uygulamadan 72 saat sonra 10 µL/L dozda %90, 30 µL/L dozda ise %100'lük ölüm meydana gelmiştir [41].

Uygulama yapılan üç uçucu yağ içerisinde *A. pomi* üzerine etkinliği en az olan uçucu yağ limon olmuş ve LT_{50} değeri 6.0 gün bulunmuştur. Chaieb vd. (2018), *Citrus aurantium*'dan elde edilen uçucu yağların *Macrosiphum euphorbiae* Thomas (Hemiptera: Aphididae), *Acyrtosiphon pisum* Harris (Hemiptera: Aphididae), *Aphis fabae* Scop. (Hemiptera: Aphididae) ve *Rhopalosiphum padi* L. (Hemiptera: Aphididae) karşı etkinliğini araştırmıştır. Analizlerde sonucunda kullanılan uçucu yağın Limonene (%67.1), Linalool (8.37%), β -pinene (%4.02), Myrcene (%3.17), β -Ocimene (%2.36) and α -pinene (%1.18) bileşiklerini içerdiğini ve dört yaprakbitlerine karşı da toksik etki gösterdiğini belirtmişlerdir [42]. Gupta vd. (2017), limon kabuğu ekstraktının *Macrosiphum rosae* ve *Coccinella septempunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) ve *Orius laevigatus* Fieber (Heteroptera: Anthocoridae)'a karşı etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalar sonucunda limon ekstraktının gül yaprakbitine karşı toksik, *O. laevigatus*'a az toksik ve *C. septempunctata*'ya ise toksik etki göstermediğini saptamışlardır [43].

Bazı uçucu yağların yaprakbitlerine karşı etkili oldukları birçok çalışma ile kanıtlanmıştır [37,40,41,44]. Yaprakbitlerine karşı denenen uçucu yağlardan değme etkili yöntemlerle kullanılanları sırasıyla en fazla Lamiaceae, Asteraceae ve Apiaceae'yi de içeren 20 familyadan ve 76 bitkiden elde edilen uçucu yağlardır. Fumigasyon metoduyla yapılan çalışmalarda ise en fazla sırasıyla Lamiaceae, Apiaceae, Myrtaceae ve Rutaceae'yi de içeren 12 familyaya ait bitkilerden elde edilen uçucu yağlar kullanılmıştır [37]. Yukarıda belirtilen çalışmalara paralel olarak bu çalışmada da Lamiaceae, Myrtaceae ve Rutaceae'ye ait uçucu yağlar kullanılmıştır. Bu familyaya ait bitki uçucu yağların bitkilerde, depolarda korunan ürünlerde önemli kayıplara neden olan zararlılara karşı etkili insektisidal ve akarısidal etkinliğe sahip olduğu önceden yapılmış çalışmalarda da bildirilmiştir [45,46,47].

Bitkilerden elde edilen uçucu yağlar, insan ve çevre sağlığı üzerine en azından sınırlı düzeyde olumsuz etkileri olan ve entegre zararlı yönetimi kapsamında diğer mücadele yöntemlerine alternatif veya destek olabilecek uygulamalardan bir tanesidir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda çay ağacı, limon ve lavanta uçucu yağlarının zararlıya

karşı kullanılması durumunda kimyasal mücadeleye alternatif olabilecek potansiyele sahip oldukları görülmektedir. Bu üç uçucu yağ içerisinde LT₅₀ değerinden yola çıkarak çay ağacı uçucu yağı zararlıya karşı en etkili yağ olmuştur. Çay ağacı uçucu yağından sonra lavanta ve limon uçucu yağı sırasıyla zararlıya karşı daha etkili olmuştur. Bu kapsamda kimyasal mücadelenin neden olduğu direnç ve kalıntı problemlerinin önüne geçmek açısından uçucu yağların kullanımı son yıllarda önem kazanmıştır. Bu açıdan bakıldığında, *Aphis pomi* De Geer (Hemiptera: Aphididae)'nin bireyleri üzerine çay ağacı, lavanta ve limon uçucu yağlarının Entegre zararlı yönetimi kapsamında kullanılması, çevre dostu yaklaşımlara sahip mücadele yöntemlerine katkıda bulunacaktır.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] TÜİK, 2022. Bitkisel Üretim İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2023-49535> (Erişim tarihi: 31.07.2024).
- [2] Blakman, R. L., Eastop, V. F. 2020. Aphids on The World's Crops (An Identification and Information Guide), Second Ed., UK John Wiley & Sons. London, 476s.
- [3] Footitt, R. G., Halbert, S. E., Miller, G. L., Maw, E., Russell, L. M. 2006. Adventive Aphids (Hemiptera: Aphididae) of America North of Mexico. Proceedings Entomology. Society of Entomology Washington, 10, 583–586.
- [4] Lowery, D. T., Smirle, M. J. 2003. Comparison of bioassay techniques for determining baseline susceptibilities to imidacloprid for Green apple aphid (Homoptera: Aphididae). Journal of Economic Entomology, 96(6), 1864–1871.
- [5] Alaserhat, İ., Güçlü, Ş. 2020. Aphid species (Hemiptera: Aphididae), their natural enemies and secondary hosts on temperate fruit species. Bitki Koruma Bülteni, 60(4), 91–109.
- [6] Sarı, E. D., Yıldırım, E. 2021. Gülnar (Mersin) İlçesi Elma Ağaçlarındaki Zararlı ve Yararlı Arthropoda Türlerinin Tespiti ve Bazı Biyolojik Gözlemler. KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi, 24(6), 1247–1262.
- [7] Erdogan, C., Ozdem, A., Alpkent, Y. N., Demiroz, D. 2023. Resistance to common insecticides and mechanisms of resistance in *Aphis pomi* de Geer (Hemiptera: Aphididae), in apple orchards in Turkey. Phytoparasitica, 51, 323–335.
- [8] Stanić, D. 2024. The predators of aphids on apples in the region East Sarajevo (Bosnia and Herzegovina). Plant Protection Science, 60, 97–105.
- [9] TAGEM, 2022. Elma, Armut ve Ayva Entegre Mücadele Teknik Talimatları. <https://www.tarimorman.gov.tr/TAGEM/Belgeler/Entegre/elma%20armut%20ayva%20entegre.pdf> (Erişim tarihi: 31.07.2024).
- [10] Hogmire, H. W., Brown, M. W., Crim, V. L. 1990. Toxicity of slide dip application of five insecticides to Apple aphid and spirea aphid (Homoptera:Aphididae). Journal of Entomological Science, 25(1), 10–15.
- [11] Hogmire, H. W., Brown, M. W., Schmitt, J. J., Winfield, T. M. 1992. Population development and insecticide susceptibility of Apple aphid and spirea aphid (Homoptera: Aphididae) on apple. Journal of Entomological Science, 27(2), 113–119.
- [12] Qin, X., Jiucui, H., Shanxi, T. 2002. Resistance monitoring of *Aphis pomi* De Geer from Shanxi province to pyrethroids. Journal of Shanxi Agricultural University, 22(1), 39–41.
- [13] Lowery, D. T., Smirle, M. J., Footitt, R. G., Zurowski, C. L., Peryea, B. 2005. Baseline susceptibilities to imidacloprid for Green apple aphid and spirea aphid (Homoptera: Aphididae) collected from apple in the Pacific Northwest. Journal of Economic Entomology, 98(1), 188–194.
- [14] Lowery, D. T., Smirle, M. J., Footitt, R. G., Beers, E. H. 2006. Susceptibilities of Apple aphid and spirea aphid collected from apple in the Pacific Northwest to selected insecticides. Journal of Economic Entomology, 99(4), 1369–1374.
- [15] Smirle, M. J., Zurowski, C. L., Lowery, D. T., Footitt, R. G. 2010. Relationship of insecticide tolerance to esterase enzyme activity in *Aphis pomi* and *Aphis spiraeicola* (Hemiptera: Aphididae). Journal of Economic Entomology, 103(2), 374–378.
- [16] Tamas, N., Dojnov, B., Margetic, A., Vujcic, M., Spirovic, B., Miletic, N., Stevic, M., Vujcic, Z. 2015. Resistance to common organophosphate and carbamate insecticides in *Aphis pomi* (Hemiptera: Aphididae). Fruits, 70(3), 135–142.
- [17] Prates, H. T., Santos, J. P., Waquil, J. M., Fabris, J. D., Oliveira, A. B., Foster, J. E. 1998. Insecticidal activity of monoterpenes against *Rhysopertha dominica* (F.) and *Tribolium castaneum* (Herbst.). Journal of Stored Products Research, 34, 243–249.

- [18] Lindquist, R. K., Adams, A. J., Hall, F. R., Adams, I. H. H. 1990. Laboratory and greenhouse evaluations of margosan-o against bifenthrin-resistant and -susceptible greenhouse whiteflies, *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae), pp. 91-99. In Proceedings, U. S. Department of Agriculture, Neem Workshop. USDA-ARS. 86s.
- [19] Ahn, Y. J., Lee, S. B., Lee, H. S., Kim, G. H. 1998. Insecticidal and acaricidal activity of carvacrol and β -thujaplicine derived from *Thujopsis dolabrata* var. *hondai* sawdust. Journal of Chemical Ecology, 24, 81-90.
- [20] Isman, M. B., Machial, C. M. 2006. "Pesticides Based on Plant Essential Oils: From Traditional Practice to Commercialization, 29-44". In: Naturally Occurring Bioactive Compounds (Eds.: Rai, M. ve M.C. Carpinella). Elsevier, 514s.
- [21] Mwangi, J. W., Muriuki, G., Munavu, R., Lwande, W., Hassanali, A. 1992. Essential oils of *Lippia* species in Kenya. IV: Maize weevil (*Sitophilus zeamais*) repellency and larvicidal Activity. International Pharmacognosy, 30(1), 9-16.
- [22] Shaaya, E., Ravid, U., Paster, N., Kostjukovsky, M., Menasherov, M., Plotkin, S. 1993. Essential oils and their components as active fumigants against several species of stored product insects and fungi. Acta Horticulturae, 344, 131-137.
- [23] Schmitt, A. 1994. Plant Extracts As Pest and Disease Control Agents. Proceedings of the International Meeting, 2-3 June 1994, Trento, 264-272.
- [24] Ndungu, M., Lwande, W., Hassanali, A., Moreka, L., Chhabra, S. C. 1995. *Cleome monophylla* essential oil and its constituents as tick (*Rhipicephalus appendiculatus*) and maize weevil (*Sitophilus zeamais*) Repellents. Entomology Experimentalis et Applicata, 76, 271-222.
- [25] Aslan, İ., Özbek, H., Çalmaşur, Ö., Şahin, F. 2004. Toxicity of essential oil vapours to two greenhouse pests, *Tetranychus urticae* Koch and *Bemisia tabaci* Genn.. Industrial Crops and Products, 19, 167-173.
- [26] Isikber, A. A., Alma, M. H., Kanat, M., Karci, A. 2006. Fumigant toxicity of essential oils from *Laurus nobilis* and *Rosmarinus officinalis* against all life stages of *Tribolium confusum*. Phytoparasitica, 34, 167-177.
- [27] Topuz, E., Erler, F. 2007. Bioefficacy of some essential oils against the carmine spider mite, *Tetranychus cinnabarinus*. Fresenius Environmental Bulletin, 16, 1498-1502.
- [28] Koul, O., Walia, S., Dhaliwal, G. S. 2008. Essential oils as green pesticides: potential and constraints. Biopesticides International, 4(1), 63-84.
- [29] Topuz, E., Madanlar, N. 2011. Bazı bitkisel kökenli uçucu yağların *Tetranychus cinnabarinus* (Boisduval, 1867) (Acari: Tetranychidae) üzerine kontakt ve repellent etkileri. Türkiye Entomoloji Bülteni, 1(2), 99-107.
- [30] Topuz, E., Madanlar, N., Erler, F. 2012. Evaluation of fumigant toxicity of *Mentha pulegium* essential oil against *Tetranychus cinnabarinus* under greenhouse conditions. Fresenius Environmental Bulletin, 21, 2739-2745.
- [31] Bayındır, A., Özger, Ş., Karaca, İ., Birgücü, A. K., Hassan, E. 2015. Effects of some plant extracts on *Tuta absoluta* (Meyrick, 1917) (Lepidoptera: Gelechiidae) under laboratory conditions. Advances in Food Sciences, 37(3), 132-137.
- [32] Birgücü, A. K., Satar, S., Karaca, İ. 2015. Effects of some plant extracts on *Aphis gossypii* Glover. (Hemiptera: Aphididae) and *Bemisia tabaci* (Gennadius) Takahashi (Hemiptera: Aleyrodidae). Asian Journal of Agriculture and Food Science, 3(2), 149-154.
- [33] Adebisi, O., Dolma, S K., Verma, P K., Singh, B., Reddy, S G E. 2018. Volatile, non-volatile composition and insecticidal activity of *Eupatorium adenophorum* Spreng against diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.), and aphid, *Aphis craccivora*. Toxin Reviews, 38(2), 1-8.
- [34] Czerniewicz, P., Chrzanowski, G., Sprawka, I., Sytykiewicz, H. 2018. Aphicidal activity of selected Asteraceae essential oils and their effect on enzyme activities of the green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulzer). Pesticide Biochemistry and Physiology, 145, 84-92
- [35] Pavela, R. 2018. Essential oils from *Foeniculum vulgare* Miller as a safe environmental insecticide against the aphid *Myzus persicae* Sulzer. Environmental Science and Pollution Research, 25, 10904-10910
- [36] Tukey, J. W. 1949. Comparing individual means in the analyses of variance. Biometrics, 5, 99-114.
- [37] Ikbal, C., Pavela, R. 2019. Essential oils as active ingredients of botanical insecticides against aphids. Journal of Pest Science, 92, 971-986.
- [38] Smith, G. H., Roberts, J. M., Pope, T. W. 2018. Terpene based biopesticides as potential alternatives to synthetic insecticides for control of aphid pests on protected ornamentals. Crop Prot, 110, 125-130.
- [39] Isman, M. B., Grieneisen, M. L. 2014 Botanical insecticide research: many publications, limited useful data. Trends Plant Sci. 19, 140-145.
- [40] Budak, E., Yigit, Ş., Aşkın, A. K., Akça, İ., Saruhan, İ. 2021. Bazı Uçucu Yağların *Macrosiphum rosae*

