



e-ISSN: 2149-3367

e-ISSN: 2149-3367

CİLT / VOLUME: XXIV

SAYI / NUMBER: 3

HAZİRAN / JUNE 2024

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

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

Afyon Kocatepe Üniversitesi FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University
Journal of Science and
Engineering



<http://fmbd.aku.edu.tr>

<http://fmbd.aku.edu.tr>

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK
BİLİMLERİ
DERGİSİ**

*Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering*

Cilt / Volume 24
Sayı / Number 3

e – ISSN: 2149-3367

HAZİRAN 2024

JUNE 2024

Dergi Hakkında

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

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

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

Derginin Amacı

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

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

Dergideki Yayın Çeşitliliği

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

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering

İMTİYAZ SAHİBİ/OWNER

Bekir YALÇIN, Mechanical Engineering Afyon Kocatepe University, (Türkiye)
e-mail: bekiryalcin@aku.edu.tr

EDİTÖRLER / EDITORS-IN-CHIEF

Bekir YALÇIN, Mechanical Engineering Afyon Kocatepe University, (Türkiye)
e-mail: bekiryalcin@aku.edu.tr

Ziya Özgür YAZICI, Materials Science and Engineering. Afyon Kocatepe University, (Türkiye)
e-mail: zyazici@aku.edu.tr

YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSISTANT EDITORS-IN-CHIEF

Can BAŞARAN Geological Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)
cbasaran@aku.edu.tr

İbrahim YAVUZ Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)
iyavuz@aku.edu.tr

Şükrü TORTOP Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)
stortop@aku.edu.tr

İLETİŞİM VE DESTEK/ CONTACT AND SUPPORT

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

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

ALAN EDİTÖRLERİ/ EDITORIAL BOARD

Ayça H. ATLI,	Statistics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>aturkan@aku.edu.tr</i>
Bekir ORUNCAK	Physics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>boruncak@aku.edu.tr</i>
Can BAŞARAN	Geological Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>cbasaran@aku.edu.tr</i>
Emre AKARSLAN	Renewable Energy Systems, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>akarслан@aku.edu.tr</i>
Erhan ÜNAL,	Internet and Info. Technol. Management, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>eunal@aku.edu.tr</i>
Fatih ÖZDİNÇ	Management Information Systems, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>fozdinc@aku.edu.tr</i>
Fatma KAYNARCA	Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>fkaynarca@aku.edu.tr</i>
G. Emre GÜRAKSIN	Computer Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>emreguraksin@aku.edu.tr</i>
Güray SONUGÜR	Mechatronics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>gsonugur@aku.edu.tr</i>
Hakan TERZİ	Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>hterzi@aku.edu.tr</i>
İ. Sinan ATLI	Metallurgical and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>sinanatli@aku.edu.tr</i>
Mehmet KILINÇ	Food Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>mkilinc@aku.edu.tr</i>
Mürüvvet KURT	Chemistry, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>muruvvetduz@aku.edu.tr</i>
Nevzat OLGUN	Software Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>nolgun@aku.edu.tr</i>
Oğuzhan ALAGÖZ	Chemical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>oalagoz@aku.edu.tr</i>
Ömer F. GÜLER	Mechanical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>ofguler@aku.edu.tr</i>
Ömer G. NARİN	Geomatics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>gokberknarin@aku.edu.tr</i>
Ramazan EROL	Mathematics and Science Education, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>rerol@aku.edu.tr</i>
Recep KURTULUŞ	Materials Science and Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>rkurtulus@aku.edu.tr</i>
Şükrü A. BAYDIR	Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>abaydir@aku.edu.tr</i>
Şükrü TORTOP	Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>stortop@aku.edu.tr</i>
Tolga ÖZER	Electric-Electronic Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>tolgaozer@aku.edu.tr</i>
Tuğba YALÇIN UZUN	Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>tyalcin@aku.edu.tr</i>
Uğur FİDAN	Biomedical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>ufidan@aku.edu.tr</i>
Veli BAŞARAN	Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>vbasaran@aku.edu.tr</i>
Z. Ebru SAYIN	Mining Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye) <i>zerkan@aku.edu.tr</i>

DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

Prof.Dr. Mustafa Bakkal	İstanbul Technical University, Turkey
Prof.Dr. Mustafa Kemal Yıldız	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Jose Manuel Torralba	IMDEA Materials Institute, Spain
Prof.Dr. Bekir Yalçın	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Tai Keun Kwak	Daejin University, Korea
Prof.Dr. Atilla Evcin	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Yüksel Oğuz	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Karl-Henrich Grote	Otto Von Guericke University, Germany
Prof.Dr. Ömer Hazman	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Ahmet Yıldız	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Evren Yasa	The University of Sheffield, UK
Prof.Dr. İbrahim Mutlu	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. İbrahim Hakkı Cığerci	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Oğuzhan Yılmaz	Gazi University, Turkey
Prof.Dr. Mustaque Hossain	Kansas State University, USA
Prof.Dr. İsmail Sedat Büyüksağış	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Cevat İnal	Konya Technical University, Turkey
Prof.Dr. Regita Bendikiene	Kaunas University of Technology, Lithuania
Prof.Dr. Harun Dıraman	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Ersin Kıvrak	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Halil Zeki Gök	Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Turkey
Prof.Dr. Mustafa Yılmaz	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Hüseyin Ali Yalın	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Bojan Zlender	University of Maribor, Slovenia
Prof.Dr. İsmail Zorluer	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Mustafa Kurt	Marmara University, Turkey
Prof.Dr. Yusuf Kayalı	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Taher Abuain	University of Tripoli, Libya
Prof.Dr. Abdurrahman Karabulut	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Ulvi Şeker	Gazi University, Turkey
Prof.Dr. Ahmet Serteser	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Fatih Onur Hocoaoğlu	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Levent Özcan	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Cemal Çifci	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc. Prof.Dr. Ahmad Azmin Mohamad	Universiti Sains Malaysia, Malaysia
Prof. Dr. Afife Binnaz Hazar	Yıldız Technical University, Turkey
Prof.Dr. Kubilay Aslantaş	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Cahit Gürer	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Engin Taş	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Ahmet Yönetken	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Gür Emre Güraksın	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Ziya Ozgur Yazici	Afyon Kocatepe University, Turkey

DİL EDITÖRLERİ / LANGUAGE EDITORS

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

MİZANPAJ EDITÖRÜ / LAYOUT EDITOR

İbrahim YAVUZ Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)
iyavuz@aku.edu.tr

Ismail YILDIZ İşcehisar Vocational School, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)
iyildiz@aku.edu.tr

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

FEN BİLİMLERİ / SCIENCE

BİYOLOJİ / BIOLOGY (10)

Araştırma Makalesi / Research Article

Evaluation of the Effects of Imazalil on Genotoxicity and Behavioral Toxicity in *Drosophila melanogaster*

İmazalil'in *Drosophila melanogaster*'de Genotoksisite ve Davranışsal Toksisite Üzerine Etkilerinin Değerlendirilmesi

Sezin ÖZDEMİR, Mehmet Furkan ÇİLEK, Selcan GİRGİN, Özkan ŞEŞEN, Dilek AKYIL, Arzu ÖZKARA, İbrahim Hakkı CİĞERCİ

031001 (476-484)

Araştırma Makalesi / Research Article

***Beauveria bassiana* Vuillemin İzolatlarının *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) Üzerine Ovisidal Etkisi**

Ovicidal Effect of *Beauveria bassiana* Vuillemin Isolates on *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae)

Mert Yılmaz UYSAL, Melike OBUT, Asiye UZUN Yiğit

031002 (485-491)

Araştırma Makalesi / Research Article

A Detailed Analysis of Codon Usages Bias and Affecting Factors in the Topoisomerase II Gene of Invertebrate iridescent virus 6

Invertebrate iridescent virüs 6'nın Topoizomeraz II Genindeki Kodon Kullanım Eğiliminin ve Etkileyen Faktörlerin Ayrıntılı Analizi

Yeşim AKTÜRK DİZMAN

031003 (492-503)

FİZİK / PHYSICS (11)

Araştırma Makalesi / Research Article

2-klorokinolinin Moleküler ve Spektroskopik Özelliklerinin Kuantum Kimyasal Hesaplama Yöntemleriyle Araştırılması

Investigating the Molecular and Spectroscopic Properties of 2-chloroquinoline by Quantum Chemical Computational Methods

Fehmi BARDAK, Etem KÖSE

031101 (504-518)

Araştırma Makalesi / Research Article

Atmosferik Basınç Hava Plazması ile Denim Ağartma İşlemi Yapılarak Silikozis Hastalığının Azaltılmasına Yönelik Alternatif Bir Çalışma

An Alternative Study for Reducing Silicosis Disease by Denim Bleaching with Atmospheric Pressure Air Plasma

Ferhat BOZDUMAN

031102 (519-524)

Araştırma Makalesi / Research Article

F_p R – Lineer Çarpık Sabit Devirli Kodlar

F_p R – Linear Skew Constacyclic Codes

Tülay YILDIRIM

031301 (525-530)

Araştırma Makalesi / Research Article

Seçici Kümelendirilmiş Gezgin Satıcı Problemi ve Matematiksel Formülasyonları

Selective Clustered Traveling Salesman Problem and Mathematical Formulations

Tusan DERYA, Esra DİNLER, Barış KEÇECİ

031302 (531-551)

Araştırma Makalesi / Research Article

Toplu Beslenme Yerlerinde Optimal Menü Planlaması: Matematiksel Model Yaklaşımı

Optimal Menu Planning in Mass Feeding Places: A Mathematical Model Approach

Gökhan ALTIN, Ahmet Bahadır ŞİMŞEK

031303 (552-566)

Araştırma Makalesi / Research Article

Bellman Tipi Eşitsizliğin Ters ve Genelleştirilmesi Üzerine

On Reverse and Generalized of Bellman Type Inequality

Necmettin ALP

031304 (567-573)

Araştırma Makalesi / Research Article

Rasyonel Regle Yüzeylerin Afin Denklikleri ve Simetrilerinin Tespiti Üzerine Yeni ve Etkili Bir Algoritma

A New and Efficient Algorithm for Detecting Affine Equivalences and Symmetries of Ruled Rational Surfaces

Hüsnü Anıl ÇOBAN, Uğur GÖZÜTOK

031305 (574-582)

Araştırma Makalesi / Research Article

Oyun Teorisi Açısından Türkiye Gözünden Finlandiya ve İsveç'in NATO'ya Üyelik Süreci

The Accession Process of Finland and Sweden to NATO by Türkiye's Perspective from the Point of Game Theory

Murat ÖZKAYA, Yücel BAŞTAN, Burhaneddin İZGİ

031306 (583-592)

Araştırma Makalesi / Research Article

Faiz Oranının Anüite Fiyatları Üzerindeki Etkisine İlişkin Bir Çalışma

Importance of Interest Rate on Annuity Prices: A Case Study

Çiğdem LAZOĞLU, Müge YELDAN, Uğur KARABEY

031307 (593-601)

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / ENGINEERING

BİLGİSAYAR & BİLİŞİM / COMPUTER & INFORMATICS (51)

Araştırma Makalesi / Research Article

Stance Detection on Short Turkish Text: A Case Study of Russia-Ukraine War

Türkçe Kısa Metinlerde Duruş Tespiti: Rusya-Ukrayna Savaşı Örneği

Serdar ARSLAN, Eray FIRAT

035101 (602-619)

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

Araştırma Makalesi / Research Article

Kırmızı ve Sarı Aliç Meyvelerinin Farklı Çözücülerdeki Ekstraktlarının Biyolojik Aktiviteleri

Biological Activities of Extracts of Red and Yellow Hawthorn Fruits in Different Solvents

İlker ATİK, Ayşe Janseli DENİZKARA, Gökhan AKARCA, Azize ATİK

035401 (620-627)

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ (55)

Araştırma Makalesi / Research Article

Sürdürülebilir Ulaşım Planlamasında CBS Tabanlı Otopark Uygunluk Analizi

GIS-Based Car Parking Suitability Analysis in Sustainable Transportation Planning

Arif Çağdaş AYDINOĞLU, Süleyman ŞİŞMAN, Mesube Azize ŞAŞMAZ, Selin Nur AKIN

035501 (628-640)