- (L.) (Hemiptera: Aphididae)'ya İnsektisidal Etkilerinin Belirlenmesi. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 19(1), 101-107.
- [41] Mülâyim, O., Alaoğlu, Ö., Çetin, H. 2020. Bazı bitkisel uçucu yağların *Aphis craccivora* (Koch) ve *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae)'ya karşı fumigant etkileri. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 24(2), 195-203.
- [42] Chaieb, I., Zarrad, K., Sellam, R., Tayeb, W., Hammouda, A. B., Laarif, A., Bouhachem, S. 2018. Chemical Composition and Aphicidal Potential of *Citrus aurantium* peel essential oils. Entomol Gen, 37, 63-75.
- [43] Gupta, G., Agarwal, U., Kaur, H., Kumar, N. R., Gupta, P. 2017. Aphicidal effects of terpenoids present in *Citrus limon* on *Macrosiphum roseiformis* and two generalist insect predators. Journal of Asia-Pacific Entomology, 20(4), 1087-1095.
- [44] Bayındır Erol, A., Birgücü, A. K. 2021. Effects of different essential oils on *Aphis fabae* (Hemiptera: Aphididae). Journal of Scientific and Engineering Research, 8(10), 36-39.
- [45] Sertkaya, E., Kaya, K., Soylu, S. 2010. Chemical compositions and insecticidal activities of the essential oils from several medicinal plants against the cotton whitefly, *Bemisia tabaci*. Asian Journal of Chemistry, 22, 2982-2990.
- [46] Sertkaya, E., Kaya, K., Soylu, S. 2010. Acaricidal activities of the essential oils from several medicinal plants against the carmine spider mite (*Tetranychus cinnabarinus* Boisd.) (Acarina: Tetranychidae). Industrial Crops and Products, 31, 107-112.
- [47] Kaya, K., Sertkaya, E., Üremiş, İ., Soylu, S. 2018. Determination of chemical composition and fumigant insecticidal activities of essential oils of some medicinal plants against the adults of cowpea weevil, *Callosobruchus maculatus*. KSU Journal of Agriculture and Nature, 21, 708-714.

İnsansız Hava Aracı ile Yangın Bölgesinin Tespiti ve Müdahalesinin Yapay Zeka ile Tahminlenmesi

Mehmet YÜCEL^{*1}, Bekir AKSOY²

^{1,2} Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 09.10.2024, Kabul / Accepted: 05.12.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Derin öğrenme,
Makine Öğrenmesi,
Görüntü işleme,
İnsansız Hava Aracı,
Orman Yangınları

Öz: Orman yangınları günümüzde, canlı yaşam alanlarını tehdit eden afetlerin başında gelmektedir. Küresel ısınmadaki artış, hava kalitesinin bozulması, hayvan ve bitki çeşitliliğindeki azalmalar, orman yangınlarının oluşturduğu başlıca zararlardır. Orman yangınlarının oluşturduğu tehditler ile mücadele edebilmek için tüm devletler çeşitli politikalar geliştirmekte ve ciddi maddi harcamalar yapmaktadırlar. Bu mücadelede kullanılan teknolojik ürünlerin geliştirilmesi ve orman yangınlarına daha hızlı ve kesin çözümün bulunabilmesi elzemdir. Gerçekleştirilen tez çalışmasında bu sorunlardan hareketle yapay zeka tabanlı bir insansız hava aracı sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem olası yangın bölgesinde devriye gezerek otonom uçuş ve analiz yapma yeteneklerine sahiptir. Sistem üzerinde bulunan kamera ile anlık olarak görüntüler yer birimine aktarılmakta ve işlenmektedir. İşlenen görüntüler de yangın ve duman emareleri aranmaktadır. Olası bir yangın durumunda sistem otonom olarak yangın bölgesinde uçuş gerçekleştirmekte ve yangına müdahale etmek üzere görev icra etmektedir. Yangın anında yapay zeka modelleri ile rüzgar hızı, İHA hızı, İHA irtifası bilgileri işlenerek bir yatay atış tahmini yapılmaktadır. Tahmin sonucunda İHA hareket halinde iken yangın söndürme topunun bırakılması gereken an hesaplanmaktadır. Oluşan yatay atışın X ekseninde ne kadar yol alacağı model tarafından tahmin edilmektedir. X ekseninden alınacak yolun bitiş noktası yangın merkezi için tahminlenmektedir. Böylece doğru bir atış ile yangın söndürme topunun alevli bölgeye düşürülmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda geliştirilen derin öğrenme mimarisi ile yangındaki alevli kısımların %100 oranında tespit edilebildiği gözlemlenmiştir. Duman tespitinde ise geliştirilen mimari %98 oranında başarı sağlamıştır. Yatay atış işleminin tahmini için Random Forest, XGB Boost ve Pycaret algoritmaları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan algoritmalarından XGB Boost R² performans değerlendirme metriğine göre 0.99 doğruluk oranı ile en başarılı algoritma olarak tespit edilmiştir.

Detection of Fire Zone by Unmanned Aerial Vehicle and Prediction of Fire Intervention with Artificial Intelligence

Keywords

Deep learning,
Machine learning,
Image processing,
Unmanned aerial vehicle,
Forest fires

Abstract: Forest fires are among the most common disasters that threaten living spaces today. The increase in global warming, deterioration of air quality, and decreases in animal and plant diversity are the main damages caused by forest fires. In order to combat the threats posed by forest fires, all states develop various policies and make serious financial expenditures. It is essential to develop technological products used in this fight and to find faster and more definitive solutions to forest fires. In the thesis study conducted, an artificial intelligence-based unmanned aerial vehicle system was developed based on these problems. The developed system has the ability to patrol in a potential fire area and perform autonomous flight and analysis. Images are instantly transferred to the ground unit with the camera on the system and processed. Signs of fire and smoke are searched

in the processed images. In the event of a possible fire, the system autonomously flies in the fire area and performs a task to intervene in the fire. In the event of a fire, a horizontal shot estimate is made by processing wind speed, UAV speed, and UAV altitude information with artificial intelligence models. As a result of the estimate, the moment when the fire extinguishing ball should be released while the UAV is moving is calculated. The model estimates how far the horizontal shot will travel on the X axis. The end point of the path to be taken from the X axis is estimated for the fire center. Thus, it is aimed to drop the fire extinguishing ball into the flaming area with a correct shot. As a result of the study, it was observed that the flaming parts of the fire could be detected at a rate of 100% with the deep learning architecture developed. In smoke detection, the developed architecture achieved 98% success. Random Forest, XGB Boost and Pycaret algorithms were used to predict the horizontal shooting process. Among the algorithms used in the study, XGB Boost was found to be the most successful algorithm with an accuracy rate of 0.99 according to the R2 performance evaluation metric.

1. Giriş

Ormanlar, doğal hayatın en önemli kaynaklarından birisidir ve birçok canlının içerisinde yaşamını sürdürdüğü en önemli doğal ortamlardan birisidir. Ayrıca ormanlar, iklim durumunu dengeleme, toprağın verimliliğini artırma, doğadaki karbon dengesini kurma, su kütlelerini daha iyi seviyede tutulmasını sağlama gibi doğada birçok önemli görevi yerine getirmektedir [1]. Ekonomik açıdan bakıldığında ise ormanlar, kendisinden elde edilen endüstriyel ürünler ile hem toplum hayatındaki birçok alanda kullanılmakta ve aynı zamanda bu sektörde görev yapan birçok insana istihdam olanağı sağlamaktadır. Ancak orman yangınları ile bu alanlar gün geçtikçe daha da azalmakta ve toplum hayatını önemli ölçüde tehdit etmektedir [2].

Orman yangınları ile mücadelede yangın koruma planı, yangın önleme planı ve yangın söndürme planı olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden ilki olan yangın koruma planı için daha önceden yangın tehlike haritaları çıkarılarak orman bölgesinde özel tehlike alanları belirlenmektedir. Tehlikeli alanlar belirlendikten sonra bu alanlarının temiz tutulması, halkın eğitimi ve yasal önlemlerin alınması bu yöntemin temel ilkeleridir. İkinci yöntemde ise amaç yangın önleme planı oluşturulmaktadır. Bu plan kapsamında, alanın sınıflandırılması, yanıcı madde tehlikesinin organizesi, yangın gözetim şebekesi, ulaşım, yangın söndürme ekipleri ve haberleşme çalışmaları yer almaktadır. Yangın ile mücadelede üçüncü ve son aşama ise iyi bir yangın söndürme planının oluşturularak uygulanmasıdır. Ancak günümüz teknolojisinde yangın söndürme planı ile yapılan çalışmalar genellikle insan sağlığı açısından riskli durumlar içermektedir [3].

Söndürme çalışmalarında ise genellikle manuel sistemler kullanılmaktadır. Yangın ile mücadele personelleri, yangının türüne göre belirlenmiş pompalar, iş makineleri, farklı su kapasitelerindeki araçlar ve yangınla mücadele sistemleri ile donatılarak

yangın söndürme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Kullanılan sistemlerin birçoğu yangına yakın mesafeden müdahaleyi zorunlu kılmakta ve personeller yangın kontrol eylemlerini yürütürken ısı, duman ve alevlere maruz kalarak sağlık problemleri yaşamaktadırlar. İtfaiyeciler yangın ile mücadele ederken hayatlarını tehlikeye atmakta ve insanları fiziksel olduğu kadar zihinsel olarak da yıpranmaktadır [4]. Ayrıca yangın ile mücadele personelleri zorlu arazi koşullarında ulaşım zorluğunu, malzeme ve insan eksikliğini ve senaryo bilgilerinin bozulmasını sıklıkla karşılaşılan problemler olarak belirlenmiştir [5]. Tüm bu problemlerin önüne geçebilmek için günümüzde farklı yazılım ve donanım sistemleri kullanılmaktadır. Geliştirilen donanımların başında ise İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemleri gelmektedir. İHA'lar uzaktan bir yer birimi aracılığı ile kontrol edilebilen, manuel ya da otonom olarak uçuş yapabilen sistemlerdir. Özellikle askeri alanlarda, insan yaşamının tehdit altında olduğu kritik yerlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca tarım alanında haritalandırma, afet durumunda arama kurtarma gibi çalışmalarda büyük avantajlar sağlamaktadır [6]. Ayrıca İHA sistemlerine gelişmiş görüntü işleme ve yapay zekâ teknolojili yazılımlar kullanılarak daha kapsamlı görevler yerine getirmeleri sağlanmaktadır.

Yapay zekâ bir bilgisayarın ya da bilgisayar destekli bir sistemin, canlıya ait olan yetenekleri yerine getirebilmesi olarak tanımlanabilir. Yapay zekâ algoritmaları problemlere hızlı ve etkili çözümler getirilebilmektedir. Görüntü işleme teknikleri ise görüntülerin sayısallaştırılarak bilgisayar ortamında belirlenen bir amaç doğrultusunda analizler yapılarak anlamlı sonuçlar elde etme süreci olarak tanımlanır [7,8].

Günümüzde orman söndürme çalışmalarında, arazi tanıma, yardım götürme, yangın sürecinin anlık olarak izlenebilmesi gibi birçok alanda görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleri kullanılmaktadır. Akademik literatür incelendiğinde yangın söndürme çalışmalarında kullanılan yapay zekaya dayalı otonom

sistemlerin yaygın olmadığı ve bu alanda yapılacak çalışmalara ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir [5, 9,10].

Çalışmada günümüzün önemli problemlerinden birisi olan orman yangınlarına erken müdahale yapabilmek için görüntü işleme ve yapay zekâ teknolojilerine dayalı İHA kullanılarak orman yangınlarına olası coğrafi zorlukları en aza indiren bir sistem tasarlanarak yangına erken müdahale etmeye imkân tanıyan bir sistem geliştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışmanın materyal bölümünde çalışmadan kullanılan İHA'nın bileşenleri ve çalışmada kullanılan yapay zekâ algoritmalarına ait detaylı bilgiler aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir.

2.1.1. İnsansız hava aracı

Çalışma için tasarlanan İHA'nın uçuş kontrolleri Arducopter APM2 ile kontrol kartı ile gerçekleştirilmiştir. İHA uçuşu için gerekli kaldırma kuvvetini üretecek altı adet fırçasız motor kullanılmıştır. Her bir motor 30A'lık ESC'ler ile sürülmektedir. Sisteme gerekli güç 2500mAh değerinde LipoPil üzerinden sağlanmaktadır. Ayrıca İHA üzerinde veri toplamak amacıyla GPS, Telemetri Tx-Rx, Kamera ve Video Tx-Rx bileşenleri kullanılmıştır. Tablo 1'de çalışmaya özgü tasarlanan İHA'nın bileşenleri verilmiştir.

Tablo 1. İnsansız hava aracının bileşenleri

İnsansız Hava Aracı Bileşeni	Komponent Adı
Kontrol Kartı	Arducopter (APM2)
Eyleyici	Fırçasız motor (RS 2212-920kv)
Şase	F550
Motor Sürücü	30A'lık ESC
Güç Kaynağı	2500 mAh- 11.4V 3S Lipo
Kanat Tipi	Döner Kanat 1045 Pervane
GPS	M8N
RF Tx-Rx Alıcı Verici	HK-TR6A V2
Kontrol Yazılımı	Mission planner ardupilot
Telemetri	433 mHz Telemetri
Kamera	1000TVL CCD
Görüntü Aktarıcı	5 GHz Video Tx-Rx
Yangın Söndürme Topu	1.3 Kg-14.5R

2.1.2. Extreme gradient boosting algoritması - XGB

Friedman tarafından 2001 yılında geliştirilen gradient boosting temelli bir algoritma olan aşırı gradyan

artırma (XGB), düzenli bir model biçimlendirmesi kullanmasıyla ve aşırı öğrenmeyi kontrol edebilmesi nedeniyle sıklıkla tercih edilen bir yapay zeka algoritmalarından birisidir [11,12]. XGB algoritmasının amaç fonksiyonu denklem 1'de verilmiştir [13-15].

$$L(\emptyset) = \sum_i \ell(y_i, \hat{y}_i) + \sum_k \Omega(f_k) \quad (1)$$

Denklem 1'de ℓ ; gerçek değeri, y_i ile tahminlenen değeri, \hat{y}_i ise gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki farkı ölçen kayıp fonksiyonudur. f_k ; bağımsız bir ağaç yapısını ve bağımsız olan yaprak ağırlıklarını ifade ederken, Ω ise düzeltme parametresidir. Düzeltme teriminin gösterimi denklem 2'de verilmiştir [15].

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda w^2 \quad (2)$$

Denklem 2'de verilen düzeltme teriminde yer alan γ karmaşıklık parametresi olarak yaprak düğümlerinin sayısını kontrol etmektedir. Karar ağacında bulunan yaprak sayısı T ile gösterilir ve yaprak düğümlerinin ağırlıklarını göstermektedir. ω ve λ ise aşırı öğrenmeden kaçınmak için kullanılan parametrelerdir [15].

2.1.3. Random forest algoritması

Ağaç tipi sınıflandırıcılardan olan Random Forest (RF) algoritması, 2001 yılında Breiman tarafından geliştirilen bir topluluk öğrenme algoritmasıdır. RF algoritması kök, düğümler, dallar ve yapraklara sahip olan gerçek karar ağaçlarından oluşmaktadır. Karar ağaçlarında kök ve düğümler kararların ölçütlerini, yapraklar verilen kararların durumlarını, dallar ise ölçütlerle kararlar arasındaki bağlantıyı göstermektedir [16].

2.1.4. Pycaret algoritması

PyCaret algoritması, farklı yapay zeka algoritmalarını birlikte kullanılarak yazılımlardaki kod sayısını minimize ederek hızlı sonuçlar elde etmek için Python programlama dili ile geliştirilmiş bir makine öğrenme kütüphanesidir. Scikit-learn, XGBoost, LightGBM, CatBoost gibi makine öğrenme kütüphanelerinin aynı anda kullanılmasına imkan tanımaktadır [17].

2.1.5. Evrişimli sinir ağları modeli

Evrişimli Sinir Ağları (ESA), derin öğrenme mimarileri kategorisinde sıklıkla kullanılan mimarilerden birisidir. ESA'da görüntülerden özellik çıkarma ve sınıflandırma yöntemlerinin birleşiminden oluşan bir derin öğrenme algoritmasıdır. ESA derin öğrenme mimarisi temel olarak farklı görevleri yerine getirmek

için evrişim katmanı, aktivasyon katmanı, havuzlama katmanı gibi yapılardan oluşmaktadır [18].

2.1.6. UFS-Net derin öğrenme modeli

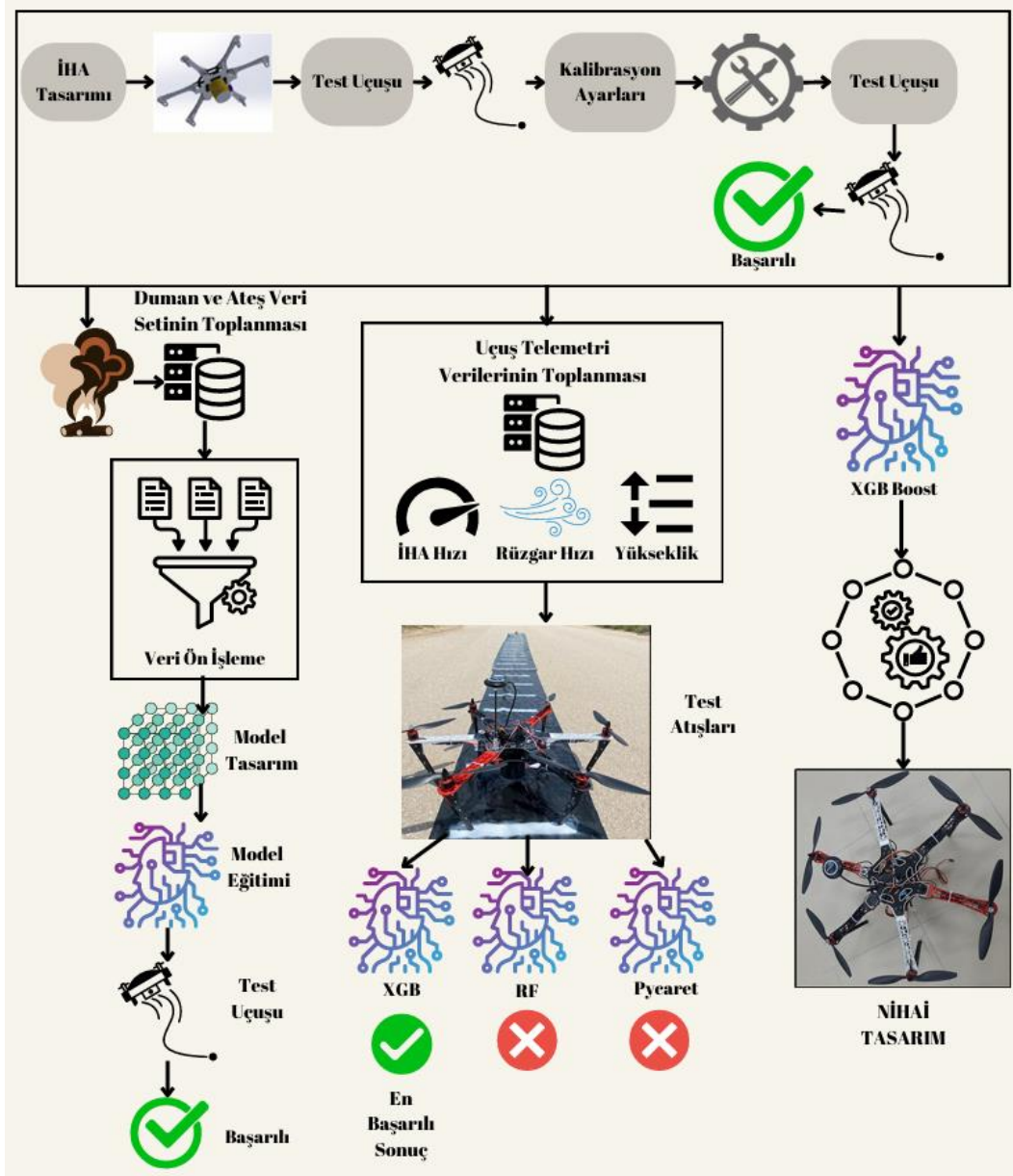
Hosseini vd, tarafından 2022 yılında önerilmiş olan ESA tabanlı bir derin öğrenme modelidir. UFS-Net'in diğer bilgisayar görü tabanlı sistemlerden en önemli farkı sadece duman veya alevi değil duman ve alevi birlikte tespit etmede kullanılmasıdır [19].

3.1.7. FireNet

FireNet, Seydi vd. tarafından 2022 yılında derin öğrenme tabanlı geliştirilmiş bir yapay zekâ modelidir. FireNet iki akış özellikli bir mimariden

oluşmaktadır. İlk olarak sığ özellikler çok ölçekli iki boyutlu evrişimli katmanlar tarafından çıkarılmaktadır. Ardından, çıkarılan derin özellikler, her bir derin özellik çıkarıcı kanalına beslenmektedir. Küçük yangınlar küçük alanları kapsayabileceğinden, derin özellikleri çıkarmadan önce ilk kanal için iki oranında üst örnekleme kullanılmıştır. Daha sonra, iki katmandan çıkarılan derin özellikler, toplama operatörü tarafından birleştirilmiştir. Son aşamada ise çıkarılan özellikler, son sınıf etiketine (aktif ateş veya değil) karar vermek için tek bir özellik haritası olarak 28x28 boyutlu dönüşüm katmanına beslenmektedir [20].

2.2. Metot

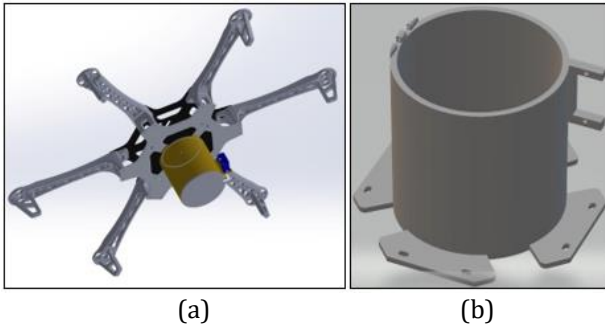


Şekil 1. Çalışmanın iş akış diyagramı

Çalışmada, insansız hava aracı ile orman yangınlarına minimum sürede müdahale edebilmek ve olası büyük

yangınların önüne geçilebilmesi için Şekil 2'de görüldüğü gibi yapay zekâ ve görüntü işleme tabanlı

bir sistem tasarımı yapılmıştır. Gerçekleştirilmiş olan çalışmaya ait iş akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir. Yapılan çalışmada Şekil 2 (a)'da görüldüğü gibi "quadcopter" özelliğinde bulunan döner kanatlı insansız hava aracı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 2 (b)'de ise insansız hava aracına yangın ile mücadele edebilme yeteneği kazandırılmak için ateş topu mekanizma tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu mekanizma insansız hava aracının alt bölgesine yerleştirilmiştir. Mekanizma kapaklı olup, kapak bir adet servo motor ile kontrol edilmektedir. Mekanizma içerisine yangın söndürme topu yerleştirilmiştir ve yangın konumuna gelince mekanizma yer kontrol istasyonu üzerinden otomatik tetiklenerek kapağın açılması sağlanacaktır. Bu sayede yangına müdahale edilmesi sağlanmıştır. Şekil 2 (c)'de ise insansız hava aracının montajı gerçekleştirilmiş son hali gösterilmiştir.



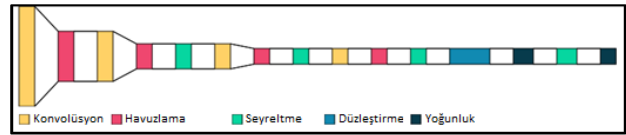
Şekil 2. İnsansız hava aracı için (a) quadcopter tasarımı (b) ateş topu mekanizması. (c) İnsansız hava aracının tamamlanmış hali

İHA tasarımının yapılmasının ardından uçuş testleri yapılarak gerekli kalibrasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu aşamanın ardından Şekil 3'te de görüldüğü gibi yangın tespiti için yapay zekâ modelinin eğitiminde kullanılacak olan özgün veri seti toplanmıştır. Ormanlık arazi üzerinde alev görüntüsünü tespit etmek ağaçların gövdeleri ve dallarından kaynaklanabilecek problemlerin önüne geçmek için veri setine duman görüntüleri de eklenerek veri setindeki görüntü sayısı artırılmıştır.



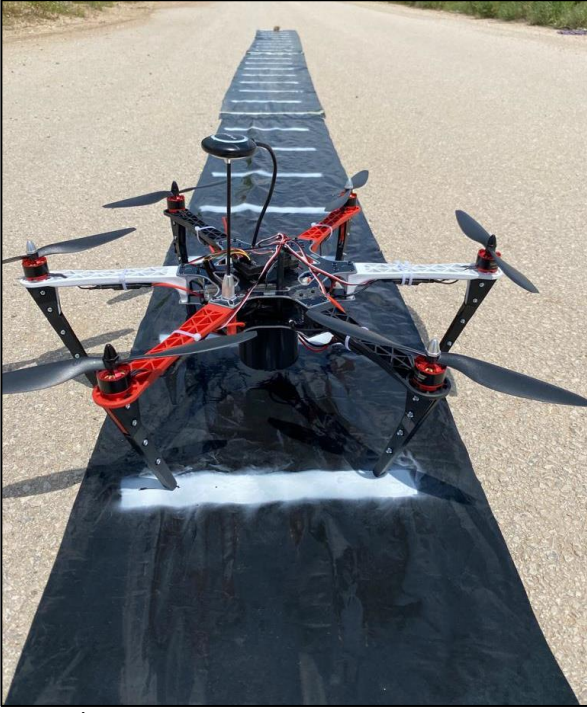
Şekil 3. Çalışmaya özgü toplanan veri seti için örnek görüntüler

Çalışmada gerçekleştirilen insansız hava aracı ile toplanan alev ve duman görüntüleri derin öğrenme modeli için veri ön işleme işlemlerine tabii tutulmuştur. Bu aşamada görüntülerin boyutları 640x640 piksel boyutuna getirilerek görüntüler üzerindeki alev ve duman bölgeleri poligon etiketleme ile sınırları çizilerek etiketlenmiştir. Derin öğrenme modellerini beslemek için veri setinin büyük olması gerektiğinden veri setinde bulunan 387 adet görüntüye aynalama, döndürme ve grayscale görüntü işlemlerine tabii tutularak veri setinde yer alan görüntülerin sayıları artırılmıştır. Böylece alev ve duman veri setinde toplam 1161 adet görüntü sayısına ulaşılmıştır. Veri ön işleme ve veri artırma işlemlerinden sonra veri seti derin öğrenme modelini eğitmek için hazır hale getirilmiştir. Geliştirilen derin öğrenme mimarisinin detayları Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Çalışmaya özgü geliştirilen derin öğrenme modeli

Çalışmanın ikinci aşamasında ise çevresel değişkenlerden oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. İHA ile toplamda 380 atış gerçekleştirilerek sayısal veriler toplanmıştır. Şekil 5'te atış anındaki insansız hava aracı ile gerçekleştirilecek olan atışın ölçümü için oluşturulan ölçüm düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 5. İnsan hava aracında ateş topu düşüş yeri ile ilgili hazırlanmış olan ölçüm sistemi

Şekil 6'da ise İHA'nın yüksekliği, hızı, ortamdaki rüzgâr hızı ve yangın söndürme topunun yatay eksende aldığı mesafeler veri setine kaydedilmesi için Python programlama dilinde hazırlanmış olan kod ile toplanan verilere ait görsel verilmiştir.

yukseklık	drone_hızı	ruzgar_hızı	alınan_yol	
0	6	1	-2.85	0.98
1	6	2	-2.56	2.05
2	6	3	-4.26	3.25
3	6	4	-5.20	4.12
4	6	5	1.50	5.14
5	6	6	1.20	6.45
6	8	1	3.89	1.30
7	8	2	3.40	2.38
8	8	3	3.50	3.62
9	8	4	-5.00	4.65

Şekil 6. İHA'nın uçuşu esnasında toplanmış olan çevresel faktörlere ait veriler

Atış veri seti oluşturulduktan sonra makine öğrenme modellerinde en optimum sonuca ulaşmak için XGB Boost, Random Forest ve Pycaret ile model eğitimleri yapılmıştır. Makine öğrenmesi algoritmalarının eğitiminde veri setinde bulunan yükseklik, İHA hızı ve rüzgâr hızı parametreleri giriş verisi olarak alınan yol ise çıkış parametresi olarak belirlenmiştir. Makine öğrenme algoritmalarında veri setinde bulunan 380 adet verinin %80 eğitim için %20'si ise test verisi olacak şekilde ayrılarak modellerin eğitimi

gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Pycaret kütüphanesi kullanılarak 11 adet regresyon algoritması aynı anda eğitilmiştir.