Araştırma Makalesi / Research Article

The Use of Unmanned Aerial Vehicles in the 3D Documentation of Historical and Cultural Heritage: The Case of Ceyhan Kurtkulağı Caravanserai

Tarihi ve Kültürel Mirasın 3 Boyutlu Olarak Dokümantasyonunda İnsansız Hava Araçlarının Kullanımı: Ceyhan Kurtkulağı Kervansarayı Örneği

Enis ARSLAN, Alihsan ŞEKERTEKİN

035502 (641-649)

Araştırma Makalesi / Research Article

Beacon Tabanlı Mesafe Bilgisinin Ortam Şartlarına Göre Belirlenerek Üçgenleme Algoritmasıyla Test Edilmesi

Determining Beacon-Based Distance Information According to Environmental Conditions and Testing with the Trilateration Algorithm

Recep ÇAKIR, Serkan DOĞANALP

035503 (650-659)

Araştırma Makalesi / Research Article

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanmış Çelik Binada Kalıcı Ötelemeleri İçeren Performans Değerlendirmesi

Performance Evaluation Including Residual Drifts on a Steel Building Designed Building Earthquake Code of Türkiye

Kaan TÜRKER , Aykut SAYILIR

035601 (660-673)

Araştırma Makalesi / Research Article

Şiddet-Süre-Frekans Bağıntıları için Ağırlıklı Süperpozisyon Çekme İtme Algoritmasında Farklı Kaotik Harita Performanslarının Karşılaştırılması

Comparison of Different Chaotic Maps Performance in Weighted Superposition Attraction Repulsion Algorithm For Intensity–Duration–Frequency Relations

Mümin Emre ŞENOL, Mustafa Erkan TURAN, Tülin ÇETİN

035602 (674-684)

Araştırma Makalesi / Research Article

İnşaat Mühendisleri için Açılan İş İlanlarının Metin Madenciliği ile Değerlendirilmesi

Evaluation of Job Advertisements for Civil Engineers with Text Mining

Hakan ÖZBAŞARAN, Gökçenur TAŞCI, Mert TUNA, İpek KARATAŞ, Arif ÇELİK, Mesut GÜMÜŞ, Mert BİRŞEN

035603 (685-693)

Araştırma Makalesi / Research Article

Sulu Ortamda Anodik Yükseltgenmeyle Elde Edilen Nanotüp Yapılı TiO₂ Elektrotların Fotoelektrokimyasal Performansı

Photoelectrochemical Performance of Nanotube Structured TiO₂ Electrodes Produced by Anodic Oxidation in Aqueous Medium

Levent ÖZCAN

035701 (694-701)

Araştırma Makalesi / Research Article

Karahallı (Uşak, GB Türkiye) Havzasında Bulunan Pliyo-Pleistosen Yaşlı Gömülü Sedimanter Birimlerin Mineralojisi ve Jeokimyası

Mineralogy and Geochemistry of Plio-Pleistocene aged Burried Sedimentary Units in the Karahallı Basin (Uşak, SW-Türkiye)

Tülay ALTAY, Ali KORKMAZ

035801 (702-715)

Araştırma Makalesi / Research Article

Fourier Kanunuyla Çalışan Isı İletim Katsayısı Ölçüm Cihazı Tasarımı ve Üretimi

Design and Fabrication of Thermal Conductivity Coefficient Measurement

Device Working with Fourier's Law

Umut MELİKOĞLU, Bahri DAMAR, Mustafa MUTLUBAŞ, Osman YELER

035901 (716-725)

Araştırma Makalesi / Research Article

TOPSIS Yaklaşımı ile Metasezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Performans Değerlendirmesi

Performance Evaluation of Meta-Heuristic Optimization Algorithms with The TOPSIS Approach

Şehmus FİDAN, Metin ZALOĞLU, Emre ERKAN

035902 (726-748)

MÜHENDİSLİK DIĞER / OTHER ENGINEERING (72)

Araştırma Makalesi / Research Article

Designing a Cost-Efficient Belt-Driven 3D-Printed Syringe Pump

Düşük Maliyetli ve Kayış Aktarmalı 3B Baskılı Şırınga Pompası Tasarımı

İsmail AĞIR

037201 (749-757)

Evaluation of the Effects of Imazalil on Genotoxicity and Behavioral Toxicity in *Drosophila melanogaster*

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 25.08.2023

Kabul/Accepted: 06.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

İmazalil'in *Drosophila melanogaster*'de Genotoksosite ve Davranışsal Toksikite Üzerine Etkilerinin Değerlendirilmesi

Sezin ÖZDEMİR , Mehmet Furkan ÇİLEK , Selcan GİRGIN , Özkan ŞEŞEN , Dilek AKYIL , Arzu ÖZKARA , İbrahim Hakkı ÇİĞERCİ 

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Abstract

Imazalil (IMZ) is an imidazole and triazole derivative fungicide that is widely used to prevent many diseases in vegetable and fruit fields and to prevent post-harvest spoilage. In this study, the genotoxic potential of IMZ at different concentrations (0.25, 1, 4.5 mM) on *Drosophila melanogaster* was investigated using Somatic Mutation and Recombination (SMART) and Single Cell Gel Electrophoresis (Comet) Assays. The effect of the same IMZ concentrations on behavioral toxicity in *D. melanogaster* was investigated. Larval weight, crawling, and pupa formation success were performed to determine behavioral toxicity. As a result of the study, it was determined that IMZ generally caused a negative effect on *D. melanogaster*. In the SMART test, it was found that the differences between the wing preparations of the individuals obtained as a result of all IMZ concentration applications were not statistically significant compared to the negative control. The damage caused to DNA by IMZ was determined by the Comet test, and a statistically significant increase in DNA damage scores was observed at doses of 1 and 4.5 mM. In the crawling experiment of IMZ on *D. melanogaster*, a decrease in locomotion occurred due to the increase in dose compared to the control group, and these changes were found to be statistically significant at all application doses. Changes in larval weight were not found to be statistically significant. In the pupa formation success experiment, the decrease at 1 and 4.5 mM doses was found to be statistically significant.

Keywords: Imazalil; *Drosophila melanogaster*; Comet test; Behavioral toxicity; SMART test.

Öz

İmazalil (IMZ), sebze ve meyve tarlalarında birçok hastalığın önlenmesi ve hasat sonrası bozulmanın engellenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan bir imidazol ve triazol türevi fungisittir. Bu çalışmada, farklı konsantrasyonlardaki (0.25, 1, 4.5 mM) IMZ'nin *Drosophila melanogaster* üzerindeki genotoksik potansiyeli Somatik Mutasyon ve Rekombinasyon (SMART) ve Tek Hücreli Jel Elektroferez (Comet) Testleri kullanılarak incelenmiştir. Aynı IMZ konsantrasyonlarının *D. melanogaster*'de davranışsal toksisiteye etkisi de araştırılmıştır. Larva ağırlığı, sürünme ve pupa oluşum başarıları davranışsal toksisiteyi belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, IMZ'nin genel olarak *D. melanogaster* üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu belirlenmiştir. SMART testinde, tüm IMZ konsantrasyonu uygulamalarının elde edilen bireylerin kanat preparasyonları arasındaki farkların negatif kontrolle istatistiksel olarak anlamlı olmadığı bulunmuştur. IMZ tarafından DNA'ya verilen hasar, Comet testi ile belirlenmiş, 1 ve 4.5 mM'lık dozlarda istatistiksel olarak DNA hasar skorlarında anlamlı bir artış gözlenmiştir. IMZ'nin *D. melanogaster* üzerinde yapılan sürünme deneyinde kontrol grubuna kıyasla doz artışına bağlı olarak hareket kabiliyetinde azalma meydana gelmiş ve bu değişiklikler tüm uygulama dozlarında istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Larva ağırlığındaki değişiklikler ise istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Pupa oluşum başarıları deneyinde ise 1 ve 4.5 mM'lık dozlardaki azalış istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: İmazalil; *Drosophila melanogaster*; Comet testi; Davranışsal toksisite; SMART testi.

1. Introduction

Pesticides are chemicals or mixtures of substances commonly used in agriculture to control or prevent fungi, insects, weeds, various plant diseases, microorganisms, and other pests (Kamel and Hoppin 2004, Çali and Kesercioğlu 2010, Akdoğan *et al.* 2012). Unconscious use of pesticides not only affects plants but also pollutes soil and water. This also negatively affects beneficial

microorganisms, birds, fishes, human health and non-target organisms (Isin and Yıldırım 2007, Kamal *et al.* 2020). Pollutants such as pesticides, veterinary medicines, antibiotics, and parabens have recently been indicated in many studies to cause contamination in processed foods and agricultural/crop production (Pérez-Ortega *et al.* 2017). Due to advancement in technology, the amount and variety of pesticides has also been increased significantly to increase the yield of agricultural

products. Therefore, due to their direct and indirect harmful effects on the environment, it is necessary to determine the potential toxic and genotoxic effects of widely used pesticides on non-target organisms before they are released to the market.

Fungicides, an important class of pesticides, are chemical compounds or organisms used to kill fungi or their spores (Haverkate *et al.* 1969). Fungicides have been widely used for more than a century to increase crop yields and maintain food security. Fungal diseases in agriculture cause crop yields to decrease by almost 20% (Lucas *et al.* 2015, Yu *et al.* 2023). According to the data of the National Research Council, it has been reported that a large part of the carcinogenic effects caused by pesticides may be due to fungicides (Schneider *et al.* 1994).

IMZ (1-[2-(2,4-dichlorophenyl)-2-(2-propenyloxy) ethyl]-1H-imidazole) is an imidazole and triazole derivative fungicide that has an important place in the prevention and cure of many fungal diseases (Siegel *et al.* 1978, Şişman and Türkez 2010, Çıldır and Liman 2020). IMZ is a slightly yellow to brown solidified oil-colored fungicide with a molecular weight of 297.18 g/mol and is used in agriculture to control fungal pathogens after harvesting, especially fruits such as citrus fruits, pears, and apples (Ghosoph *et al.* 2007, Altieri *et al.* 2013).

More data are needed to determine the negative effects of mutagenic and genotoxic effects of pesticides such as IMZ, which have a widespread field of use, on non-target organisms. In this context, various assays and tests like the Comet test, behavioral tests, and SMART test have been used to determine genotoxicity, behavioral toxicity, and mutagenic effects. The Comet test is a simple, sensitive, and fast technique used to detect DNA damage and repair at the cellular level. The breaks and structural distortions that occur in DNA create comet-like images. DNA damage is determined by the density of the part of the head that makes up the Comet (Dayanıklı 2014). The use of model organisms in conducting toxicity tests is quite common and important. In this context, *D. melanogaster* is a model organism that is widely used in toxicity studies due to its simpler genome structure, life expectancy, and low maintenance cost compared to higher organisms, as well as its similarity in terms of molecular pathways between humans. As a result of genomic studies conducted, it is estimated that about 75% of the genes responsible for the disease in humans are preserved in *Drosophila* (Jeibmann *et al.* 2009, Calap *et al.* 2017, Anushree *et al.* 2023).

There are several reasons why the Comet test is used on *Drosophila* to determine genotoxicity under *in vivo*

conditions. *D. melanogaster* hemocytes and lymphocytes in the blood of mammals have the same role. The hemocyte isolation methodology is quite simple. The sensitivity of hemocytes to toxic substances circulating in the hemolymph is quite high and can be directly exposed. So, due to these reasons, it has an important place in genotoxicity studies (Carmona *et al.* 2010, Hersperger *et al.* 2023).

Behavioral tests on different organisms were utilized for the evaluation of the toxic effects of various chemicals and newly synthesized products. The data obtained from these tests are very effective in evaluating the effects of different chemicals in a specific, sensitive, and reliable manner in all fields, especially in basic research. At the same time, behavioral changes are one of the main measurable indicators of chemical exposure in toxicity assessments. For this reason, many different experiments, such as pupa formation and pupa emergence success, pupa position, larval weight, and crawling tests are widely applied to determine behavioral toxicity in *Drosophila melanogaster* (McKellar *et al.* 2017, Bianchini *et al.* 2019, Kurşun *et al.* 2021, Ciğerci *et al.* 2023).