İnsansız hava aracının yangın olan bölgeyi yapay zekâ ile tespit edebilmesi için İHA'nın ön bölgesinde bulunan kamera kullanılmaktadır. Yer istasyonuna sürekli olarak bir veri akışı sağlanmıştır ve kameradan gelen görüntüler yer istasyonunda bulunan bilgisayar ile gerçek zamanlı olarak analiz edilmektedir. Yer istasyonunda bulunan bilgisayarda, alev ve duman görüntüleri derin öğrenme modeli ile işlenerek görüntüler üzerinde bir yangın durumu olup olmadığı belirlenmektedir. Derin öğrenme modeli gelen görüntüler üzerinde yangın durumunun tespit etmesi durumunda, yer istasyonu üzerinde bulunan radyo verici ile insansız hava aracını kontrol etmektedir. Daha önce eğitimleri tamamlanan ve yüksek başarı elde edilen makine öğrenmesi algoritması ile yangın alanına yaklaşarak yangın söndürme topunun bırakılması gereken nokta belirlenmektedir. İnsansız hava aracının alt bölgesindeki haznede bulunan yangın söndürme topu otomatik olarak bırakılarak yangın söndürme işlemi gerçekleştirilmiştir.

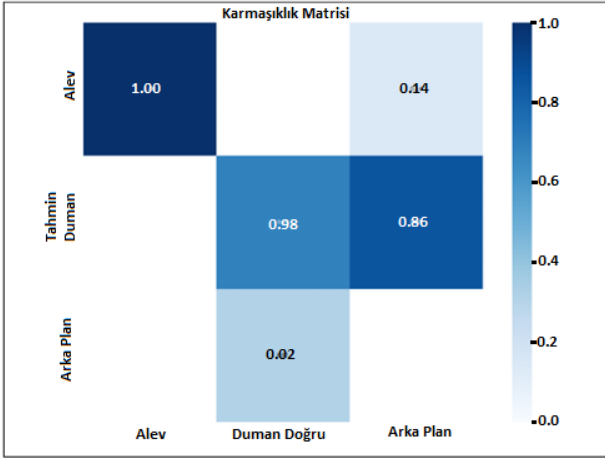
3. Bulgular

Bu bölümde çalışmada kullanılan mimarilerin karşılaştırması ve sonuçları verilmiştir.

3.1. Alev ve duman tespiti uygulama sonuçları

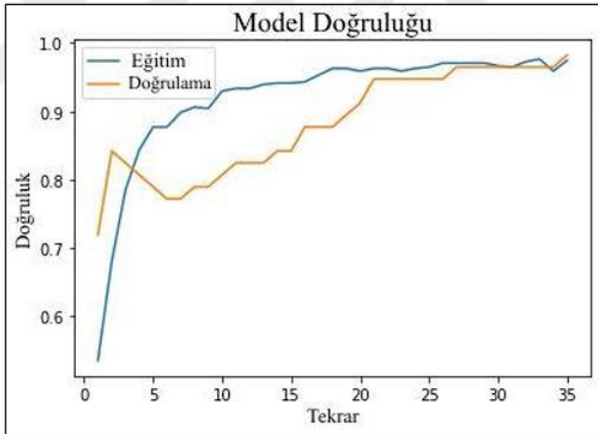
Çalışmada alev ve duman tespiti için katman tasarımları ile özgün yerli ve milli bir derin öğrenme mimarisi geliştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen derin öğrenme mimarisinden elde edilen sonuçlar ile FireNet ve UFS-Net mimarilerinden elde edilen doğruluk değerleri karşılaştırılmıştır.

Geliştirilen derin öğrenme mimarisine ait karmaşıklık matrisi Şekil 7'de verilmiştir. Mimariden elde edilen sonuçlara göre yangındaki alevli kısımların tahmininde %100 başarı oranı elde edilmiştir. Görüntülerdeki dumanlı kısımların tespit edilmesinde ise mimari %98 doğruluk oranında sonuçlar elde edilmiştir. Karmaşıklık matrisi incelendiğinde duman olarak tespit edilmesi gereken bölgelerden %2'sinin arka plan olarak tespit edildiği görülmektedir. Bu durum hava şartlarının ve ışık değişimlerinin görüntüde parazite neden olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. Çalışmaya özgü geliştirilen derin öğrenme mimarisinin karmaşıklık matrisi

Şekil 8'de derin öğrenme modeline ait eğitim doğrulama ve model doğruluğuna ait grafikler gösterilmiştir.



Şekil 8. Çalışmaya özgü geliştirilen derin öğrenme modeline ait doğruluk grafiği

Şekil 8 incelendiğinde model doğruluğunun ilk beş eğitim esnasında hızlı bir artış ve ardından düştüğü görülmektedir. Bunun temel nedeni veri setlerinde Eğitilen verilerde oluşan veri kayıplarından olabileceği tahmin edilmektedir. Şekil 8'deki grafik incelendiğinde geliştirilen ESA modelinin 35 eğitiminden sonra neredeyse hiç değişmediği görülmektedir. Bu nedenle çalışmada kullanılan veri setlerindeki görüntüler için 35 eğitimden sonra eğitime devam edilmemiştir.

3.1.1. FireNet mimarisi ile geliştirilen mimarinin karşılaştırması

Çalışma kapsamında toplanan veri seti geliştirilen mimari ile eğitilerek yeni bir mimari oluşturulmuş ve literatürde bulunan farklı bir mimari ile karşılaştırılmıştır. FireNet mimarisi ile yapılan karşılaştırma sonucunda geliştirilen mimaride daha yüksek doğruluk skoru ile alev ve duman tespiti yapılabildiği gözlemlenmiştir. Karşılaştırma sonucunda FireNet mimarisinin alev ve duman tespitinde elde ettiği doğruluk skoru %93.91 iken

gerçekleştirilen çalışmada ise modelin doğruluk skoru %98.21 olarak elde edilmiştir. FireNet ve geliştirilen mimariye ait performans değerlendirme metriklerine ait sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Fire-Net derin öğrenme mimarisi ile çalışmaya özgü geliştirilen mimarinin karşılaştırılması

Değerlendirme Kriterleri	FireNet (%)	Geliştirilen Mimari (%)	
Doğruluk	93.91	98.21	
Yanlış Pozitif	1.95	Alev	Duman
		0	1
Yanlış Negatif	4.13	0	1
Geri Çağırma	94	100	98
Keskinlik	97	100	98
F-Skor	95	100	98

3.1.2. Çalışmada geliştirilen mimari ile UFS-Net mimarisinin karşılaştırması

Çalışmaya özel geliştirilen mimari ile UFS-Net mimarisi ile yapılan eğitim sonucu karşılaştırıldığında geliştirilen mimaride daha yüksek doğruluk skoru ile alev ve duman tespiti yapılabildiği gözlemlenmiştir. Karşılaştırma sonucunda UFS-Net mimarisinin alev ve duman tespitinde elde ettiği doğruluk skoru %93.63 iken çalışma için geliştirilen modelin doğruluk skoru %98.21 olarak elde edilmiştir. UFS Net ve geliştirilen mimariye ait performans değerlendirme metriklerine göre karşılaştırmalar Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. UFS-Net derin öğrenme mimarisi ile çalışmaya özgü geliştirilen mimarinin karşılaştırılması

Değerlendirme Kriterleri	UFS-Net (%)	Geliştirilen Mimari	
Doğruluk	93.63	%98.21	
Yanlış Pozitif	0	Alev	Duman
		0	1
Yanlış Negatif	6.96	0	1
Geri Çağırma	93	100	98
Keskinlik	100	100	98
F-Skor	96.39	100	98

3.2. Random forest algoritmasından elde edilen sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışma doğrultusunda yatay atış işlemini gerçekleştirmek için toplanan veri seti random forest algoritması ile eğitilmiştir. Algoritma sonucunda tahmin edilen verilerin performans değerlendirme metriklerinden R^2 (R-squared) 0.97 doğruluk oranı, mutlak hata (Mean Absolute Error MAE) ise 0.33 ve Ortalama kare hatası (Mean Square Error MSE) değeri ise 0.1640 olarak elde edilmiştir. Algoritmaya ait performans değerlendirme sonuçları Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Random Forest Algoritmasının performans değerlendirme metriklerine göre sonuçları

	MAE	MSE	R^2
Random Forest	0.3306	0.1640	0.9741

3.3. XGB boost algoritmasından elde edilen sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışma doğrultusunda yatay atış işlemini gerçekleştirmek için kullanılan ikinci makine öğrenme algoritması olan XGB Boost ile eğitilmiştir. Algoritma sonucunda elde edilen sonuçlar R^2 performans değerlendirme metriğine göre 0.99, MAE değeri ise 0.1127 ve MSE değeri de 0.0241 elde edilerek başarılı bir sonuç alındığı gözlemlenmiştir. Algoritmaya ait skorlar Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. XGB Boost Algoritmasının performans değerlendirme metriklerine göre sonuçları

	MAE	MSE	R^2
XGB Boost	0.1127	0.0241	0.9999

3.4. Pycaret algoritmasından elde edilen sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışma doğrultusunda yatay atış işlemi için yukarıda belirtilen algoritmaların dışında Pycaret algoritması eğitim işlemi gerçekleştirilmiştir. Pycaret algoritmasından elde edilen sonuçların MAE, MSE ve R^2 performans değerlendirme metriklerine göre sonuçları çizelge 6'da verilmiştir.

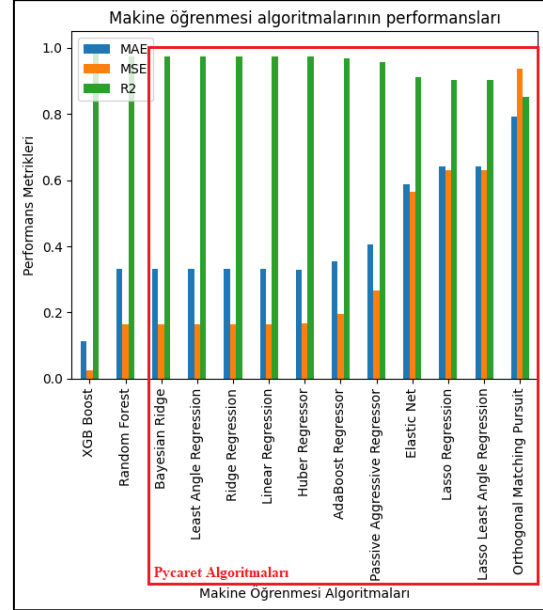
Çizelge 6. Pycaretoost Algoritmasının performans değerlendirme metriklerine göre sonuçları

	MAE	MSE	R^2
Bayesian Ridge	0.3305	0.164	0.9741
Least Angle Regression	0.3306	0.164	0.9741
Ridge Regression	0.3305	0.164	0.9741
Linear Regression	0.3306	0.164	0.9741
Huber Regressor	0.3275	0.1673	0.9736
AdaBoost Regressor	0.3538	0.195	0.9694
Passive Aggressive Regressor	0.4049	0.267	0.9557
Elastic Net	0.5874	0.5642	0.912
Lasso Regression	0.641	0.6309	0.9015
Lasso Least Angle Regression	0.6411	0.6309	0.9015

Orthogonal Matching Pursuit	0.7921	0.9367	0.8525
------------------------------------	--------	--------	--------

Şekil 9'da yatay atış işlemi için İHA hızı, rüzgâr hızı ve yükseklik çevresel parametrelerinin alınan yola etkisini belirlemek için tüm algoritmalara ait karşılaştırma grafiği verilmiştir.

Şekil 9 incelendiğinde XGB Boost algoritmasının çevresel parametrelerinin alınan yola etkisini en iyi modelleyen algoritma olduğu belirlenmiştir.



Şekil 9. Çevresel değişkenler için kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarına ait performans grafiği

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışma ile ilgili literatür kapsamlı olarak araştırılmıştır. Literatürde orman yangınlarında kullanılan görüntü işleme, yapay zekâ ve İHA sistemleri konusunda gerçekleştirilen çalışmalar analiz edilmiştir. Akademik çalışmalar incelendiğinde İHA sistemlerinin var olan problemler ve bunların çözüm yöntemlerinin nasıl geliştirildiği üzerinde durulmuştur.

Aksoy vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada insansız hava aracı ile görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleri kullanarak yangın tespiti yapabilecek bir sistem tasarlamışlardır. Çalışmada toplanan görüntülerden anlık olarak ateş tespiti yapılarak yangının ortaya çıktığı konum belirlenmektedir. Görüntülerden yangın tespitinin gerçekleştirilebilmesi için çalışmada Python programlama dili ile SqueezeNet modeli kullanılmıştır. Ayrıca görüntüler üzerinde gaussian filtreleme, eşikleme ve boyutlandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Modelin performans değerlendirme sonuçlarında 0.96 doğruluk, 0.98 duyarlılık, 0.89 özgüllük ve 0.96 kesinlik değerlerini elde etmişlerdir [21].