One of the most common *in vivo* tests used to determine mutation and recombination is the *Drosophila* wing somatic mutation and recombination test, known as SMART (Kurşun *et al.* 2022). The SMART test is an inexpensive and fast test used to detect genetic mutations and variations of somatic recombination. In this test, 3rd instar transheterozygous larvae carrying the recessive *flr* and *multiple wing hair (mwh)* genes are used. The genotoxic effects of the agent used cause changes in the imaginal disc cells in larvae. The variations are evaluated according to the mutant trichomes (Kaygısız *et al.* 2017, Nas 2019). For all these reasons, in this study, *D. melanogaster* as a model organism has been used to assess the potential genotoxic effects of IMZ on non-target organisms. Behavioral toxicity has been studied to determine the toxic effects on the organism, SMART has been studied to evaluate mutagenicity and Comet has been studied to evaluate genotoxicity.

2. Materials and Methods

In this experiment, *D. melanogaster* samples obtained from the Akdeniz University Department of Biology Toxicology Laboratory were used. A 12:12 light:dark photoperiod was applied to the colonies and the samples were kept at 25±1°C and 60% humidity.

To determine the doses to be used in the study, doses of 0.01, 0.1, 1, 5, 10 mM were scanned to determine the LD₅₀ dose. As a result of the evaluation made with the

probit program the LD₅₀ dose was determined as 1 mM. And the lower and upper doses of 0.25 and 4.5 mM, respectively, were determined as the experimental group.

In behavioral experiments and the Comet assay, eggs were obtained by washing with tap water after 8 hours using a fine mesh. Collected *Drosophila* Oregon R+ line eggs were exposed to three concentrations (0.1, 1, 4.5 mM) for IMZ. The exposure was 72±4 h in the 4.5 g of dry *Drosophila* instant medium and 9 mL of IMZ in different concentrations. All the tests were performed in 3 replications and negative control with distilled water (Çiğerci et al. 2023). Imazalil pesticide used in the study was supplied by Sigma Aldrich, Munich, Germany (CAS Number 35554-44-0) and distilled water was used as solvent.

2.1. Comet Assay

The eggs were collected from the 8-hour-old culture medium with *Drosophila* Oregon R+ line. The eggs were put in 4.5 g of instant medium, which applied 9 mL of four different concentrations of IMZ until they reached the third instar larval stage. Approximately 40-60 larvae were taken for all concentrations, and hemocytes were obtained by dissecting the larvae under a microscope in phosphate-buffered saline (PBS) solution containing 0.07% phenylthiourea. The isolated hemocytes were first centrifuged at 300 x g for 10 minutes, 20 µL of cold PBS was added to the resulting pellet, and the hemocytes were mixed in an Eppendorf containing 80 µL low melting point agarose (LMA). Then, this mixture was spread on the slide coated with 1% normal melting point agarose (NMA) the day before and covered with a coverslip. After a while, the coverslips were removed and the preparations were placed in fresh lysis solution (10 Mm Tris, 2.5 M NaCl, 100 mM Na₂EDTA, 1% Triton X-100, and 1% N-lauryl sarcosinate, pH 10) in the dark for one hour. After the lysis process, the preparations were transferred to cold electrophoresis buffer (1 mM Na₂EDTA and 300 mM NaOH, pH>13) and waited for 30 minutes. Then electrophoresis was performed at 25 V 300 mA in the dark for 30 minutes. After removing the lysis solution, the slides were embedded into 400 mM Tris (pH 7.5) and neutralized for 5 minutes. This process was applied twice. 70 µL ethidium bromide was used to visualise the cell nucleus. 5 mg of ethidium bromide was dissolved in 25 mL distilled water to prepare the stock solution.

A 10-fold dilution was applied for the experiment. Slides were examined with a fluorescence microscope to visualize fifty comets per slide for scoring by one person to maintain the stability of the results. In the study an

Olympus Optical Co. Ltd. BX50F-3 fluorescence microscope was used to visualize Comet assay results. The scores of nuclear damages were scored as 0 for no damage to 4 for full damage. All procedures were performed in a dark or red-light environment.

2.2. Behavioral Experiments

2.2.1. Larval Weight

Larvae were weighed before and after exposure. The larvae that were exposed to IMZ were collected with a fine mesh and washed with tap water to prevent any contamination. Then 10 larvae from each replicate were weighed again after 24h of exposure (Kurşun et al. 2021). All experiments were performed in triplicate.

2.2.2. Crawling

Solidified agar (2%) was utilized to measure the larval movement. The distance of the larval movement was monitored for one minute and measured (Kurşun et al. 2021). The experiment was carried out with 10 larvae in each repetition and the study was repeated three times. and the average of the data obtained was used for statistical evaluation.

2.2.3. Pupa Formation Success

50 larvae fed on media containing different concentrations of IMZ until the larval stage were recorded, and measurements were calculated using the formula hatching success (number of adults/50) x 100% and the percentage of pupa position according to Fauzi et al. (2020) was determined by this method (Fauzi et al. 2020) Measurements were continued until the end of pupation formation.

2.3. SMART Assay

This assay uses two different strains of *D. melanogaster*, which are *mwh* and *flr*. These two different strains were bred as *flr* females and *mwh* males. Almost 300 *flr* females (to be sure *flr* females are virgin, were collected no more than 6h after hatching) obtained and mated with *mwh* males (Amkiss et al. 2021). 125 mL bottles with standard mediums were used. Waited 8h to flies to mate and adults were removed from the mating bottles. After the adults were mated and removed from the bottles, eggs were collected using a fine mesh and placed in test tubes with 9 gr instant medium with 4.5 mL different concentrations of IMZ and then waited for the pupa to hatch. Adults were collected in 4h period to be sure that the individual's wings weren't damaged. Collected adults were stored in 70% alcohol at 4°C until the use. The wings of individuals were placed in a watch glass with Faure's

solutions to collect the wings. 50 ml dH₂O, 30 g gum arabic (Aldrich), 50 g chloral hydrate (Merck) and 20 ml glycerol were used for the preparation of Faure's solution. Stereomicroscopes were used to collect the wings. Wings were collected using lancet and fine tweezers. Wings were placed in pairs into to slides that contained a few µL of Faure's solutions and waited for 24h in a dust-free place. For fixation of the wing preparations, a few drops of Faure's solution were added to the slide and then the wings were carefully added and covered with cover glass. 250 g weight was placed on the preparations and allowed to dry for 24 hours. After 24 hours, the weights were removed and the Faure's solution overflowing to the edge of the preparations was cleaned. (Aşkın and Uysal 2010).

2.4. Statistical Analyzes

Duncan's multiple range test ($p \leq 0.05$) was used to determine significant alterations in the DNA damage data (means \pm standard deviations) in the Comet assay. The results obtained from crawling, pupa formation success and larval weight experiments were evaluated with the One-way ANOVA (Kruskal-Wallis) test in SPSS 20 Programme. The results obtained from SMART were evaluated by the MICROSTA program. Statistical analysis of all other results was done by analyzing the variance of the data using SPSS version 15.0 for Windows software. Duncan's multiple range test was used for comparing different concentration groups with the controls.

3. Results

The toxicity and genotoxic potential of IMZ on *Drosophila melanogaster* were investigated using the SMART test and Comet test. Crawling test, larval weight, and pupation success tests were applied to determine the behavioral toxicity of IMZ in *Drosophila melanogaster*.

3.1. Comet Assay

According to the results of the Comet test, it was determined that the amount of DNA damage increased in direct proportion to the increase in IMZ concentration, and this increase was found to be statistically significant when compared to the control group (Figure 1).

3.2. Behavioral Experiments

3.2.1. Larval Weight Assay

In the treatment groups containing IMZ at 0.25 mM and 4.5 mM concentrations, larval weight increased compared to the control, and 1 mM concentration decreased compared to the control. However, these changes were not found to be statistically significant. The results of the larval weight assay in *D. melanogaster* are shown in Figure 2.

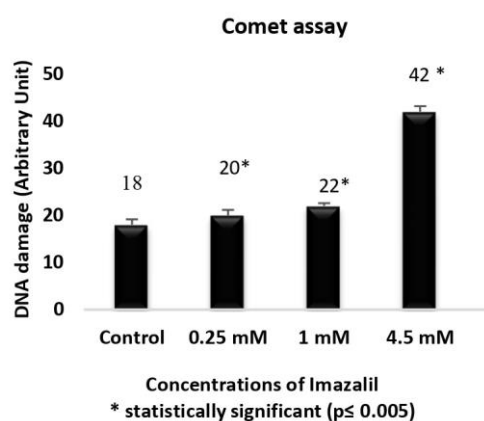


Figure 1. Imazalil-induced DNA damage scores in *D. melanogaster*

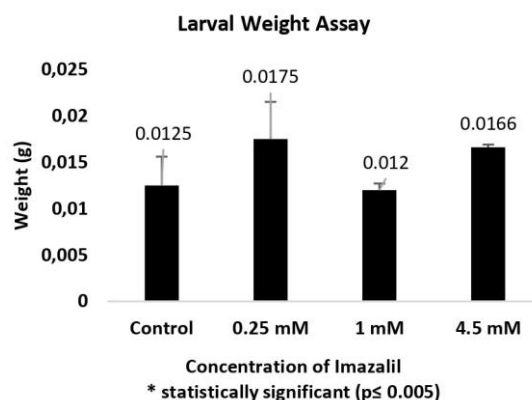


Figure 2. Imazalil-mediated alterations in larval weights of *D. melanogaster*

3.2.2. Larval Crawling Assay

A statistically significant decrease in the movement skills of the larvae was observed in the crawling experiment due to the increase in IMZ concentration (Figure 3).

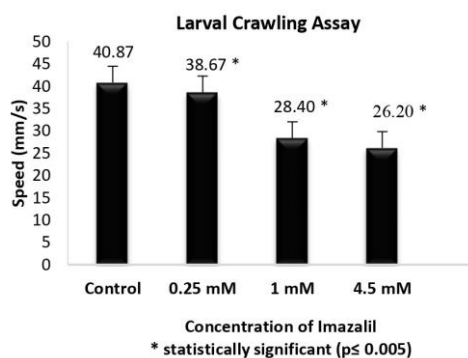


Figure 3. Imazalil-mediated alterations in larval crawling of *D. melanogaster*

3.2.3. Pupa Formation Success

The data of the pupa formation test are given in Figure 4. When the pupa formation success was compared with the control, 0.25 mM application showed a value close to the control group. Depending on the concentration increase, 1 mM and 4.5 mM applications decreased. Except for the 0.25 mM application, these changes were found to be statistically significant.

3.3. SMART Assay

The results obtained from the 0.25, 1, and 4.5 mM applications of IMZ, whose genotoxic properties were evaluated with SMART, are shown in Table 1. In this study, positive results were observed in all clone types when the results of ethyl methane sulfonate (EMS) applications used as a positive control were compared with the results of distilled water application. It was found that the differences between the wing preparations of the individuals obtained as a result of all IMZ concentration applications were not statistically significant compared to the control group. In addition, according to the results of the signed application, there was no increase or decrease in the total clone induction

frequency at a certain rate depending on the dose increase.

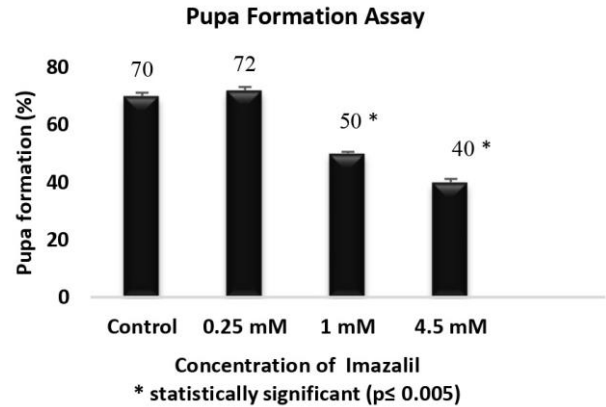


Figure 4. Imazalil-mediated alterations in pupa formation success of *D. melanogaster*

Table 1. Results of SMART, evaluating the genotoxic potential of Imazalil

Experimental groups (mM)	Number of wings (N)	Small spots (1–2 cells; m = 2)			Large spots (>2 cells; m = 5)			Twin spots (m=5)			Total spots (m=2)			Total spots (m=2)		
		No.	Fr.	D.	No.	Fr.	D.	No.	Fr.	D.	No.	Fr.	D.	No.	Fr.	D.
Distilled Water (72h)	40	8	(0.16)		1	(0.02)		0	(0.00)		9	(0.19)		10	(0.19)	
1 mM EMS (72h)	30	60	(2.29)	+	20	(0.87)	+	7	(0.29)	+	80	(3.39)	+	87	(3.48)	+
Imazalil (mM)																
0.25	40	2	(0.05)	-	1	(0.025)	-	0	(0.00)	i	2	(0.05)	-	3	(0.075)	-
1	40	8	(0.2)	i	0	(0.00)	i	0	(0.00)	i	8	(0.2)	i	10	(0.10)	-
4.5	40	8	(0.3)	i	3	(0.075)	i	0	(0.00)	i	9	(0.225)	i	12	(0.3)	i

Fr: frequency; D: statistical results; EMS: ethyl methane sulfonate +: positive; -: not genotoxic; i: non-significant results; m: multiplying factors; confidence level: 0.05.

4. Discussion

The interaction of humans with pesticides and other agricultural drugs is increasing rapidly with the growing technology and pesticide usage in agricultural fields. Pesticides are a crucial part of agriculture, but they contaminate groundwater sources and can be transported with rain or other sources of water to lakes, rivers, and seas. In such cases, pesticides significantly affect soil and aquatic life on non-target organisms. For this reason, it is important to analyze the risks caused by these chemicals in terms of acute or chronic effects.

The fungicide we used in this research has shown the effects on mushroom enzyme cytochrome p450 to inhibit cell wall synthesis. We can see IMZ's usage in different places, such as in citrus after harvest or in veterinary applications for dermatophytes treatment (Altieri *et al.* 2013). That is one of the reasons why we use *D. melanogaster* to evaluate the potential effects, such as behavioral toxicity, Comet test for DNA damage, and SMART test for mutagenic activity, of IMZ to non-target organisms.

Comet test is a fast and reliable test for determining any DNA damage or repair (Gajski *et al.* 2021). The findings of the Comet test showed a significant increase in DNA damage with an increase in the dosage of IMZ compared to the control group. Although there were changes compared to the control group, DNA damage was not found to be statistically significant in any application group. Schwarzbacherova *et al.* (2015) performed the Comet test on human lymphocytes with prosaro (tebuconazole/prothioconazole), a triazole fungicide, in their study and found that a dose of 30 µg/ml of this fungicide caused statistically significant DNA damage. Çıldır and Liman (2020) showed that 0.5, 1, and 2 µg/mL IMZ concentrations caused DNA damage in *Allium* roots, as demonstrated by the Comet test. Pesticide-induced DNA damage can be explained by the accumulation of various free radicals and reactive oxygen species over time (Çiğerci *et al.* 2023). However, although genotoxic damage was observed in the Comet test in some studies due to varying chemicals, application doses and duration of these chemicals, there was no statistically significant change in this study.

IMZ is a member of the azole group of fungicides, and azoles are the most commonly used antifungal agents in clinical medicine (Şeyhan *et al.* 1999, Álvarez *et al.* 2016). Most of the azoles are certified for being hepatotoxic. Posaconazole and ketoconazole are cytotoxic for HepG2 (Hepacellular carcinoma) cell line. When HepG2 cells were exposed for 24 hours to posaconazole and ketoconazole, both decreased the amount of mitochondrial DNA and induced apoptosis (Haegler *et al.* 2017). There is not enough research on IMZ-mediated oxidative stress and we need more data about IMZ's effects (Pereira *et al.* 2020). IMZ also induced oxidative stress on HepG2 and Caco-2 (Human colon carcinoma) cell lines (Silva *et al.* 2022). Moreover, IMZ has also shown developmental toxicity in *Danio rerio* embryos. So, this shows the potential environmental risks of IMZ to non-target organisms (Huang *et al.* 2022). IMZ was applied to lactating female mice and inhibited the genes that are responsible for sex hormone receptors, cholesterol receptors, and synthesis of T cells. (Jin *et al.* 2019). All these researches show similar results to this research that IMZ can be harmful to non-target organisms. The behavioral test is an important test that shows us the observable effects of drugs and chemical agents (Kurşun *et al.* 2021). Behavioral tests give us advantages for finding out the *in vivo* effects of various chemicals and drugs. These tests can be used for the genetic reasons for behaviors and how these genetic mechanisms affect the behaviors of various organisms (McKellar *et al.* 2017).

Bianchini *et al.* (2019) investigated the neurotoxic effects on *D. melanogaster* by feeding 1-2 days old flies with 25 µM thimerosal-supplemented medium. This study observed that thimerosal caused changes in dopamine levels, dopamine energy system and the activity of the rate-limiting enzyme, tyrosine hydroxylase, on flies. These phenotypes further showed increasing oxidative stress, decreasing cell viability, and survival rate. The dopamine energetic system and speed limiter enzyme tyrosine and hydroxylase's dysfunction made behavioral anomalies. So, thimerosal has neurotoxicity due to oxidative stress.

In the present study, significant results in locomotor function due to exposure to IMZ were observed. The movement of pupa was decreased with the increasing concentration of IMZ and this showed that there could be a correlation with DNA damage (Ciğerci *et al.* 2023). We found increasing IMZ concentration also makes larval movements slower than in the control group. In addition, if we compare the control group with all experimental groups decreasing the amount of distance covered in the unit time is statistically significant. Larval movements are

controlled by a network of neurons. Larvae make peristaltic movements with short pauses while crawling. This mechanism is controlled by motor neurons, sensory feedback, and the central pattern of the neural network (Fauzi *et al.* 2020). In the treatment groups containing IMZ at 0.25 mM and 4.5 mM concentrations, larval weight increased compared to the control, and 1 mM concentration decreased compared to the control. However, these changes were not found to be statistically significant. Previous studies have investigated whether imidazole derivatives can induce specific malformations similar to those observed after triazole derivative exposure. Accordingly, post-implantation rat embryos were exposed to determined concentrations (5, 10, 50, and 100 µM) of imidazole (1000 µM) and imidazole derivatives ketoconazole and enilconazole fungicides *in vitro*. Specific malformations are very similar to those observed after triazole exposure detected in culture after hours of exposure (Menegola *et al.* 2006). Farag and İbrahim (2006) revealed the developmental toxicity in rats due to flusilazol exposure. They found that in the medium and high concentrations, there can be changes in the body weight, maternal toxicity, developmental retardation, and there could be skeletal anomalies.

The SMART test is a common method that lets us see if a chemical has any genotoxicity or not. When studying potential drugs or chemical agents, understanding and calculating mitotic recombination as a result of recombinogenic effects is important. The SMART test is based on observing if trans heterozygous larvae's imaginal disk cells heterozygous feature will disappear (Yalçın 2017). When heterozygous in imaginal disk cells disappears, the recessive adverb gene is expressed because of that, the mutant colonies cells will be formed (Spano *et al.* 2001). Kurşun *et al.* (2022) evaluated four different concentrations (1, 2, 5, and 10 mM) of metiram, kresoxim-methyl, propamocarb, and hymexazole fungicides on *D. melanogaster* with the SMART test and reported that these fungicides did not cause genotoxicity. When the results of the study are compared with this study, it is seen that no genotoxic activity was found in terms of the data obtained. However, it should be considered that genotoxic activity can be induced when the ratios of the concentrations used in the studies are increased. In order to fully evaluate this situation, it is necessary to work with more concentration. In some cases, it may become undetectable due to minor DNA damage and its repair.

In conclusion, in this study, it was determined that IMZ induced DNA damage, as a result of the Comet test, caused changes in various behavioral tests, but did not

create a statistically significant change in SMART. The different results obtained in the Comet and SMART test systems are due to the different operating principles of the two test systems. . While the comet test is an indicator of genotoxic damage causing single or double strand breaks, the SMART test is a method that can measure mitotic recombination and it is possible that the results obtained from the two test systems differ from each other. With all this information, further studies on different organisms are required to determine the cytotoxic and genotoxic effects of IMZ.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author 1: Investigation, Methodology, Experimental study, Writing
Author 2: Investigation, Methodology, Experimental study, Writing
Author 3: Investigation, Methodology, Experimental study, Writing
Author 4: Investigation, Methodology, Experimental study, Writing
Author 5: Investigation, Methodology, Statistical analysis, Study design
Author 6: Investigation, Methodology, Statistical analysis, Study design
Author 7: Investigation, Methodology, Statistical analysis, Study design

Declaration of Competing Interest

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

Data Availability Statement

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

5. References

- Akdoğan, A., Divrikli, Ü. and Latif, E., 2012. Pestisitlerin önemi ve ekosisteme etkileri. *Akademik Gıda*, **10**, 125-132.
- Altieri, G., Di Renzo, G.C., Genovese, F., Calandra, M. and Strano, M.C., 2013. A new method for the postharvest application of imazalil fungicide to citrus fruit. *Biosystems Engineering*, **115**, 434-443. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.04.008>
- Alvarez-Perez, S., de Vega, C., Pozo, M.I., Lenaerts, M., Van Assche, A., Herrera, C.M., ... and Lievens, B., 2016. Nectar yeasts of the Metschnikowia clade are highly susceptible to azole antifungals widely used in medicine and agriculture. *FEMS Yeast Research*, **16(1)**, fov115. <https://doi.org/10.1093/femsyr/fov115>
- Amkiss, S., Dalouh, A., and Idaomar, M., 2021. Chemical composition, genotoxicity and antigenotoxicity study of Artemisia herba-alba using the eye and wing SMART assay of *Drosophila melanogaster*. *Arabian Journal of Chemistry*, **14**, 102976. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.102976>
- Anushree, A., Ali, M.Z., Bilgrami, A.L., and Ahsan, J., 2023. Acute exposure to arsenic affects pupal development and neurological functions in *Drosophila melanogaster*. *Toxics*, **11(4)**, 327. <https://doi.org/10.3390/toxics11040327>
- Aşkın, H., and Uysal, H., 2010. *Drosophila melanogaster*'de glisitein ve koumestrolün genotoksik etkilerinin somatik mutasyon ve rekombinasyon testi ile belirlenmesi. *TÜBAV Bilim Dergisi*, **3(3)**, 264-270.
- Bianchini, M.C., Gularte, C.O.A., Nogara, P.A., Krum, B.N., Gayer, M.C., Bridi, J.C., ... and Puntel, R.L., 2019. Thimerosal inhibits *Drosophila melanogaster* tyrosine hydroxylase (Dm TyrH) leading to changes in dopamine levels and impaired motor behavior: implications for neurotoxicity. *Metallomics*, **11(2)**, 362-374. <https://doi.org/10.1039/c8mt00268a>
- Calap-Quintana, P., González-Fernández, J., Sebastián-Ortega, N., Llorens, J.V. and Moltó, M.D., 2017. *Drosophila melanogaster* models of metal-related human diseases and metal toxicity. *International journal of molecular sciences*, **18(7)**, 1456. <https://doi.org/10.3390/ijms18071456>
- Carmona, E.R., Guecheva, T.N., Creus, A. and Marcos, R., 2010. Proposal of an *in vivo* comet assay using haemocytes of *Drosophila melanogaster*. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, **52**, 165-169. <https://doi.org/10.1002/em.20604>
- Ciğerci, İ.H., Liman, R., İstifli, E.S., Akyıl, D., Özkara, A., Bonciu, E. and Colă, F., 2023. Cyto-Genotoxic and Behavioral Effects of Flubendiamide in *Allium cepa* Root Cells, *Drosophila melanogaster* and Molecular Docking Studies. *International Journal of Molecular Sciences*, **24(2)**, 1565. <https://doi.org/10.3390/ijms24021565>
- Çalı, İ.Ö. and Kesercioğlu, T., 2010. Effects of Fosetyl-Al, a fungicide on meiosis of *Lycopersicon esculentum* Mill. *Bangladesh Journal of Botany*, **39**, 237-240. <https://doi.org/10.3329/bjb.v39i2.7486>
- Çıldır, D.S. and Liman, R., 2020. Cytogenetic and genotoxic assessment in *Allium cepa* exposed to imazalil fungicide, *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 20335-20343. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08553-2>
- Dayanıklı, S., 2014. Gıda katkı maddesi ferrolaktat (e585)'in *Drosophila melanogaster*'de yaptığı genotoksik etkilerin smart testi ve comet assay yöntemiyle belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 123.