Kinaneva vd. (2020), çalışmalarında yangınla mücadelede geleneksel yöntemlerin tehlikeli ve maliyetli olmasına dikkat çekmişlerdir. Bu nedenle İHA kullanıma uygun, gerçek zamanlı otomatik duman algılamaya yönelik bir yapay zekâ yaklaşımı sunmuşlardır. Sundukları çalışmada Tensorflow kütüphanesinden faydalanarak Faster R-CNN modeli ile toplanan görüntülerin veri kümesiyle eğitimini gerçekleştirmişlerdir. Ardından model doğruluğunu test etmek için fotoğraf değerlendirme veri setindeki durağan görüntülerden duman algılama ve bir İHA kamerasından canlı video aktarımı kullanılarak duman algılama için bir sistem üzerinde çalışmışlardır. Otomatik duman algılama için sunulan yazılım platformu, yüksek düzeyde güvenilirlik sağlamış ve durağan görüntülerde ve canlı video aktarımlarında duman varlığını tespit etmişlerdir [22].

Khan vd. (2022), çalışmalarında erken orman yangını tespiti için otomatik gözetim tabanlı bir sistemin orman yangınlarını azaltabileceğini ifade etmişlerdir. Bu nedenle, sürekli olarak orman gözetimi yapabilecek ve yangın durumunu algılayacak yapay zekâ tabanlı bir İHA sistemi önermişlerdir. Sistemde DeepFire veri seti ile 1900 renkli yangın görüntüsü kullanılmıştır. Model olarak VGG19 tabanlı transfer öğrenme ile veri seti sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca makine öğrenmesi modellerinden, k-en yakın komşular, rastgele orman, naive bayes, destek vektör makinesi ve lojistik regresyon yapay zekâ modelleri ile sistem performanslarını analiz etmişlerdir. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen çalışmada, %95.7 kesinlik, %94.2 geri çağırma ile %95'lik ortalama doğruluk değerleri elde etmişlerdir [23].

Hossain vd. (2019), çalışmalarında yapay sinir ağı (YSA) kullanarak orman yangını ve duman tespiti gerçekleştiren yeni bir algoritma önermişlerdir. Kullanılan modelde ilk olarak görüntüleri 240x320 çözünürlüğe yeniden boyutlandırmışlardır. Yeniden boyutlandırılmış olan görüntü 16x16 bloklara bölünerek her bloktan özellik vektörleri oluşturmuşlardır. 300 bloğa ait her özellik vektörü YSA'dan geçirilerek görüntünün yangın, duman ya da normal bir görüntü olup olmadığını tespit etmişlerdir. Model testlerinde görüntüde yangın duman veya her

ikisi olduğunda algoritmanın %100 algılama oranına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ancak sadece alevin olduğu görüntüler için doğruluk %89, sadece dumanın bulunduğu görüntüler için doğruluk %80.7 ve normal görüntüler için %87.4 doğruluk değeri elde etmişlerdir [19].

Yanık vd. (2021), çalışmalarında görüntü işleme ve nesne algılama sensörü ile donatılmış insansız hava aracı kullanılarak orman yangınlarının tespiti üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Örnek yangın görüntüleri toplayarak bir veri seti hazırlamışlardır. Geliştirmiş oldukları sistemde kontrol kartı olarak raspberry pi kartı kullanmışlar ve farklı makine öğrenmesi algoritmalarıyla eğitilerek sonuçlar test etmişlerdir. Dört adet model arasından en iyi sonucu veren model çalışmada kullanılmıştır [24].

Bushnaq vd. (2021), yaptıkları çalışmada orman yangınlarını tespit etmek için ormanlara yerleştirilen nesnelere interneti (Internet of Things IoT) tabanlı sensörler ile anlık olarak veri toplamışlardır. Toplanan verileri ayrık zamanlı markov zinciri yöntemi ile analiz ederek orman yangını olma ihtimalini tespit etmişler ve yangın olabilecek bölgeye İHA göndererek gerçek zamanlı görüntü işleme ile orman yangını olup olmadığını kontrol etmişlerdir [25].

Yukarıda verilen akademik çalışmalara ait özet bilgiler Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Yangın sınıflandırma çalışmalarının karşılaştırılması.

Makale	Kullanılan Modeller	Tahmin Edilen Sınıf	Doğruluk (%)
Aksoy vd. (2021)	SqueezeNet	Alev	0.96
Kinaneva vd. (2020)	Faster R-CNN	Duman	0.99
Khan vd. (2022)	KNN	Alev	0.86
	RF		0.88
	LR		0.90
	SWM		0.91

	NB		0.79
Hossain vd. (2019)	YSA	Alev	0.89
		Duman	0.80
Yanık vd. (2021)	MobileNet	Duman	0.98
Bushnaq vd. (2021)	Çalışmada sadece sensör verileri kullanılarak tespit gerçekleştirilmiştir.		

Orman yangınları, tüm dünyada canlı yaşamı tehdit eden doğal afetlerin başında gelmektedir. Yalnızca hayvan ve bitki çeşitliliğinde ciddi kayıplara neden olabilecek doğal alanların yanında maddi manevi kayıplara da yol açmaktadır. Aynı zamanda orman yangınları çoğu zaman yerleşim alanlarına ve bu yerleşim alanlarında yaşayan insanlara sağlık başta olmak üzere birçok zarara neden olmaktadır. Diğer yandan, orman yangınları ciddi miktarda sera gazı salınımına neden olmakta ve bu sebeple küresel ısınmanın da temel faktörlerinden biri olmaktadır. Yukarıda verilen temel nedenlerden dolayı devletler yangın önlemede, erken teşhis ve hızlı müdahale için yöntemler geliştirmek için büyük çabalar sarfetmektedirler.

Bu yetersizlikten hareketle yapılan çalışmada bir İHA tasarımı geliştirilmiştir. Öncelikle İHA tasarımı için gerekli bileşenler hesaplanmış ve sistem kurulumu yapılmıştır. Test uçuşları yapılan İHA'nın kalibrasyon ayarları yapıldıktan sonra atış için gerekli olan mekanizma tasarımına geçilmiştir. İHA'nın alt kısmında oluşturulan top tutma ve bırakma mekanizması deneyleri yapılarak veri setlerinin toplanması adımına geçilmiştir. Güvenli bir ortamda oluşturulan yangınların görüntüleri toplanarak özgün bir veri seti oluşturulmuştur. Veri seti oluşturulan mimari ile eğitilerek literatürde var olan modeller ile karşılaştırılmış ve yüksek performans ile çalıştığı tespit edilmiştir. Duman ve yangın tespitinin ayrı ayrı yapılabildiği bir mimari yangına erken müdahale açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle yangının başlangıç anında dahi müdahale edebilme kabiliyetine sahip bir model tasarlanmıştır.

İkinci aşamada ise yatay atış için gerekli veri seti hazırlanmıştır. Bu veri setinde İHA hızı, İHA yüksekliği ve anlık rüzgâr hızları ölçülerek farklı değerlerde atışlar yapılmıştır. Yapılan atışlarda İHA'nın topu bıraktığı nokta ile topun düştüğü nokta arası ölçülerek kaydedilmiştir. Farklı modellerde eğitilen bu veri setinin en yüksek skorla çalıştığı XGB Boost algoritması gerçek zamanlı olarak kullanılmak üzere İHA sistemine entegre edilmiştir. Son olarak İHA test atışları yapılarak yangına müdahale edebilme durumu incelenmiştir. Atışlar sonucunda İHA'nın hedefi tutturma oranının yüksek olduğu görülmüştür.

Gelecekte gerçekleştirilecek olan akademik çalışmalarda veri seti daha da genişletilerek farklı derin öğrenme algoritmaları kullanımı ile duman algılamada mesafe kaynaklı doğruluk problemlerinin en aza indirgenmesi planlanmaktadır.

Yazar Katkısı

Bu makale Mehmet YÜCEL'in Bekir AKSOY'un birinci danışmanlığında hazırlanmış olduğu yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Alsammak, I. L. H., Mahmoud, M. A., Aris, H., Alkilabi, M., & Mahdi, M. N. (2022). The use of swarms of unmanned aerial vehicles in mitigating area coverage challenges of forest-fire-extinguishing activities: a systematic literature review. *Forests*, 13(5), 811, 1-31.
- [2] Avcı, M., ve Korkmaz, M. (2021). Türkiye'de orman yangını sorunu: Güncel bazı konular üzerine değerlendirmeler. *Turkish Journal of Forestry*, 22(3), 229-240.
- [3] Torul, M. O. L. (1993). Orman yangınları. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 43(3-4), 69-78.
- [4] Caton, O., Markoski, A., Osterloh, E., & Tallan, J. 2019. Exploring the Potential for Drone Use in Firefighting: Addressing Forest Fires in Albania. https://web.cs.wpi.edu/~rek/Projects/EXINN_Proposal.pdf (Erişim tarihi: 17 Ocak 2023).
- [5] Roldán-Gómez, J. J., González-Gironda, E., ve Barrientos, A. (2021). A survey on robotic technologies for forest firefighting: applying drone swarms to improve firefighters' efficiency and safety. *Applied Sciences*, 11(1), 363, 1-18.
- [6] Akgül, A. S., ve Hacıoğlu, A. (2010). Gözetleme/saldırı amaçlı mini insansız hava aracı tasarımı ve üretimi. *Journal of Aeronautics & Space Technologies/Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 4(3), 1-6.
- [7] Öztürk, K., & Şahin, M. E. (2018). Yapay sinir ağları ve yapay zekâ'ya genel bir bakış. *Takvim-i Vekayi*, 6(2), 25-36.

- [8] Bolat, T. 2022. Çelik Kalıplarda Görüntü İşleme Yöntemi İle Hasar Analizi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 53s, İstanbul.
- [9] Ertuğrul, M. (2005). Orman yangınlarının dünyadaki ve Türkiye'deki durumu. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 7(7), 43-50.
- [10] Innocente, M. S., & Grasso, P. 2019. Self-organising swarms of firefighting drones: Harnessing the power of collective intelligence in decentralised multi-robot systems. *Journal of Computational Science*, 34, 80-101.
- [11] Carmona, P., Climent, F., & Momparler, A. (2019). Predicting failure in the U.S. banking sector: An extreme gradient boosting approach. *International Review of Economics & Finance*, 61, 304-323.
- [12] Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 29(5), 1189-1232.
- [13] Chen, T., & Guestrin, C. 2016. Xgboost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd Acm Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. August 13-17, California, 785-794.
- [14] Yeşilyurt, S., & Dalkılıç, H. 2021. Xgboost ve Gradient Boost Machine ile Günlük Nehir Akımı Tahmini. 3rd International Symposium of III Engineering Applications on Civil Engineering and Earth Sciences. September 22-24, Karabük, 1-9.
- [15] Büyükkör, Y. (2022). 21. In Xgboost Makine Öğrenmesi Yöntemi Kullanılarak Ham Petrol Fiyatının Tahminlenmesi. SS 219-238. *Yüzyılda İktisadı Anlamak: güncel ekonometrik zaman serileri çalışmaları*. Gazi Kitabevi, Ankara.
- [16] Ercire, M., & Ünsal, A. 2021. Kısa süreli güç kalitesi bozulmalarının dalgacık analizi ve rastgele orman yöntemi ile sınıflandırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 903-920.
- [17] Arat, M. M. (2022). PyCaret ve Flask ile arkaplanında bir makine öğrenmesi modeli bulunan bir web uygulaması oluşturmak. https://mmuratarat.github.io/turkish/2022-01-12/webapp_with_PyCaret_and_Flask#:~:text=PyCaret%2C%20Python'da%20makine%20%2C%20B6%2C%20Frenmesi,%20B6%2C%20Frenmesi%20ve%20model%20y%20%B6netimi%20arac%20B1d%20B1r. (Erişim tarihi: 27 Haziran 2023).
- [18] Sayın, H., Salman, O. K. M., Aksoy, B., ve Köse, U. 2020. EKG Sinyallerini kullanarak Kalp Ritimlerinin Yapay Zekâ ile Sınıflandırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(1), 7-15.
- [19] Hossain, F. A., Zhang, Y., Yuan, C., ve Su, C. Y. (2019) Wildfire Flame and Smoke Detection Using Static İmage Features and Artificial Neural Network. 2019 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence. September 30, China, 1-6.
- [20] Seydi, S. T., Saeidi, V., Kalantar, B., Ueda, N., & Halin, A. A. 2022. Fire-Net: A Deep Learning Framework for Active Forest Fire Detection. *Journal of Sensors*, 2022(1), 8044390, 1-13.
- [21] Aksoy, B., Korucu, K., Çalışkan, Ö., Osmanbey, Ş., & Halis, H. D. (2021). İnsansız hava aracı ile görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleri kullanılarak yangın tespiti: örnek bir uygulama. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(6), 112-122.
- [22] Kinaneva, D., Hristov, G., Georgiev, G., Kyuchukov, P., & Zahariev, P. 2020. An Artificial Intelligence Approach to Real-Time Automatic Smoke Detection by Unmanned Aerial Vehicles and Forest Observation Systems. 2020 International Conference on Biomedical Innovations and Applications (BIA). 04 November, Bulgaria, 133-138.
- [23] Khan, A., Hassan, B., Khan, S., Ahmed, R., & Abuassba, A. (2022). DeepFire: a novel dataset and deep transfer learning benchmark for forest fire detection. *Hindawi Mobile Information Systems*, 2022, 1-14.
- [24] Yanık, A., Yanık, M., Güzel, M. S., & Bostancı, G. E. 2022. In Machine Learning-Based Early Fire Detection System Using A Low-Cost Drone, *Advanced sensing in image processing and IoT*. Gupta, R., Rana, A.K., Dhawan, S., Cengiz, K. ed. CRC Press, India, 365s.
- [25] Bushnaq, O. M., Chaaban, A., & Al-Naffouri, T. Y. 2021. The role of UAV-IoT networks in future wildfire detection. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(23), 16984-16999.

Investigation of Simple Shape Descriptors for NACA 4 Digit Airfoils

Haydar TUNA^{1*}, Ozcan YIRTICI²

^{1,2}Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 80000, Osmaniye, Türkiye

(Alınış / Received: 19.10.2024, Kabul / Accepted: 14.12.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Keywords

Shape representation,
Image processing,
Airfoil

Abstract: This study aims to define new simple shape descriptors to analyze airfoils. The ImageJ platform is used to calculate twelve different shape descriptors such as area, convex hull, contour temperature and solidity by performing image processing. One of the most important findings is that an increase in the thickness of an airfoil leads to corresponding increases in its area, perimeter, area of minimum enclosing area, and convex hull area. Another noteworthy discovery is that the values derived from these basic features, either increasing or decreasing. Simple shape features in the study are not used independently, as they do not possess distinct characteristics that set them apart from one another. Machine learning and deep learning applications can achieve greater success when these features are combined with other elements. The combination of these features with other shape attributes, such as chain code histograms, shape signatures, and central moments, can enhance the success of machine learning and deep learning applications.

NACA 4 Kanat Profillerinin Basit Şekil Temsil Yöntemleriyle İncelenmesi

Anahtar Kelimeler

Şekil temsili,
Görüntü işleme,
Kanat profili

Öz: Bu çalışma, kanat profillerini analiz etmek için yeni basit şekil belirteçlerini tanımlamayı amaçlamaktadır. ImageJ platformu, görüntü işleme gerçekleştirerek alan, dışbükey gövde, kontur sıcaklığı ve katılık gibi on iki farklı şekil tanımlayıcısını hesaplamak için kullanılır. En önemli bulgulardan biri, bir kanat profilinin kalınlığındaki artışın, alanında, çevresinde, minimum çevreleyen alan alanında ve dışbükey gövde alanında karşılık gelen artışlara yol açmasıdır. Dikkat çekici bir diğer keşif ise, bu temel özelliklerden türetilen değerlerin artması veya azalmasıdır. Çalışmada basit şekil özellikleri, onları birbirinden ayıran belirgin özelliklere sahip olmadıkları için bağımsız olarak kullanılmamaktadır. Makine öğrenimi ve derin öğrenme uygulamaları, bu özellikler diğer öğelerle birleştirildiğinde daha büyük başarı elde edebilir. Bu özelliklerin zincir kod histogramları, şekil imzaları ve merkezi momentler gibi diğer şekil nitelikleriyle birleştirilmesi, makine öğrenimi ve derin öğrenme uygulamalarının başarısını artırabilir.

1. Introduction

Aerodynamic design and optimization is still an important research area in Aerospace and Wind energy. Recently, artificial Intelligence has been used to predict aerodynamic loads at the conceptual design stage [1-3]. For this purpose, airfoil shape descriptors with a prediction methodology and sufficiently large aerodynamic dataset are required.

An airfoil is a closed defining shape for the wings and turbine blades to create a lift force. The thickness,

camber, curvature, and leading-edge radius have been investigated as shape descriptors that affect aerodynamic loads (lift, drag, and pitching moment) [4-6]. In recent studies, various machine learning methods have been employed to predict drag and lift coefficients. For example, artificial neural networks have been used to calculate these variables [7]. Zhang et al. applied Convolutional Neural Networks to transform airfoil shape images into discrete, ordered vector representations. These representations were subsequently utilized to train models for predicting

*Corresponding Author: haydartuna@osmaniye.edu.tr

aerodynamic parameters, including drag and lift coefficients [8].

There have not been extensive investigations on the use of simple shape descriptors for analyzing airfoils. This study aims to address this gap by assessing nine distinct shape descriptors on a dataset consisting of 120 airfoils across 20 families, each comprising six airfoils.

2. Simple Shape Descriptors

Simple shape descriptors or scalar values are commonly used to describe the geometric characteristics of shapes. The quantitative characteristics provided by these descriptors facilitate analysis and comparison. Although these descriptors may be useful in certain contexts, they are not sufficient for definitive shape characterization. These techniques are often augmented with other methods to increase their effectiveness [9]. Various descriptors, such as area, perimeter, minimum enclosed rectangular area, extent, and circularity, are typical examples of these descriptors.

2.1. Area

The most direct method for quantifying the area of an object is to enumerate the number of pixels that constitute a given shape. In a binary image, where pixels denoted as $\text{pix}(x,y)=1$ represent shape elements, and $\text{pix}(x,y)=0$ indicates background elements, the subsequent algorithm can be employed to approximate the area of an object.

Algorithm 1: Area Estimation of a Shape

```

1: area ← 0;
2: for x ← 0 to M-1 do
3:   for y ← 0 to N-1 do
4:     area ← area + pix(x, y);
```

where *M* and *N* denote the number of rows and columns, respectively. Furthermore, *x* represents the row index, and *y* represents the column index. This algorithm can be used to calculate the areas of the airfoils that have been scaled and converted into black-white images. For example, Figure 1 shows the areas of some 12XX family NACA airfoils. In this section, we select airfoils from the NACA-12XX family with 1000 points.

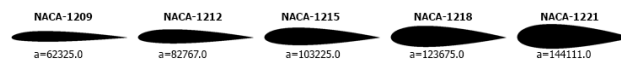


Figure 1. NACA-12XX family airfoils and their areas

2.2. Perimeter

Measurement of the perimeter of a shape involves calculating the distance between consecutive points on its contour. A viable solution to this problem is to

approximate the arc length using contour-based representation. This can be achieved by estimating the length of the arc based on the 4-neighborhood (FR4) and 8-neighborhood chain codes (FR8) used to represent the contour [10-11], as illustrated in Figure 2a and 2b.



Figure 2. Direction number of chain codes for a)FR4 b)FR8

The diagonal arc length was not considered when employing the FR4 chain code to determine perimeter. Thus, the FR4 chain code is unsuitable for calculating the perimeter. By contrast, when the FR8 chain code is employed to represent the contour, the arc length can be estimated as follows[12]:

$$p = n_e + n_o\sqrt{2} \tag{1}$$

where n_e represents the number of consecutive contour points with even direction codes, and n_o represents the number of odd-direction codes. Using this formula, the NACA-12XX family of airfoils and their corresponding perimeters were calculated, as shown in Figure 3.

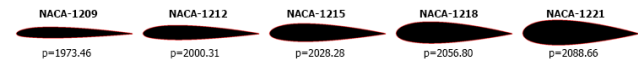


Figure 3. NACA-12XX family airfoils and their perimeters

2.3. Area-to-Perimeter ratio

The area-to-perimeter ratio is another fundamental shape descriptor, and its value is calculated using Equation 2 [9]. Figure 4 illustrates the area-to-perimeter ratio of sample airfoils from the NACA-12XX family.

$$\text{apr} = \frac{a_s}{p_s} \tag{2}$$

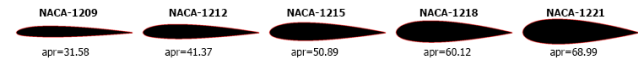


Figure 4. NACA-12XX family airfoils and area-to-perimeter ratios

2.4. Area of minimum enclosing rectangle

The area of the minimum enclosing rectangle (AMER) is defined as a rectangle whose sides lie on the *x-y* plane and enclose the shape with the least possible area. The use of a rotating caliper algorithm is recommended for determining the AMER. The same approach can be employed to identify the minimum perimeter enclosing a rectangle [13-15]. However, because the airfoils are parallel to the *xy*-plane and are not rotated, the following bounding box algorithm can be applied to determine the AMER:

Algorithm 2: Finding MER for Airfoil with bounding box algorithm

```

1:  xMin = M
2:  xMax = 0
3:  yMin = N
4:  yMax = 0
5:  for x ← 0 to M-1 do
6:    for y ← 0 to N-1 do
7:      if p(x,y)=1 and x < xMin then
8:        xMin = x
9:
10:     if p(x,y)=1 and x > xMax then
11:       xMax = x
12:
13:     if p(x,y)=1 and y < yMin then
14:       yMin = y
15:
16:     if p(x,y)=1 and y > yMax then
17:       yMax = y

```

where M is the width, and N is the height of the picture. $xMin$ and $xMax$ are the minimum and maximum x -coordinates on the shape. Similarly, $yMin$ and $yMax$ are the minimum and maximum y -coordinates, respectively, of the shape. Using this algorithm, the upper-left coordinates of the rectangle are determined as $(xMin, yMin)$ and the bottom-right coordinates of the rectangle are determined as $(xMax, yMax)$. The calculation of the area of a rectangle results in a specific value that can be expressed by the following equation:

$$amer = (xMax - xMin) * (yMax - yMin) \quad (3)$$

The AMER of the NACA-12XX family airfoils and their corresponding amer areas, as determined by the equation outlined in (3), are illustrated in Figure 5.

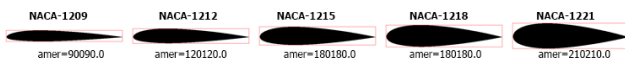


Figure 5. NACA-12XX family airfoils and their AMER areas

2.5. Aspect ratio

The aspect ratio (asr) is a geometric characteristic that can be determined by calculating the ratio of the longer side to the shorter side of the minimum enclosing rectangle bounding the shape [12]. This value can be expressed as

$$asr = \frac{width_{AMER}}{height_{AMER}} \quad (4)$$

where $width_{AMER}$ and $height_{AMER}$ are used to determine the longest and shortest sides of the AMER, respectively. The asr values of the NACA-12XX family of airfoils are shown in Figure 6.

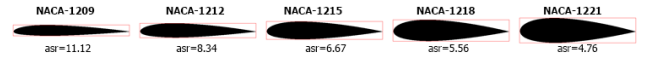


Figure 6. NACA-12XX family airfoils and their aspect ratios

2.6. Circularity

Circularity is a metric used to quantify the degree of roundness, and refers to how closely the shape of an object resembles a perfect circle from a mathematical perspective. This was used to depict the boundary complexity. Circular shapes possess the lowest circularity value of 1.0, and this value progressively increases for more complex shapes, and is computed as follows [16]:

$$cir = \frac{p_s^2}{4\pi a_s} \quad (5)$$

where the area and perimeter of the shape are denoted as a_s and p_s , respectively. Figure 8 presents a summary of the circularity characteristics of airfoils from the NACA-12XX family, calculated using Eq. (5).

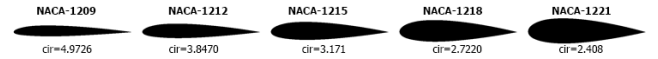


Figure 8. NACA-12XX family airfoils and their circularity values

2.7. Thinness ratio

The thinness ratio is one of the most important shape descriptors and the inverse of the circularity. Regular shapes generally had a higher ratio than irregular shapes. For instance, the maximum value of the thinness for a circle is 1.0. This ratio can be calculated as follows [9].

$$thin = \frac{4\pi a_s}{p_s^2} \quad (6)$$

where a_s and p_s are the perimeter and area of the shape, respectively. In addition, 4π is the normalizing factor. Figure 9 shows the NACA-12XX airfoils and their thinness, calculated using Eq. (6).

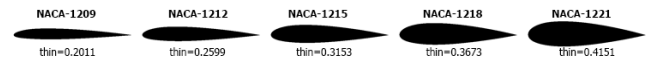


Figure 9. NACA-12XX family airfoils and their thinness values

2.8. Convex hull

The convex hull represents the smallest polygon that encompasses all the contour points of a given shape. [17-26]. In addition, this geometric feature is used to determine the boundaries of a given set of points. For example, the convex hulls of the NACA-55XX airfoils at 1000 points are shown in Figure 10.

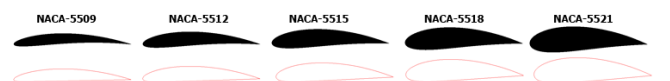


Figure 10. NACA-55XX family airfoils and their convex hulls

Notably, the convex hulls of certain airfoils from the NACA-12XX family follow their perimeters, as illustrated in Figure 11.

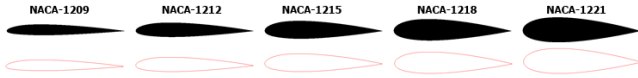


Figure 11. NACA-12XX family airfoils and their convex hulls

The significance of the perimeter and area of the convex hull lies in understanding the shapes. As a polygon, the convex hull has n vertices that are enumerated in counterclockwise order. These vertices have the coordinates $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$. The shoelace formula can be employed to determine the polygon area as follows [27]:

$$c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i \quad (7)$$

where c is the area of the convex hull and x_i and y_i are the coordinates of the vertices. The convex hull areas of the NACA-55XX and NACA-12XX family airfoils were calculated using Eq. (7), are shown in Figures 12a and 12b, respectively.

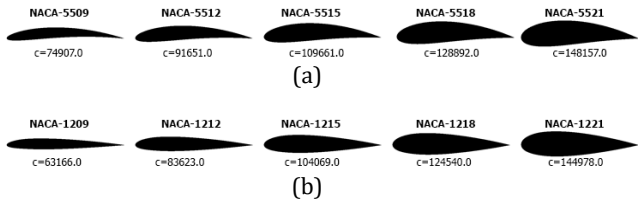


Figure 12. Areas of Convex Hull for a)NACA-55XX b)NACA-12XX

As illustrated in Figure 12b, the convex areas of the NACA-12XX airfoils are nearly equal to their areas of curvature. This is because the convex hull of each airfoil closely resembled its contour.

The calculation of the convex hull's perimeter involves summing the Euclidean distances between its vertices. A mathematical formula exists to determine this perimeter, which can be expressed as follows:

$$h = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (8)$$

where the perimeter of the convex hull is denoted by h and its vertex coordinates are represented by x_i and y_i , respectively. The perimeters of the convex hulls of the NACA-55XX and NACA-12XX airfoil families were determined using Eq. (8) are shown in Figures 13a and 13b, respectively.

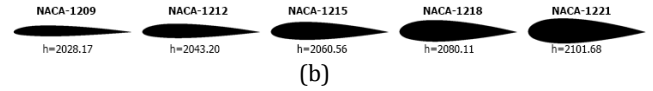
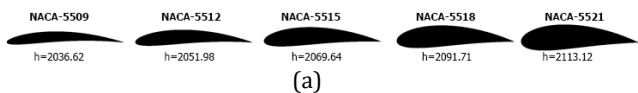


Figure 13. Perimeters of Convex Hull a)NACA-55XX b) NACA-12XX

The convex hull perimeters of the NACA-12XX family are almost identical to their perimeters, as shown in Figure 13b. This is due to the fact that the convex hull closely follows the contour of each airfoil.