- Farag, A.T. and Ibrahim, H.H., 2007. Developmental toxic effects of antifungal flusilazole administered by gavage to mic. *Birth Defects Research Part B: Developmental and Reproductive Toxicology*, **80**, 12-17.
<https://doi.org/10.1002/bdrb.20098>
- Fauzi, A., Zubaidah, S., and Susanto, H., 2020. The study of larva and adult behavior of *Drosophila melanogaster*: Do strains affect behavior?. *AIP Conference Proceedings*, **1**, 2231.
<https://doi.org/10.1063/5.0002429>
- Gajski, G., Ravlić, S., Godschalk, R., Collins, A., Dusinska, M., and Brunborg, G., 2021. Application of the comet assay for the evaluation of DNA damage in mature sperm. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, **788**, 108398.
<https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2021.108398>
- Ghosoph, J.M., Schmidt, L.S., Margosan, D.A. and Smilanick, J.L., 2007. Imazalil resistance linked to a unique insertion sequence in the PdCYP51 promoter region of *Penicillium digitatum*. *Postharvest biology and technology*, **44(1)**, 9-18.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.11.008>
- Haegler, P., Joerin, L., Krähenbühl, S. and Bouitbir, J., 2017. Hepatocellular toxicity of imidazole and triazole antimycotic agents. *Toxicological Sciences*, **157(1)**, 183-195.
<https://doi.org/10.1093/toxsci/kfx029>
- Haverkate, F., Tempel, A. and Den Held, A.J., 1969. Interaction of 2, 4, 5-trichlorophenylsulphonylmethyl thiocyanate with fungal spores. *Netherlands journal of plant pathology*, **75**, 308-315.
<https://doi.org/10.1007/BF02015493>
- Hersperger, F., Kastl, M., Paeschke, K., and Kierdorf, K., 2023. Hemocyte nuclei isolation from adult *Drosophila melanogaster* for snRNA-seq. In *Tissue-resident macrophages: Methods and Protocols* (pp. 71-79). New York, NY: Springer US.
- Huang, S., Huang, M., Tian, S., Meng, Z., Yan, S., Teng, M., ... and Zhu, W., 2022. Imazalil and its metabolite imazalil-M caused developmental toxicity in zebrafish (*Danio rerio*) embryos via cell apoptosis mediated by metabolic disorders. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, **184**, 105113.
<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2022.105113>
- Irving, P., Ubeda, J.M., Doucet, D., Troxler, L., Lagueux, M., Zachary, D., ... and Meister, M., 2005. New insights into *Drosophila* larval haemocyte functions through genome-wide analysis. *Cellular microbiology*, **7(3)**, 335-350.
<https://doi.org/10.1111/j.1462-5822.2004.00462.x>
- Isin, S. and Yildirim, I., 2007. Fruit-growers' perceptions on the harmful effects of pesticides and their reflection on practices: The case of Kemalpaşa, Turkey. *Crop protection*, **26(7)**, 917-922.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.08.006>
- Jeibmann, A. and Paulus, W., 2009. *Drosophila melanogaster* as a model organism of brain diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, **10**, 407-440.
<https://doi.org/10.3390/ijms10020407>
- Jin, C., Zhang, R., Fu, Z. and Jin, Y., 2019. Maternal exposure to imazalil disrupts the endocrine system in F1 generation mice. *Molecular and cellular endocrinology*, **486**, 105-112.
<https://doi.org/10.1016/j.mce.2019.03.002>
- Kamal, A., Ahmad, F. and Shafeeque, M.A., 2020. Toxicity of pesticides to plants and non-target organism: A comprehensive review. *Iranian Journal of Plant Physiology*, **10**, 3299-3313.
<https://doi.org/10.22034/ijpp.2020.1885628.1183>
- Kamel, F. and Hoppin, J.A., 2004. Association of pesticide exposure with neurologic dysfunction and disease. *Environmental Health Perspectives*, **112**, 950-958.
<https://doi.org/10.1289/ehp.7135>
- Kaygısız, Ş.Y. and Çiğerci, İ.H., 2017. Genotoxic evaluation of different sizes of iron oxide nanoparticles and ionic form by SMART, Allium and comet assay. *Toxicology and industrial health*, **33(10)**, 802-809.
<https://doi.org/10.1177/0748233717722907>
- Kurşun, A.Y., Güneş, M., Yalçın, B., Ertuğrul, H. and Kaya, B., 2022. Bazı fungusitlerin genotoksik potansiyellerinin *Drosophila smart* ve komet yöntemleri ile araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **26**, 122-131.
<https://doi.org/10.19113/sdufenbed.984820>
- Kurşun, A.Y., Yalçın, B., Güneş, M., Tagorti, G. and Bülent, K., 2022. *Drosophila melanogaster*'in somatik hücrelerinde kobalt nanopartiküllerinin indüklediği genotoksititeye karşı resveratrol'ün antigenotoksik etkisi. *Eurasian Journal of Biological and Chemical Sciences*, **5(2)**, 50-55.
<https://doi.org/10.46239/ejbcs.1069388>
- Kurşun, A.Y., Yalçın, B., Güneş, M. and Tagort T., 2021. MgO nanopartiküllerinin *Drosophila melanogaster* üzerindeki davranışsal toksisitesinin değerlendirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **21**, 1283-1294.
<https://doi.org/10.35414/akufemubid.931922>

- Lucas, J.A., Hawkins, N.J. and Fraaije, B.A., 2015. The evolution of fungicide resistance. *Advances in applied microbiology*, **90**, 29-92.
<https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2014.09.001>
- McKellar, C.E. and Wyttenbach, R.A., 2017. A protocol demonstrating 60 different *Drosophila* behaviors in one assay. *Journal of Undergraduate Neuroscience Education*, **15**, A110.
- Menegola, E., Broccia, M.L., Di Renzo, F. and Giavini, E., 2006. Dymorphogenic effects of some fungicides derived from the imidazole on rat embryos cultured in vitro. *Reproductive Toxicology*, **21**, 74-82.
<https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2005.07.008>
- Nas, B., 2019. Nikel demir oksit nanopartikülünün genotoksitesinin *Drosophila melanogaster*'de somatik mutasyon ve rekombinasyon testi (smart) ile araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan, 76.
- Pereira, P.C.G., Soares, L.O.S., Júnior, S.F.S., Saggiaro, E.M. and Correia, F.V., 2020. Sub-lethal effects of the pesticide imazalil on the earthworm *Eisenia andrei*: reproduction, cytotoxicity, and oxidative stress. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 33474-33485.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-05440-3>
- Pérez-Ortega, P., Lara-Ortega, F.J., Gilbert-López, B., Moreno-González, D., García-Reyes, J.F. and Molina-Díaz, A., 2017. Screening of over 600 pesticides, veterinary drugs, food-packaging contaminants, mycotoxins, and other chemicals in food by ultra-high performance liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry (UHPLC-QTOFMS). *Food Analytical Methods*, **10**, 1216-1244.
<https://doi.org/10.1007/s12161-016-0678-0>
- Schneider, E.P. and Dickert, K.J., 1994. Health costs and benefits of fungicide use in agriculture: a literature review. *Journal of Agromedicine*, **1**, 19-37.
https://doi.org/10.1300/J096v01n01_03
- Schwarzbacherová, V., Šiviková, K., Drážovská, M. and Dianovský, J., 2015. Evaluation of DNA damage and cytotoxicity induced by triazole fungicide in cultured bovine lymphocytes. *Caryologia*, **68(3)**, 233-238.
<https://doi.org/10.1080/00087114.2015.1032613>
- Sheehan, D.J., Hitchcock, C.A. and Sibley, C.M., 1999. Current and emerging azole antifungal agents. *Clinical microbiology reviews*, **12(1)**, 40-79.
<https://doi.org/10.1128/cmr.12.1.40>
- Siegel, M.R. and Ragsdale, N.N., 1978. Antifungal mode of action of imazalil. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, **9(1)**, 48-56.
[https://doi.org/10.1016/0048-3575\(78\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0048-3575(78)90063-9)
- Silva, A.M., Martins-Gomes, C., Ferreira, S.S., Souto, E.B. and Andreani, T., 2022. Molecular physicochemical properties of selected pesticides as predictive factors for oxidative stress and apoptosis-dependent cell death in Caco-2 and HepG2 cells. *International Journal of Molecular Sciences*, **23**, 8107.
<https://doi.org/10.3390/ijms23158107>
- Spanó, M.A., Frei, H., Würzler, F.E. and Graf, U., 2001. Recombinagenic activity of four compounds in the standard and high bioactivation crosses of *Drosophila melanogaster* in the wing spot test. *Mutagenesis*, **16(5)**, 385-394.
<https://doi.org/10.1093/mutage/16.5.385>
- Şişman, T. and Türkez, H., 2010. Toxicologic evaluation of imazalil with particular reference to genotoxic and teratogenic potentials. *Toxicology and industrial health*, **26(10)**, 641-648.
<https://doi.org/10.1177/0748233710375951>
- Yalçın, B., 2017. MgO ve CeO₂ nanopartiküllerinin ve iyonik formlarının genotoksik etkilerinin *Drosophila smart* testi ile araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, 62.
- Yu, J.W., Song, M.H., Keum, Y.S. and Lee, J.H., 2023. Metabolomic approach of azole fungicides in radish (*Raphanus sativus*): Perspective of functional metabolites. *Journal of Hazardous Materials*, **448**, 130937.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130937>

Beauveria bassiana Vuillemin İzolatlarının *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) Üzerine Ovisidal Etkisi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 01.11.2023

Kabul/Accepted: 12.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Ovicidal Effect of *Beauveria bassiana* Vuillemin Isolates on *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae)

Mert Yılmaz UYSAL , Melike OBUT , Asiye UZUN YİĞİT* 

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Isparta, Türkiye.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu çalışma ile *Beauveria bassiana*'nın BY2 (Burdur, Yeşilova), BIM-001 (Isparta, Merkez) ve IGÇ (Isparta, Merkez) izolatlarının üç farklı dozunun (1×10^6 spor/ml, 1×10^7 spor/ml ve 1×10^8 spor/ml) *Tetranychus urticae* üzerinde ovisidal etkisinin laboratuvar koşullarında belirlenmesi hedeflenmiştir. Ticari preparat Nostalgist (Agrobrest Grup Ltd. Şti, *Beauveria bassiana* Bb-1 irki) ve kontrol olarak Tween 80 (% 0,1) içeren saf su kullanılmıştır. Denemeler plastik petrilere (9 cm) 5 tekerrürlü olarak yürütülmüştür. Fasulye yaprak diskleri (4 cm) petri plakasında tutulan steril suya doymuş pamuk üzerinde yerleştirilmiştir. Daha sonra 10 ergin birey, yaprak disklere aktararak yumurta bırakmalarına izin verilmiştir. Her bir petri plakasında 20 yumurta/yaprak diski olacak şekilde ayarlanmıştır. Her bir entomopatojen fungus izolatına ait spor süspansiyonu 4 bar basınçta püskürtme sağlayan modifiye edilmiş bir düzenek yardımıyla 10 sn süre ile yumurta içeren yaprak disklerin üzerine uygulanmıştır. Gözlemlere uygulamadan 24 saat sonra başlanarak yumurta ölümleri kaydedilmiştir. Sonuç olarak, *B. bassiana* BIM-001, BY2 ve IGÇ izolatlarının 1×10^8 spor/ml konsantrasyonları uygulandıktan 7 gün sonra *T. urticae* yumurtalarında meydana gelen ölüm oranları sırasıyla %71, %66 ve %59 olarak belirlenmiştir. *Beauveria bassiana* strain Bb-1 uygulaması diğer entomopatojen fungus izolatlarına ait uygulamalardan istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bununla birlikte *B. bassiana* BIM-001 1×10^8 , 1×10^7 spor/ml ve *B. bassiana* BY2 1×10^8 spor/ml uygulamalarındaki ölüm oranları arasında fark olmadığı saptanmıştır ($p < 0.005$).