2.9. Contour temperature

The concept of contour temperature is rooted in a well-established thermodynamic framework, as proposed by the authors who first introduced this concept [27]. According to their hypothesis, a strong correlation exists between the contour temperature and fractal dimension. This feature is defined as follows:

$$t = (\log_2(\frac{2p}{p-h}))^{-1} \quad (9)$$

where t is the contour temperature, p is the perimeter of the shape, and h is the perimeter of the convex hull. The airfoils of NACA-55XX and NACA-12XX are shown in Figure 15a and 15b, respectively.

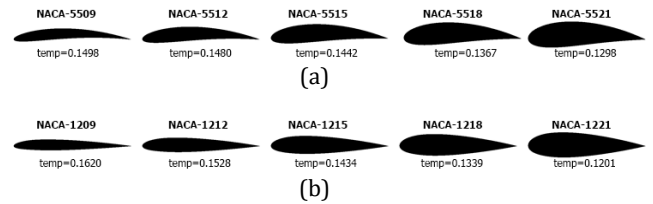


Figure 15. Contour Temperature of Airfoils a)NACA-55XX b) NACA-12XX

3. Airfoil dataset

To demonstrate the effectiveness of the methods presented, we evaluated 120 airfoils from four NACA families, as shown in Figure 17 (Appendix A). All airfoils had 1000 points and each NACA family member had 30 airfoils. In addition, the same suffix is used for airfoil families, such as 0K09, 2K12, 4K15, and 6K18, where $K=\{2,3,4,5,6,7\}$.

The ImageJ platform was used to calculate the simple shape descriptors. As open-source software for processing and analyzing scientific images, it offers a wide range of capabilities, including various extensions and related software projects.

4. Results and Discussion

Table 1 in Appendix B. presents a summary of the outcomes from the preliminary examination of the nine distinct shape characteristics using the airfoil dataset depicted in Figure 17.

The last two digits of an airfoil's designation signify the maximum thickness of the airfoil as a percentage of chord length. As these digits became larger, both the area and perimeter of the airfoil increased. As shown in Table 1, airfoils from all NACA families experienced an increase in both area and perimeter. In addition, the apr ratio increased in every NACA family member.

The dimensions of the minimum enclosing rectangle demonstrate a linear correlation with the enclosed area. As a result, enlargement of the shape area led to a corresponding increase in the size of the MER. The connection between the two variables was apparent from the increasing trend of the amr values, as shown in Table 1. As asr ratio of an airfoil is related to its width and height, it follows that the values of these dimensions increase with the thickness of the airfoil.

An inverse relationship was observed between circularity and thickness of the airfoils. The circularity and thinness values converged towards 1.0 as the airfoil thickness increased. Table 1 illustrates this phenomenon, demonstrating that for each airfoil, circularity approached 1.0 with increasing thickness, whereas thinness concurrently decreased, approaching 1.0.

As shown in Table 1, the area and perimeter of the convex hull exhibited a high degree of correlation with the area of the airfoil for symmetrical and near-symmetrical families, specifically 0YYY and 2YYY. However, for less symmetrical airfoils, the results obtained from the convex hull area and perimeter were less accurate, with greater discrepancies present in relation to the airfoil area and perimeter, such as 4YYY and 6YYY. In addition, the convex area and perimeter increased with the thickness ratio for all the airfoil families. Because not all airfoils were irregular in shape, the solidity values produced outcomes close to 1.0. Furthermore, the solidity slightly increased with increasing thickness. The temperature and thickness of the contour were found to be inversely proportional, with a decrease in temperature corresponding to an increase in thickness. Furthermore, the temperatures of the airfoils for the same suffix in a family were very similar, such as the NACA-0209 and NACA-0309 airfoils.

4.1. Correlation of shape descriptors with drag coefficient

In the configuration of the airfoil, parameters such as the maximum thickness, maximum camber, and leading-edge radius play a crucial role in the aerodynamic performance. For the NACA family, the effects of specific parameters on aircraft design were documented in Raymer's textbook [4]. Figure 16 shows that the drag coefficient increased proportionally with the thickness ratio. When the shape parameters were analyzed (Table 1) for the NACA 24XX family, it was observed that while the

aspect ratio (asr), circularity (circ), and temperature (t) were inversely related to the drag coefficient as the thickness increased, the other parameters were directly proportional to the drag coefficient.

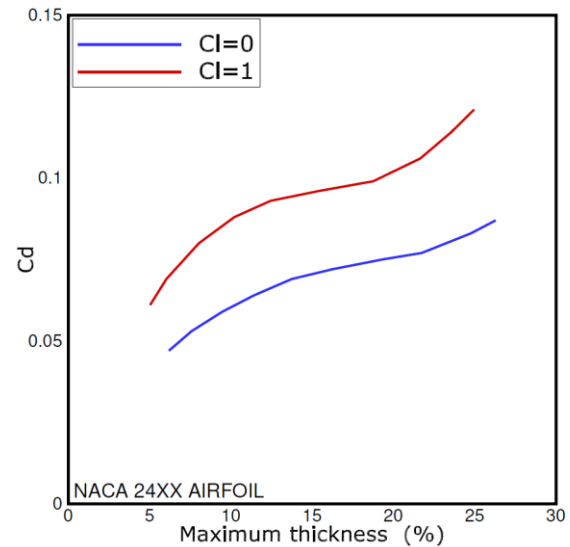


Figure 16. Effect of thickness on drag [4].

5. Conclusions

The primary objective of this study was to investigate the shape of airfoils by using simple shape descriptors. One of the most significant findings of this study is that an increase in the thickness of the airfoil results in a corresponding increase in its area, perimeter, AMER area, and convex hull area. Another significant observation is that the values derived from these basic features either increased or decreased. However, these shape properties are not utilized independently, because they do not possess unique attributes that distinguish them from one another. There is a correlation with aerodynamic design parameters, such as drag, for shape descriptors, and this correlation should be investigated in more detail. The combination of these features with other shape attributes, such as chain code histograms, shape signatures, and central moments, can enhance the success of machine learning and deep learning applications. For instance, these features can be utilized in aerodynamic applications to estimate aerodynamic loads, such as Cl and Cd.

Declaration of Ethical Code

In this study, we assume that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

References

- [1] Santos, M., Mattos, B., Girardi, R. 2008. Aerodynamic coefficient prediction of airfoils using neural networks. 46th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit. P.887.
- [2] Du, X., He, P., Martins, J.R. 2021. Rapid airfoil design optimization via neural networks-based parameterization and surrogate modeling. *Aerospace Science and Technology* 113.106701.
- [3] Chen, H., He, L., Qian W., Wang, S. 2020. Multiple aerodynamic coefficient prediction of airfoils using a convolutional neural network. *Symmetry*. 12(4) 544.
- [4] Raymer, D. 2012. Aircraft design: a conceptual approach. American institute of aeronautics and astronautics.
- [5] Birajdar, M.R., Kale, S.A. 2015. Effect of leading edge radius and blending distance from leading edge on the aerodynamic performance of small wind turbine blade airfoils. *International journal of energy and power engineering*. 4 (5-1)54-58.
- [6] Lim, J.W. 2018. Application of parametric airfoil design for rotor performance improvement. <https://dspaceerf.nlr.nl/server/api/core/bitstreams/d428da1f-ca7a-4baf-93090924a609721e/content> (Erişim Tarihi: 14.10.2024).
- [7] Santos, M., Mattos, B., & Girardi, R. 2008, January. Aerodynamic coefficient prediction of airfoils using neural networks. In *46th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit* (p. 887).
- [8] Zhang, Y., Sung, W. J., & Mavris, D. N. 2018. Application of convolutional neural network to predict airfoil lift coefficient. In *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conference* (p. 1903).
- [9] Da Fona Costa, F., Jr. Cesar, R.M. 2018. Shape classification and analysis: theory and practice. Crc Press.
- [10] Freeman, H. 1961. On the encoding of arbitrary geometric configurations. *IRE transactions on electronic computers*. (2) 260-268.
- [11] Gonzales, R., Woods, R. 2018. Digital image processing. Pearson.
- [12] Castleman, K. 1996. Digital image processing. Prentice Hall.
- [13] Freeman, H., Shapira R. 1975. Determining the minimum-area encasing rectangle for an arbitrary closed area curve. *Commun. ACM* 18 (7) 409-413.
- [14] Toussaint G.T. 1983. Solving geometric problems with rotating calipers. *Proc. IEEE Melecon*. Vol.83 p.A10.
- [15] Toussaint G.T. 2014. The rotating calipers: An efficient, multipurpose, computational tool. The international conference on computing technology and information management (ICCTIM). P215.
- [16] Merchant, F., Castleman, K. 2022. Microscope image processing. Academic press.
- [17] Chand, D.R., Kapur, S.S. 1970. An algorithm for convex polytopes. *Journal of the ACM (JACM)*. 17(1) 78-86.
- [18] Jarvis, R.A. 1973. On the identification of the convex hull of a finite set of points in the plane. *Information processing letters* 2(1) 18-21.
- [19] Graham, R.L. 1972. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set. *Info. Proc. Lett.* 1 132-133.
- [20] Eddy, W.F. 1977. A new convex hull algorithm for planar sets, *ACM transactions on mathematical software (TOMS)*. 3 (4) 398-403.
- [21] Bykat, A. 1978. Convex hull of a finite set of points in two dimensions. *Information processing letters*. 7(6) 296-298.
- [22] Preparata, F.P., Hong, S.J. 1977. Convex hulls of finite sets of points in two and three dimensions. *Communications of the ACM*. 20(2) 87-93.
- [23] Andrew, A.M. 1979. Another efficient algorithm for convex hulls in two dimensions. *Information processing letters*. 9(5) 216-219.
- [24] Kallay, M. 1984. The complexity of incremental convex hull algorithms in rd. *Information processing letters*. 19(4) 197.
- [25] Kirkpatrick, D.G., Seidel, R. 1986. The ultimate planar convex hull algorithm? . *SIAM journal on computing*. 15(1) 287-299.
- [26] Chan, T.M. 1996. Optimal output-sensitive convex hull algorithms in two and three dimensions. *Discrete & computational geometry*. 16(4) 361-368.
- [27] Dupain, Y., Kamae, T., Mendes, M. 1986. Can one measure the temperature of a curve?. *Archive for rotational mechanics and analysis*. 94 155-163.

Appendix A.

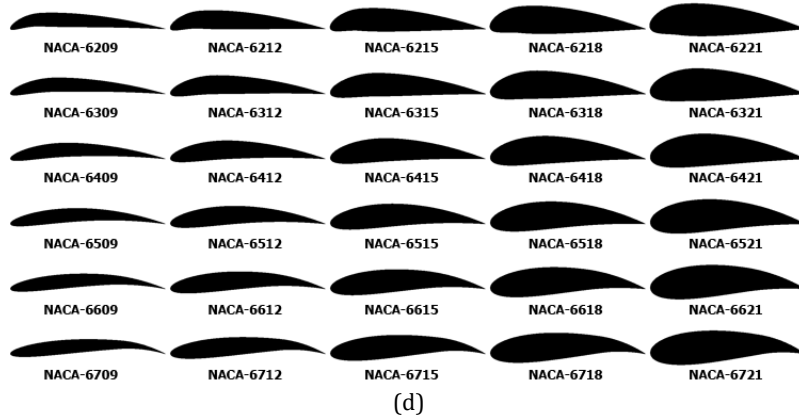
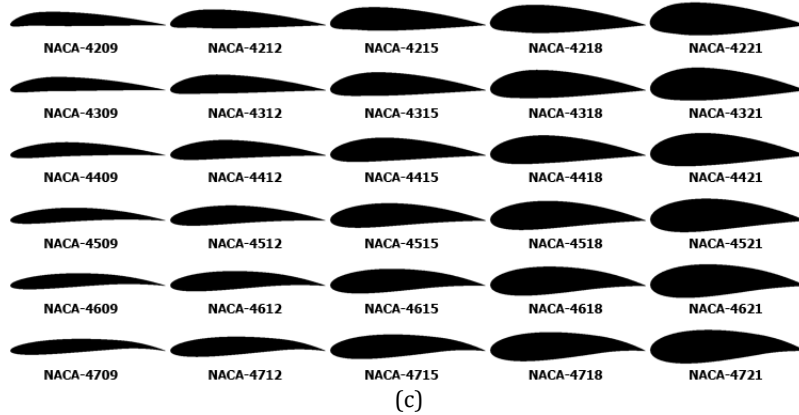
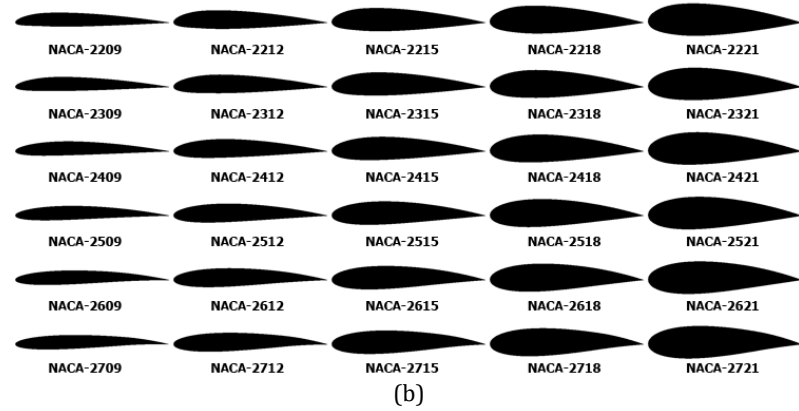
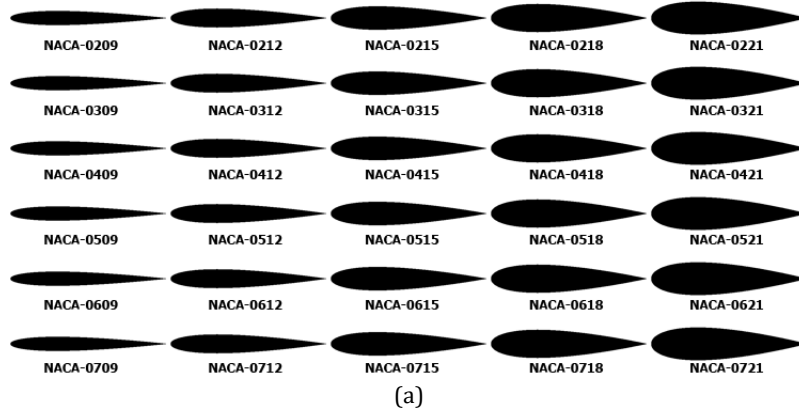