Anahtar Kelimeler Mikrobiyal mücadele, Entomopatojen fungus, Spor süspansiyonu, İki noktalı kırmızı örümcek

Abstract

This study aimed to determine the ovicidal effect of three different doses (1×10^6 spore/ml, 1×10^7 spore/ml and 1×10^8 spore/ml) of *Beauveria bassiana* isolates BY2 (Burdur, Yeşilova), BIM-001 (Isparta, Center) and IGÇ (Isparta, Center) on *Tetranychus urticae* under laboratory conditions. The commercial preparation Nostalgist (Agrobrest Company, *Beauveria bassiana* strain Bb-1) and water containing Tween 80 (0,1%) were used as control. Experiments were carried out in plastic petri dishes (9 cm) with 5 replications. Bean leaf disks (4 cm) were placed on sterile water-saturated cotton held in a Petri plate. Then, 10 adult individuals were transferred to leaf discs and allowed to lay eggs. Each petri plate was set to contain 20 eggs/leaf discs. The spore suspension of each entomopathogenic fungus isolate was applied to the leaf discs containing eggs for 10 seconds with the help of a modified device that provides spraying at 4 bar pressure. Observations started 24 hours after the application and egg deaths were recorded. As a result, 7 days after application of 1×10^8 spore/ml concentrations of *B. bassiana* BIM-001, BY2, and IGÇ isolates, the mortality rates in *T. urticae* eggs were determined as 71%, 66%, and 59%, respectively. Application of *B. bassiana* strain Bb-1 was found to be statistically significant compared to applications of other entomopathogenic fungus isolates. However, it was determined that there was no difference between the mortality rates in *B. bassiana* BIM-001 1×10^8 , 1×10^7 spore/ml and *B. bassiana* BY2 1×10^8 spore/ml applications ($p < 0.005$).

Keywords Microbial control, Entomopathogenic fungus, Spore suspension, Two-spotted spider mite

1. Giriş

İki noktalı kırmızı örümcek *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae), Dünyada tarımsal alanlarda geniş ölçüde yayılmış önemli polifag bir zararlı türdür. Bu zararlının sebzeler başta olmak üzere, meyveler, mısır, pamuk, süs bitkileri ve yabancı otları kapsayan çok sayıda konukçusunun olduğu bildirilmektedir (Migeon vd. 2010). Kırmızı örümcekler popülasyon yoğunluğuna bağlı olarak önemli ekonomik kayıplara yol açmakta ve maalesef bu

zararlılar yoğun pestisit kullanımıyla dahi kontrol edilememektedir (Atalay ve Kumral 2013). Ayrıca, bu zararlının fitofag beslenmesi, yüksek üreme potansiyeli ve kısa yaşam döngüsü, çoğu zaman birkaç uygulamadan sonra birçok akar site karşı hızlı direnç gelişimini kolaylaştırmaktadır (Keena ve Granett 1990, Devine vd. 2001, Stumpf ve Nauen 2001, Sato vd. 2005). *Tetranychus urticae*'nin akar sitelere karşı ilk direnç gelişimi genellikle bir akar sitinin piyasaya sürülmesinden birkaç yıl sonra kaydedilmektedir (De Rouck vd. 2023). Bununla birlikte *T.*

urticae'nin farklı etken madde içeren çok sayıda akarisit ve pestisitlere karşı yüksek seviyede direnç geliştirdiği bildirilmiştir (Riga vd. 2014; Pavlidi vd. 2015; Adesanya vd. 2018; Wu vd. 2019; Xue vd.2022; Njiru vd. 2023).

Günümüzde tarımsal üretim alanlarında aşırı miktarda sentetik ve kimyasal girdi kullanımının çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri giderek artmaktadır. Sürdürülebilir tarım uygulamalarının devamlılığı zararlılarla mücadelede kimyasal pestisit kullanımının minimum düzeye indirilmesi ile çevre dostu alternatif kontrol stratejilerinin geliştirilmesi ile daha mümkün hale gelebilecektir. Sürdürülebilir tarım; çevre ve biyolojik çeşitliğin korunması, kimyasal kalıntıların azaltılması, bozulan ekolojik dengenin yeniden oluşturulması için gerekli koşulların sağlanması ile desteklenmelidir (Azizoğlu vd. 2012).

Tarımsal üretim alanlarında kimyasal pestisitlere alternatif yöntemlerden en çok tercih edilen strateji, biyolojik mücadele yöntemidir. Biyolojik kontrolde, entomopatojen fungusların uygulanması; daha fazla çevre bilinci, gıda güvenliği endişeleri ve giderek artan sayıda pestisite dayanıklı türler ve geleneksel kimyasalların başarısızlığı nedeniyle önemli ölçüde artmaktadır (Rai vd. 2014).

Entomopatojen fungusların pek çok türü ticari olarak üretilmekte ve dünyanın pek çok yerinde zararlı türlere karşı kullanılmaktadır. Bu funguslar zararlıların dış kütikulası üzerinden enfeksiyona sebep olur ve hastalığı başlatmak için zararlı tarafından yenilmelerine gerek yoktur. Bu özellik fungusları bitki özsuğu ile beslenen zararlılarla mücadelede primer adaylar haline getirmektedir (Sevim vd. 2015). Buradan yola çıkılarak *T. urticae* bireylerinin mücadelesinde entomopatojen fungusların önemli potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında, bu zararlının üreme potansiyelinin yüksek olması ve çok sayıda yumurta bırakması nedeniyle yerel entomopatojen fungus izolatlarının *T. urticae* üzerinde ovisidal etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışmanın ana materyalleri olarak *T. urticae* popülasyonlarına ait bireyler (Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Entegre Mücadele Laboratuvarı), *B. bassiana*'nın üç farklı izolatı BY2 (Burdur, Yeşilova), BIM-001 (Isparta, Merkez) ve IGÇ (Isparta, Merkez)'nin üç dozu (1×10^6 spor/ml, 1×10^7 spor/ml ve 1×10^8 spor/ml), ticari preparat Nostalgist

(Agrobrest Grup Ltd. Şti, *Beauveria bassiana* Bb-1 ırkı) kullanılmıştır.

2.2. Bitki üretimi

Phaseolus vulgaris L. (Fabales: Fabaceae) bitkileri iklim odası koşullarında 25 ± 2 °C sıcaklık, 65 ± 5 nem, 16: 8 fotoperiyot) üretilmiştir. Fasulye tohumları 15 cm çapında plastik saksılarda daha önceden steril edilmiş toprak karışımı kullanılarak (toprak+organik madde) ekilmiştir. *Tetranychus urticae* üretimini devam ettirmek ve denemelerde kullanılan yaprak disklerin sağlanması için bitki üretimine periyodik olarak devam edilmiştir.

2.3. İki noktalı kırmızı örümcek çoğaltımı

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü iklim odasında 2018 yılından itibaren üretimi yapılan *T. urticae* popülasyonlarına ait bireylerin yumurtaları kullanılmıştır. Erginlerinin çoğaltımı, 25 ± 1 °C sıcaklık ve 65 ± 10 nem oranında uzun gün aydınlatmalı iklim odalarında fasulye bitkileri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

2.4. Entomopatojen fungus izolatlarının üretimi

Beauveria bassiana BY2, BIM-001 ve IGÇ izolatları PDA (patates dekstrozu agar) ortamı üzerinde kültüre alınarak ve 10 gün süre ile 25 °C'de karanlık koşullarda inkübe edilmiştir. Her bir izolattan spor süspansiyonu hazırlanmıştır. Thoma lamında ışık mikroskobu altında spor sayımı yapılmış ve 1×10^6 spor/ml, 1×10^7 spor/ml ve 1×10^8 spor/ml yoğunluğunda 100 ml'lik spor süspansiyonları hazırlanmış ve süspansiyonlara Tween 80 (% 0,1) ilave edilmiştir.

2.5. Petri denemeleri

Denemeler, 9 cm çapındaki plastik petri kaplarında 5 tekerrürlü olarak yürütülmüştür. Fasulye yaprağı diskleri (4 cm) kesilerek ve petri kaplarındaki steril suya doymuş pamuk üzerinde yerleştirilmiştir. Daha sonra 10 ergin birey, yaprak disklerine yumuşak uçlu fırça yardımıyla aktararak yumurta bırakmalarına izin verilmiştir. Ergin bireyler bırakıldıktan 18 saat sonra, stereomikroskop altında yumurtalar sayılarak, sayıları 20 yumurta/yaprak diski olarak ayarlanmıştır. *Beauveria bassiana*'nın üç farklı izolatının (BY2, BIM-001 ve IGÇ)'nin 1×10^6 spor/ml, 1×10^7 spor/ml ve 1×10^8 spor/ml olmak üzere üç farklı spor konsantrasyonu hazırlanmıştır. Nostalgist, kontrol ve her bir entomopatojen fungus izolatına ait spor süspansiyonu, 4 bar basınçta püskürtmeyi sağlayan modifiye edilmiş bir düzenek yardımıyla 10 sn süre ile yumurta içeren yaprak disklerin üzerine uygulanmıştır. Kontrol olarak Tween 80

(% 0,1) içeren saf su kullanılmıştır. Püskürtme işleminden sonra petriker kontrollü laboratuvar koşullarında tutulmuştur. Gözlemlere uygulamadan 24 saat sonra başlanarak yumurta açılımları kaydedilmiştir.

Denemelerden elde edilen verilere Abbot formülü [Düzeltilmiş yüzde ölüm oranı= [(A-B) / A]*100 (A: Kontrolde canlı birey sayısı, B: Uygulama dozundaki canlı birey sayısı)] uygulanarak % ölüm oranları hesaplanmıştır (Abbott 1925). Elde edilen veriler varyans analizine tabi tutulmuş (One-Way ANOVA), benzer ve farklı grupları belirlemek için de Tukey (HSD) çoklu karşılaştırma testi yapılmıştır. İstatistiksel analizler SPSS® 20.0 paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre; *B. bassiana* BIM-001'in 1×10^6 spor/ml, 1×10^7 spor/ml ve 1×10^8 spor/ml konsantrasyonları uygulandıktan 7 gün sonra *T. urticae* yumurtalarında meydana gelen ölüm oranları sırası ile %62, %68 ve %71'dir. *Beauveria bassiana* BY2 uygulamasında 1×10^6 spor/ml, 1×10^7 spor/ml ve 1×10^8 spor/ml konsantrasyonlarında *T. urticae* yumurtalarında sırasıyla %55, %59 ve %66 ölüm belirlenmiştir. *Beauveria bassiana* IGÇ uygulamasında ise sırası ile %43, %49 ve %59 ölüm oranları saptanmıştır. *Beauveria bassiana* Bb-1 ırkı içerikli ticari preparat uygulamasında *T. urticae* yumurtalarında %77 ölüm meydana gelmiştir. Çalışmada kullanılan entomopatojen fungus izolatlarının *T. urticae* yumurta dönemi üzerinde meydana gelen ölüm oranlarının istatistiksel olarak önemli olduğu belirlenmiştir. Nostalgist uygulaması diğer entomopatojen fungus izolatlarına ait uygulamalardan istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bununla birlikte *B. bassiana* BIM-001 1×10^8 , 1×10^7 spor/ml ve *B. bassiana* BY2 1×10^8 spor/ml uygulamalarındaki ölüm oranları arasında fark olmadığı saptanmıştır ($F_{9,40}=15,294$, $P=0,000$) (Çizelge 1).

4. Tartışma ve Sonuç

Tetranychus urticae'nin açık ya da kapalı tarımsal üretim alanlarında 3.877'den fazla farklı konukçu bitki türüyle beslendiği ve en az 150 bitki türüne ekonomik zarar verdiği bilinmektedir (Elhakim vd. 2020, Daniels vd. 2023). İki noktalı kırmızı örümcek kontrolünde tercih edilen ana yöntem akarisit ve insektisitleri kapsayan kimyasal mücadeledir (Wu vd. 2019). Ancak bu kimyasal pestisitlerin predatörlerin sayısını ve avlanma baskısını azaltarak kimyasal pestisitlerin artan kullanımının bu zararlı popülasyonunun artışına katkıda bulunabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, bu zararlı tür çok geniş konukçu bitki yelpazesi, son derece kısa yaşam döngüsü,

yüksek doğurganlığı ve kışlama stratejisi nedeniyle kontrolünde kullanılan mevcut akarisitlerin çoğuna karşı hızla direnç geliştirmiştir (Adesanya vd. 2021). Bu gibi nedenlerle predatör akarlar, böcekler (Calderwood vd. 2015, Gong vd. 2018) ve entomopatojen funguslar (Gámez-Guzmán vd. 2019) küresel ölçekte *T. urticae*'yi kontrol etmek için kimyasal pestisitlere potansiyel alternatifler olarak değerlendirilmelidir.

Çizelge 1. *Beauveria bassiana*'nın farklı izolatlarına ait spor süspansiyonlarının *Tetranychus urticae* yumurta dönemi üzerindeki ovisidal etkisi.

Uygulamalar	Dozlar	Ölüm oranları (%) ± std. hata
<i>Beauveria bassiana</i> BIM-001	1×10^8 spor/ml	71 ± 2.44 ab*
	1×10^7 spor/ml	68 ± 2.00 ab
	1×10^6 spor/ml	62 ± 4.06 bc
<i>Beauveria bassiana</i> BY2	1×10^8 spor/ml	66 ± 2.91 abc
	1×10^7 spor/ml	59 ± 1.87 cd
	1×10^6 spor/ml	55 ± 1.58 cde
<i>Beauveria bassiana</i> IGÇ	1×10^8 spor/ml	59 ± 3.31 bcd
	1×10^7 spor/ml	49 ± 2.44 de
	1×10^6 spor/ml	43 ± 2.55 e
Nostalgist	1×10^8 kob/ml	77 ± 2.00 a

*Bir sütunda bulunan harfler farklı ise istatistiksel bir farklılık vardır ($p < 0.005$).

Entomopatojen funguslar genellikle insanlara, çevreye veya hedef olmayan türlere zararsız olarak bilinmektedir (Al zahrani vd. 2023). Bunlar içerisinde birçok akar türüne karşı en yaygın olarak tanınan entomopatojen fungus *B. bassiana* olup, akar popülasyonunu azaltmada başarılı olduğu belirlenmiştir. Zhang vd. (2014), *B. bassiana* uygulandıktan 24 saat sonra *T. urticae* yumurtaları üzerinde fungal konidilerin çimlendiğini ve uygulamadan 48 saat sonra ise fungusun penetrasyon çivisi oluşturarak yumurtayı deforme ettiğini bildirmişlerdir. Irigaray vd. (2003) önemli bir tarım zararlısı olan *T. urticae*'nin ergin ve yumurtaları üzerinde *B. bassiana*'nın mikoinsektisit olarak kullanılabileceğini tespit etmişlerdir. *Beauveria bassiana*'nın farklı izolatlarının spor süspansiyonlarının *T. urticae* yumurtaları üzerindeki etkilerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Shi ve Feng (2004) *B. bassiana* Bb2860 izolatının *T. cinnabarinus* yumurtalarına uygulandıktan 9 gün sonra %67,4±6,8 ölüm meydana geldiğini belirlemiştir. Erler vd. (2013), sera koşullarında hıyar bitkilerinde zararlı *T. cinnabarinus*'un yumurtalarına karşı *B. bassiana*'nın 4×10^9 konidi/ml konsantrasyonunu farklı oranlarda (1, 1,5 ve 2 l/ha) uyguladıklarında 2010 yılında %81,7 ve 2011 yılında %78,1 ölüm meydana geldiğinin saptamıştır. Bugeme vd. (2014) laboratuvar koşullarında *B. bassiana*'nın 4 farklı konsantrasyonunun (3×10^5 , 1×10^6 , 3×10^6 ve 1×10^7 konidi/ml) *T. urticae* yumurtalarının canlılığına etkisini araştırmış ve sırası ile

%60,2, %50,8, %34,7 ve %27,4 ölüme neden olduklarını bildirmiştir. Negash vd. (2014) *B. bassiana* 9614 ve 9609 izolatlarının 1×10^8 konidi/ml süspansiyonunu uygulandıktan yedi gün sonra *T. urticae* yumurtalarında sırası ile %82 ve %65 ölüm meydana geldiğini saptamışlardır. Bu çalışmada kullanılan BIM-001, BY2 ve IGÇ'nin 1×10^8 spor/ml konsantrasyonlarında ise *T. urticae* yumurtalarında %59-71 ölüm meydana gelmiştir. Afifi vd. (2015) Mısır' da 2013 ve 2014 yıllarında domates üretim alanlarında *T. urticae*'nin mücadelesine yönelik yürüttükleri çalışmada 1×10^9 konidi/ml yoğunluğundaki *B. bassiana* içerikli ticari preparat Bio-Power'ın *T. urticae*'nin yumurta döneminde %34,13 ve %30,07 azalmaya neden olduğunu saptamıştır. Bu çalışma da kullanılan Nostalgist petri denemelerinde *T. urticae* yumurta döneminde %77 ölüme neden olmuştur. Doğan (2016), *B. bassiana*'nın 1×10^7 konidi/ml süspansiyonunu püskürtme yöntemi ile *T. urticae* yumurtalarına uyguladıktan 7 gün sonra meydana gelen ölüm oranlarını petri denemelerinde %11,8, saksı denemelerinde ise %14,8 olarak belirlemiştir. Hassan vd. (2017) *B. bassiana*'nın 4 farklı izolatının (B1, B2, B3, B4) 10^6 , 10^7 ve 10^8 spor/ml dozlarının *T. urticae* yumurtalarına etkisini araştırmışlardır. *Beauveria bassiana* izolatlarına ait süspansiyonlar uygulandıktan 7 gün sonra, B1, B2, B3 ve B4 izolatlarında açılma oranları 10^6 spor/ml için %93,29-80,2; 10^7 spor/ml için %87,26-36,38; 10^8 spor/ml için ise %68,07-25,2 olarak saptanmıştır. Yapılan çalışmada, BIM-001, BY2 ve IGÇ'nin 1×10^6 spor/ml konsantrasyonunda %43-62, 1×10^7 spor/ml konsantrasyonunda %49-68 ve 1×10^8 spor/ml uygulamasında ise %59-71 ölüm saptanmıştır. Wu vd. (2020) *B. bassiana* izolatlarının (GZGY-1-3, LNSZ-26, SDDZ-9, XJWLMQ-32, SCWJ-2 ve JXJGS-1) saksı denemelerinde kontrol ile karşılaştırıldığında uygulamadan 7 gün sonra *T. urticae* yumurtalarının ortalama yoğunluğunda %38,7-55,2 oranında düşüşe neden olduğunu belirlemiştir. Laboratuvar denemelerinde ise *B. bassiana* izolatlarının uygulamadan 7 gün sonra *T. urticae* yumurtalarında %2,7-3,8 oranında ölüme neden olduğu saptanmıştır. *Tetranychus urticae*'den izole edilen *B. bassiana* GZGY-1-3 izolatının uygulamadan 10 gün sonra kontrolle karşılaştırıldığında *T. urticae* yumurtalarında açılma oranlarının %79,0-86,3 ve %78,4-88,6 olduğu gözlenmiştir. Yürütülen bu çalışmada ise *B. bassiana* BIM-001, BY2 ve IGÇ'nin 1×10^6 spor/ml, 1×10^7 spor/ml ve 1×10^8 spor/ml konsantrasyonları uygulandıktan 7 gün sonra *T. urticae* yumurtalarında meydana gelen ölüm oranları sırası ile %62-71; %55-66; %43-59 olarak belirlenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda *T. urticae* yumurtalarında meydana gelen ölüm oranlarının bu çalışma sonuçlarına benzer ölüm oranlarına neden olduğu gibi daha düşük ya da daha yüksek oranlara ulaştığı da görülmektedir. Bu

kapsamda entomopatojen fungusların akar yumurtalarına karşı ovisidal aktiviteleri yumurta besin maddelerini almak için uzanan fungusun hiflerine dayanır ve bu da embriyonun bozulmasına neden olmaktadır (Zhang vd. 2014). Bu nedenle akar yumurtalarına duyarlılıktaki farklılık, entomopatojen fungus ırkları arasındaki farklı özelliklerden kaynaklanabilir (Wu vd. 2020). Yumurta miktarı ve canlılığı, zararlı akar popülasyonlarının gelişimi için çok önemlidir ve dolayısıyla popülasyon kontrolü için önemli bir hedefdir (Bostanian vd. 2007; Wu vd. 2020). Entomopatojen fungus izolatlarından *B. bassiana* BIM-001 izolatının 1×10^8 spor/ml konsantrasyonunun çalışmada yer verilen diğer izolatlara göre laboratuvar koşullarında *T. urticae*'nin yumurta dönemi üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Deney, Yazma, Proje Yürütücüsü

Yazar 2: Kaynaklar, Deney, Yazma, Proje Ortağı

Yazar 3: Araştırma, Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Yazma/inceleme ve düzenleme, Akademik Danışman

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

Yazarlar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan ederler.

Teşekkür

2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında çalışmayı desteklediği için TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB)'na teşekkür ederiz (Proje No: 1919B01). Entomopatojen fungus izolatlarının temin edildiği Prof. Dr. Ozan DEMİRÖZER (Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü)'e teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

- Abbott, W.S., 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, **18**, 265-267.
<http://dx.doi.org/10.1093/jee/18.2.265a>
- Adesanya, A.W., Morales, M.A., Walsh, D.B., Lavine, L.C., Lavine, M.D. and Zhu, F. 2018. Mechanisms of resistance to three mite growth inhibitors of *Tetranychus urticae* in hops. *Bulletin of Entomological Research*, **108**, 23-34.
<https://doi.org/10.1017/S0007485317000414>

- Adesanya, A.W., Lavine, M.D., Moural, T.W., Lavine, L.C., Zhu, F. and Walsh, D.B., 2021. Mechanisms and management of acaricide resistance for *Tetranychus urticae* in agroecosystems. *Journal of Pest Science*, **94**, 639–663.
<https://doi.org/10.1007/s10340-021-01342-x>
- Afifi, A. M., Ali, F. S., El-Saiedy, E. M. A. and Ahmed, M. M. 2015. Compatibility and integration of some control methods for controlling *Tetranychus urticae* Koch infesting tomato plants. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, **25** (1), 75-82.
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102910>
- Al-Zahrani, J.K., Al-Abdalall, A.H., Osman, M.A., Aldakheel, L.A., AlAhmady, N.F., Aldakeel, S.A., AbdulAzeez, S., Borgio, J.F., ElNaggar, M.A., Alabdallah, N.M. and Almustafa, M.M., 2023. Entomopathogenic fungi and their biological control of *Tetranychus urticae*: Two-spotted spider mites. *Journal of King Saud University Science*, **35**, 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102910>
- Atalay, E. and Kumral, N. A. 2013. Biocigal features and life tables of *Tetranychus urticae* (Koch) (Acari: Tetranychidae) on different table tomato varieties. *Turkish Journal of Entomology*, **37** (3), 329-342.
- Azizoğlu, U., Bulut, S. and Yılmaz, S., 2012. Organik tarımda biyolojik mücadele; entomopatojen biyoinsektisitler. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **28** (5), 375-381.
- Bostanian, N.J., Hardman, J.M., Racette, G. and Franklin, J.L., 2007. The relationship between winter egg counts of the European red mite *Panonychus ulmi* (Acari: Tetranychidae) and its summer abundance in a reduced spray orchard. *Experimental and Applied Acarology*, **42**, 185–195.
<https://doi.org/10.1007/s10493-007-9078-x>
- Bugeme, D.M., Knapp, M., Boga, H.I., Ekesi, S. and Maniania, N.K., 2014. *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) to infection by *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* (Hypocreales: Clavicipitaceae). *International Journal of Tropical Insect Science*, **34** (3), 190–196.
<https://doi.org/10.1017/S1742758414000381>
- Calderwood, L.B., Lewins, S.A. and Darby, H.M., 2015. Survey of northeastern hop arthropod pests and their natural enemies. *Journal of Integrated Pest Management*, **6** (1), 18.
<https://doi.org/10.1093/jipb m/pmv017>
- Daniels, A., Maharaj, G., Ram, M. and Lakenarine, R., 2023. Biological control methods for agricultural mites: A review. *Agricultural Reviews*, **44** (1), 12–21.
<https://doi.org/10.18805/ag.RF-247>
- De Rouck, S., Inak, E., Dermauwa, W. and Van Leeuwen, T. 2023. A review of the molecular mechanisms of acaricide resistance in mites and ticks Sander. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, **156**, 1-22.
<https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2023.103981>
- Devine, G.J., Barber, M. and Denholm, I., 2001. Incidence and inheritance of resistance to METI-acaricides in European strains of the two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*) (Acari: Tetranychidae). *Pest Management Science*, **57**, 443-448.
<https://doi.org/10.1002/ps.307>
- Doğan Y.Ö., 2016. Entomopatojen fungusların *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae)' ye karşı etkinliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın, 39.
- Elhakim, E., Mohamed, O. and Elazouni, I., 2020. Virulence and proteolytic activity of entomopathogenic fungi against the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, **30** (1), 1–8.
<https://doi.org/10.1186/s41938-020-00227-y>
- Erler, F., Ateş, A.O. and Bahar, Y., 2013. Evaluation of two entomopathogenic fungi, *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae*, for the control of carmine spider mite, *Tetranychus cinnabarinus* (Boisduval) under greenhouse conditions. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, **23**, 233-240.
- Gámez-Guzmán, A., Torres-Rojas, E. and Gaigl, A., 2019. Potential of a *Cladosporium cladosporioides* strain for the control of *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) under laboratory conditions. *Agronomía Colombiana*, **37** (1), 84–89.
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n1.73353>
- Gong, Y.J., Chen, J.C., Zhu, L., Cao, L.J., Jin, G.H., Hoffmann, A.A., Zhong, C.F., Wang, P., Lin, G. and Wei, S. J., 2018. Preference and performance of the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) on strawberry cultivars. *Experimental and Applied Acarology*, **76**, 185–196.
<https://doi.org/10.1007/s10493-018-0295-2>
- Hassan, D.M.A., Rizk, M.A., Sobhy, H.M., Mikhail, W.Z.A. and Nada, M.S., 2017. Virulent Entomopathogenic Fungi against The Two-Spotted Spider Mite *Tetranychus urticae* and some Associated Predator Mites as Non Target Organisms. *Egyptian Academic*