Figure 17. Airfoil Families a)NACA-0YYY b) NACA-2YYY c)NACA-4YYY d)NACA-6YYY

Appendix B.**Table 1.** Results for shape parameters of NACA-XXXX airfoils

Airfoils	a	p	apr	amer	asr	cir	Thin	c	t
NACA-0209	62273	1973,46	31,56	91000	10,9890	4,9768	0,2009	63203	0,1614
NACA-0212	82725	2000,32	41,36	121000	8,2645	3,8490	0,2598	83649	0,1520
NACA-0215	103159	2028,28	50,86	151000	6,6225	3,1735	0,3151	104076	0,1426
NACA-0218	123609	2056,25	60,11	181000	5,5249	2,7220	0,3674	124506	0,1337
NACA-0221	144055	2088,67	68,97	211000	4,7393	2,4099	0,4150	144960	0,1189
NACA-0309	62273	1973,46	31,56	91000	10,9890	4,9768	0,2009	63203	0,1614
NACA-0312	82725	2000,32	41,36	121000	8,2645	3,8490	0,2598	83649	0,1520
NACA-0315	103159	2028,28	50,86	151000	6,6225	3,1735	0,3151	104076	0,1426
NACA-0318	123609	2056,25	60,11	181000	5,5249	2,7220	0,3674	124506	0,1337
NACA-0321	144055	2088,67	68,97	211000	4,7393	2,4099	0,4150	144960	0,1189
NACA-0409	62273	1973,46	31,56	91000	10,9890	4,9768	0,2009	63203	0,1614
NACA-0412	82725	2000,32	41,36	121000	8,2645	3,8490	0,2598	83649	0,1520
NACA-0415	103159	2028,28	50,86	151000	6,6225	3,1735	0,3151	104076	0,1426
NACA-0418	123609	2056,25	60,11	181000	5,5249	2,7220	0,3674	124506	0,1337
NACA-0421	144055	2088,67	68,97	211000	4,7393	2,4099	0,4150	144960	0,1189
NACA-0509	62273	1973,46	31,56	91000	10,9890	4,9768	0,2009	63203	0,1614
NACA-0512	82725	2000,32	41,36	121000	8,2645	3,8490	0,2598	83649	0,1520
NACA-0515	103159	2028,28	50,86	151000	6,6225	3,1735	0,3151	104076	0,1426
NACA-0518	123609	2056,25	60,11	181000	5,5249	2,7220	0,3674	124506	0,1337
NACA-0521	144055	2088,67	68,97	211000	4,7393	2,4099	0,4150	144960	0,1189
NACA-0609	62273	1973,46	31,56	91000	10,9890	4,9768	0,2009	63203	0,1614
NACA-0612	82725	2000,32	41,36	121000	8,2645	3,8490	0,2598	83649	0,1520
NACA-0615	103159	2028,28	50,86	151000	6,6225	3,1735	0,3151	104076	0,1426
NACA-0618	123609	2056,25	60,11	181000	5,5249	2,7220	0,3674	124506	0,1337
NACA-0621	144055	2088,67	68,97	211000	4,7393	2,4099	0,4150	144960	0,1189
NACA-0709	62273	1973,46	31,56	91000	10,9890	4,9768	0,2009	63203	0,1614
NACA-0712	82725	2000,32	41,36	121000	8,2645	3,8490	0,2598	83649	0,1520
NACA-0715	103159	2028,28	50,86	151000	6,6225	3,1735	0,3151	104076	0,1426
NACA-0718	123609	2056,25	60,11	181000	5,5249	2,7220	0,3674	124506	0,1337
NACA-0721	144055	2088,67	68,97	211000	4,7393	2,4099	0,4150	144960	0,1189
NACA-2209	62410	1973,46	31,62	90090	11,1222	4,9658	0,2014	63265	0,1636
NACA-2212	82866	2000,32	41,43	120120	8,3417	3,8425	0,2602	83706	0,1544
NACA-2215	103329	2028,28	50,94	150150	6,6733	3,1683	0,3156	104180	0,1453
NACA-2218	123789	2057,92	60,15	180180	5,5611	2,7225	0,3673	124654	0,1351
NACA-2221	144245	2087,00	69,12	210210	4,7667	2,4029	0,4162	145107	0,1255
NACA-2309	62397	1973,69	31,61	91091	11,0000	4,9680	0,2013	63282	0,1629
NACA-2312	82810	2001,10	41,38	121121	8,2727	3,8481	0,2599	83743	0,1534
NACA-2315	103274	2029,07	50,90	151151	6,6291	3,1724	0,3152	104212	0,1441
NACA-2318	123729	2058,15	60,12	181181	5,5304	2,7244	0,3671	124672	0,1342
NACA-2321	144195	2087,78	69,07	211211	4,7441	2,4055	0,4157	145128	0,1237
NACA-2409	62372	1975,81	31,57	93093	11,0013	4,9807	0,2008	63287	0,1613
NACA-2412	82862	2001,88	41,39	122122	8,2632	3,8487	0,2598	83749	0,1527
NACA-2415	103287	2029,85	50,88	152152	6,6294	3,1745	0,3150	104192	0,1431
NACA-2418	123731	2058,15	60,12	181181	5,5556	2,7244	0,3671	124607	0,1340

NACA-2421	144193	2087,78	69,07	211211	4,7391	2,4056	0,4157	145094	0,1235
NACA-2509	62360	1975,81	31,56	93093	10,9898	4,9817	0,2007	63922	0,1612
NACA-2512	82823	2001,88	41,37	122122	8,2548	3,8505	0,2597	83768	0,1526
NACA-2515	103290	2029,30	50,90	152152	6,6227	3,1727	0,3152	104159	0,1436
NACA-2518	123730	2058,38	60,11	182182	5,5190	2,7250	0,3670	124606	0,1337
NACA-2521	144178	2086,67	69,09	211211	4,7622	2,4033	0,4161	145049	0,1249
NACA-2609	62366	1975,81	31,56	93093	10,9906	4,9812	0,2008	64901	0,1612
NACA-2612	82817	2002,11	41,36	123123	8,2551	3,8517	0,2596	84662	0,1523
NACA-2615	103248	2029,85	50,86	152152	6,6221	3,1757	0,3149	104623	0,1433
NACA-2618	123713	2057,59	60,13	181181	5,5192	2,7233	0,3672	124809	0,1348
NACA-2621	144168	2087,78	69,05	211211	4,7566	2,4060	0,4156	145101	0,1236
NACA-2709	62384	1973,36	31,61	93000	10,9780	4,9674	0,2013	65433	0,1613
NACA-2712	82810	2001,88	41,37	122122	8,2644	3,8511	0,2597	85484	0,1527
NACA-2715	103291	2029,30	50,90	152152	6,6662	3,1726	0,3152	105498	0,1439
NACA-2718	123747	2058,93	60,10	182182	5,5248	2,7261	0,3668	125662	0,1336
NACA-2721	144171	2088,57	69,03	212212	4,7615	2,4077	0,4153	145873	0,1229
NACA-4209	62632	1980,84	31,62	94094	10,7632	4,9853	0,2006	64586	0,1644
NACA-4212	83135	2004,66	41,47	120240	8,3500	3,8467	0,2600	84221	0,1578
NACA-4215	103690	2032,40	51,02	150300	6,6800	3,1701	0,3154	104640	0,1492
NACA-4218	124241	2062,82	60,23	180540	5,5722	2,7255	0,3669	125126	0,1388
NACA-4221	144775	2095,47	69,09	210840	4,7810	2,4136	0,4143	145676	0,1255
NACA-4309	62499	1979,18	31,58	99000	10,4053	4,9875	0,2005	66202	0,1623
NACA-4312	83068	2004,56	41,44	124124	8,2728	3,8494	0,2598	84199	0,1561
NACA-4315	103606	2030,96	51,01	152152	6,6288	3,1682	0,3156	104533	0,1484
NACA-4318	124149	2060,04	60,27	181362	5,5359	2,7202	0,3676	125069	0,1394
NACA-4321	144644	2090,24	69,20	211422	4,7488	2,4037	0,4160	145589	0,1294
NACA-4409	62534	1983,32	31,53	102000	10,3091	5,0057	0,1998	68424	0,1585
NACA-4412	83019	2006,36	41,38	127127	8,1305	3,8586	0,2592	85982	0,1538
NACA-4415	103537	2032,76	50,93	155155	6,6171	3,1759	0,3149	104821	0,1460
NACA-4418	124079	2061,06	60,20	184184	5,5437	2,7244	0,3671	125016	0,1374
NACA-4421	144573	2090,46	69,16	213213	4,7294	2,4054	0,4157	145468	0,1279
NACA-4509	62507	1985,68	31,48	102000	10,3101	5,0197	0,1992	70085	0,1562
NACA-4512	83039	2006,03	41,39	129000	8,1882	3,8564	0,2593	87871	0,1520
NACA-4515	103522	2033,77	50,90	157157	6,6091	3,1795	0,3145	107027	0,1449
NACA-4518	124030	2062,62	60,13	186186	5,5330	2,7296	0,3664	126439	0,1356
NACA-4521	144528	2092,59	69,07	215215	4,7483	2,4110	0,4148	146279	0,1250
NACA-4609	62495	1989,04	31,42	102000	10,4182	5,0377	0,1985	71516	0,1535
NACA-4612	83003	2008,61	41,32	129000	8,1788	3,8680	0,2585	89653	0,1497
NACA-4615	103482	2031,88	50,93	157000	6,6394	3,1748	0,3150	108575	0,1446
NACA-4618	124008	2062,62	60,12	186186	5,5039	2,7301	0,3663	128388	0,1357
NACA-4621	144499	2090,92	69,11	215215	4,7204	2,4077	0,4153	148084	0,1275
NACA-4709	62480	1992,18	31,36	101000	10,6407	5,0548	0,1978	72686	0,1513
NACA-4712	82952	2013,32	41,20	129000	8,1803	3,8885	0,2572	91128	0,1460
NACA-4715	103457	2035,80	50,82	157000	6,6398	3,1879	0,3137	110201	0,1414
NACA-4718	123949	2062,85	60,09	186000	5,4971	2,7320	0,3660	129717	0,1335
NACA-4721	144453	2090,14	69,11	215000	4,7157	2,4066	0,4155	149463	0,1265
NACA-6209	62992	2005,25	31,41	110110	9,1833	5,0797	0,1969	75409	0,1543
NACA-6212	83620	2015,74	41,48	129129	7,8735	3,8668	0,2586	88130	0,1577

NACA-6215	104306	2044,24	51,02	151604	6,6490	3,1882	0,3137	105864	0,1507
NACA-6218	124996	2070,74	60,36	181905	5,5525	2,7299	0,3663	126185	0,1443
NACA-6221	145635	2101,71	69,29	212266	4,7678	2,4136	0,4143	146678	0,1341
NACA-6309	62819	2003,25	31,36	114000	8,9286	5,0836	0,1967	76944	0,1517
NACA-6312	83437	2017,66	41,35	136136	7,5836	3,8827	0,2576	91300	0,1527
NACA-6315	104110	2040,24	51,03	160320	6,4645	3,1817	0,3143	107251	0,1501
NACA-6318	124733	2067,30	60,34	185555	5,5049	2,7266	0,3668	126062	0,1430
NACA-6321	145356	2097,04	69,31	212848	4,7535	2,4075	0,4154	146322	0,1342
NACA-6409	62767	2006,62	31,28	115000	8,9993	5,1049	0,1959	78509	0,1468
NACA-6412	83422	2021,26	41,27	139000	7,4628	3,8972	0,2566	93990	0,1475
NACA-6415	103995	2040,37	50,97	164000	6,3625	3,1856	0,3139	110538	0,1459
NACA-6418	124621	2068,44	60,25	191382	5,4895	2,7320	0,3660	128665	0,1401
NACA-6421	145198	2098,73	69,18	219438	4,7469	2,4140	0,4142	147420	0,1301
NACA-6509	62784	2009,98	31,24	116000	9,0087	5,1206	0,1953	80129	0,1426
NACA-6512	83324	2026,74	41,11	140000	7,5198	3,9230	0,2549	96232	0,1414
NACA-6515	103901	2045,53	50,79	167000	6,3582	3,2047	0,3120	113490	0,1402
NACA-6518	124484	2068,11	60,19	193000	5,4430	2,7342	0,3657	131604	0,1370
NACA-6521	145087	2098,08	69,15	221442	4,7213	2,4144	0,4142	150846	0,1301
NACA-6609	62712	2013,90	31,14	115000	9,1744	5,1465	0,1943	81319	0,1384
NACA-6612	83253	2029,55	41,02	139000	7,6243	3,9372	0,2540	98046	0,1382
NACA-6615	103811	2049,68	50,65	166000	6,4376	3,2205	0,3105	115710	0,1356
NACA-6618	124421	2072,49	60,03	194000	5,4730	2,7471	0,3640	134232	0,1322
NACA-6621	145020	2095,85	69,19	221000	4,7071	2,4104	0,4149	153199	0,1299
NACA-6709	62673	2017,82	31,06	114000	9,3464	5,1698	0,1934	82549	0,1352
NACA-6712	83272	2035,04	40,92	139000	7,7434	3,9576	0,2527	99708	0,1333
NACA-6715	103784	2055,17	50,50	165000	6,4809	3,2386	0,3088	117679	0,1304
NACA-6718	124360	2078,30	59,84	192000	5,4678	2,7639	0,3618	136322	0,1261
NACA-6721	144956	2102,91	68,93	221000	4,7252	2,4277	0,4119	155495	0,1217