- Journal of Biological Sciences (A Entomology)*, **10** (6), 37- 56.
<https://doi.org/10.21608/EAJB.2017.12124>
- Irigaray, F.J.S., Marco-Mancebon, V. and Perez-Moreno, I., 2003. The entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* and its compatibility with triflumuron: effects on the twospotted spider mite *Tetranychus urticae*. *Biological Control*, **26** (2), 168-173.
[https://doi.org/10.1016/S1049-9644\(02\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S1049-9644(02)00123-8)
- Keena, M.A. and Granett, J., 1990. Genetic analysis of propargite resistance in Pacific spider mites and twospotted spider mite (Acari: Tetranychidae). *Journal of Economic Entomology*, **83**, 655-661.
<https://doi.org/10.1093/jee/83.3.655>
- Migeon, A., Nouguié, E. and Dorkeld, F., 2010. Trends in Acarology. Spider Mites Web: A Comprehensive Database for the Tetranychidae. Springer, Amsterdam, 557-560.
- Negash, R., Dawd, M. and Azerefegne, F. 2014. Pathogenicity of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae*, to the Two Spotted Spider Mites, *Tetranychus urticae*, (Acari: Tetranychidae) at different temperatures and in greenhouse condition. *Ethiopian Journal of Agricultural Sciences*, **24**, 51-58.
<https://doi.org/10.1007/s10493-005-0508-3>
- Njiru, C., Vandenhole, M., Jonckheere, W., Wybouw, N. and Van Leeuwen, T. 2023. The host plant strongly modulates acaricide resistance levels to mitochondrial complex II inhibitors in a multi-resistant field population of *Tetranychus urticae*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, **196**, 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105591>
- Pavlidis, N., Tselioudis, V., Riga, M., Nauen, R., Van Leeuwen, T., Labrousse, N.E. and Vontas, J. 2015. Functional characterization of glutathione S-transferases associated with insecticide resistance in *Tetranychus urticae*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, **121**, 53-60.
<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.01.009>
- Rai, D., Updhyay, V., Mehra, P., Rana, M. and Pandey, A.K. 2014. Potential of entomopathogenic fungi as biopesticides. *Indian Journal of Scientific Research and Technology*, **2** (5), 7-13.
- Riga, M., Tsakireli, D., Ilias, A., Morou, E., Myridakis, A., Stephanou, E.G., Nauen, R., Dermauw, W., Van Leeuwen, T., Paine, M. and Vontas, J. 2014. Abamectin is metabolized by CYP392A16, a cytochrome P450 associated with high levels of acaricide resistance in *Tetranychus urticae*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, **46**, 43-53.
<https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2014.01.006>
- Sato, M.E., da Silva, M.Z., Raga, A. and de Souza, F.F.M.F., 2005. Abamectin resistance in *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae): selection, cross-resistance and stability of resistance. *Neotropical Entomology*, **34**, 991-998.
<https://doi.org/10.1590/S1519-566X2005000600016>
- Sevim, A., Sevim, E. and Demirbağ, Z., 2015. Entomopatogenik fungusların genel biyolojileri ve Türkiye’de zararlı böceklerin mücadelesinde kullanıma potansiyelleri. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **8** (1), 115-147.
<http://dx.doi.org/10.18185/eufbed.33883>
- Shi, W.B. and Feng, M.G., 2004. Lethal effect of *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, and *Paecilomyces fumosoroseus* on the eggs of *Tetranychus cinnabarinus* (Acari: Tetranychidae) with a description of a mite egg bioassay system. *Biological Control*, **30**, 165-173.
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2004.01.017>
- Stumpf, N. and Nauen, R., 2001. Cross-resistance, inheritance, and biochemistry of mitochondrial electron transport inhibitor-acaricide resistance in *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). *Journal of Economic Entomology*, **94**, 1577-1583.
<https://doi.org/10.1603/0022-0493-94.6.1577>
- Wu, M., Adesanya, A.W., Morales, M.A., Walsh, D.B., Lavigne, L.C., Lavigne, M.D. and Zhu, F., 2019. Multiple acaricide resistance and underlying mechanisms in *Tetranychus urticae* on hops. *Journal of Pest Science*, **92**, 543-555.
<https://doi.org/10.1007/s10340-018-1050-5>
- Wu, S., Sarkar, S.C., Lv, J., Xu, X. and Lei, Z., 2020. Poor infectivity of *Beauveria bassiana* to eggs and immatures causes the failure of suppression on *Tetranychus urticae* population. *BioControl*, **65**, 81-90.
<https://doi.org/10.1007/s10526-019-09970-0>
- Xue, W., Lu, X., Mavridis, K., Vontas, J., Jonckheere, W. and Van Leeuwen, T. 2022. The H92R substitution in PSST is a reliable diagnostic biomarker for predicting resistance to mitochondrial electron transport inhibitors of complex I in European populations of *Tetranychus urticae*. *Pest Management Science*, **78**, 3644-3653.
<https://doi.org/10.1002/ps.7007>

Zhang, L., Shi, W.B. and Feng, M.G., 2014. Histopathological and molecular insights into the ovicidal activities of two entomopathogenic fungi against two-spotted spider mite. *Journal of Invertebrate Pathology*, **117**, 73-78.
<https://doi.org/10.1016/j.jip.2014.02.005>



A Detailed Analysis of Codon Usages Bias and Affecting Factors in the Topoisomerase II Gene of Invertebrate iridescent virus 6

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 11.11.2023

Kabul/Accepted: 06.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Invertebrate iridescent virüs 6'nın Topoizomeraz II Genindeki Kodon Kullanım Eğiliminin ve Etkileyen Faktörlerin Ayrıntılı Analizi

Yeşim AKTÜRK DİZMAN*

Recep Tayyip Erdogan University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Biology, Rize, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Abstract

The topoisomerase II protein (ORF 045L) of invertebrate iridescent virus 6 (IIV6) plays essential roles in managing DNA topology during viral replication and transcription. Considering the importance of the topoisomerase II gene, a comprehensive analysis was conducted to explore the codon usage bias (CUB) of topoisomerase II genes of IIV6 and 9 reference invertebrate iridescent viruses (IIVs). In this research, the findings from the base composition analysis revealed that the IIV6 topoisomerase gene had a high A/T content, with nucleotide A being the most prevalent. The relative synonymous codon usage values for each codon demonstrated the presence of CUB. The effective number of codons (ENC) value for the IIV6 topoisomerase II gene is 34.80, signifying a significant CUB. The ENC plot indicates that all the diverse sequences lie beneath the standard curve, signifying that CUB is influenced not only by mutational pressure but also by other factors, including natural selection. The findings from the neutrality analysis indicate that the codon usage pattern (CUP) is more significantly shaped by natural selection, as evidenced by a regression line slope of 0.1602, compared to the influence of mutation pressure. Furthermore, it has been established that the nucleotide composition and dinucleotide content influence the CUB of the topoisomerase II gene in IIV6. The initial comprehensive analysis of CUB in the IIV6 topoisomerase II gene offers valuable insights into the gene's evolutionary processes.

Keywords: Invertebrate iridescent virus 6; Topoisomerase II gene; 045L; Codon usage bias

Öz

Invertebrate iridescent virüs 6 (IIV6)'nın topoizomeraz II proteini (ORF 045L), viral replikasyon ve transkripsiyon sırasında DNA topolojisinin belirlenmesinde önemli roller oynar. Topoizomeraz II geninin önemi göz önünde bulundurularak, IIV6 ve 9 referans invertebrate iridescent virüs (IIVs)'ün topoizomeraz II genlerinin kodon kullanım eğilimini (CUB) araştırmak için kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Bu araştırmada, baz bileşimi analizinden elde edilen bulgular, IIV6 topoizomeraz geninin yüksek bir A/T içeriğine sahip olduğunu ve A nükleotidinin en yaygın olduğunu göstermiştir. Her bir kodon için göreceli sinonim kodon kullanım değerleri, kodon kullanım eğiliminin varlığını göstermiştir. IIV6 topoizomeraz II geni için etkin kodon sayısı (ENC) değeri 34,80'dir ve bu da önemli bir CUB'ye işaret etmektedir. ENC grafiği, tüm farklı dizilerin standart eğrinin altında yer aldığını ve kodon kullanım eğiliminin sadece mutasyon baskısından değil, doğal seçim de dahil olmak üzere diğer faktörlerden de etkilendiğini göstermektedir. Nötralite analizinden elde edilen bulgular, mutasyon baskısının etkisine kıyasla, 0,1602'lik regresyon çizgisi eğiminin de gösterdiği gibi, kodon kullanım modelinin doğal seçim tarafından daha belirgin bir şekilde şekillendirildiğini göstermektedir. Ayrıca, nükleotid bileşiminin ve dinükleotid içeriğinin IIV6 topoizomeraz II geninin kodon kullanım eğilimini etkilediği tespit edilmiştir. IIV6 topoizomeraz II genindeki kodon kullanım eğiliminin ilk kapsamlı analizi, genin evrimsel süreçleri hakkında değerli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Invertebrate iridescent virüs 6; Topoizomeraz II geni; 045L; Kodon kullanım eğilimi

1. Introduction

Invertebrate iridescent virus 6 (IIV6) is a member of the Iridoviridae family, which is a family of large dsDNA viruses that primarily infect invertebrates, particularly insects and crustaceans, as well as some vertebrates like amphibians and fish (Chinchar et al. 2017). IIV6 is highly pathogenic on important pest insects. Therefore, IIV6 has the potential to function an effective biopesticides

(Hernandez et al. 2000, Kleespies et al. 1999). IIV6, like other iridoviruses, is known for its distinctive iridescent appearance, which is a result of its crystalline protein structures (Yan et al. 2009). The IIV6 genome is roughly 212 kilobases long and comprises 215 open reading frames (ORFs), with each ORF having the potential to code for proteins (Eaton et al. 2007). Among these ORFs, one has been identified as a putative topoisomerase II (designated as ORF 045L) based on bioinformatics

analysis. The IIV6 topoisomerase II protein (ORF 045L) bears a notable resemblance to the topoisomerase II proteins found in other iridoviruses. Viruses are highly diverse, and not all viruses possess a topoisomerase II gene. Some viruses, especially large, double-stranded DNA viruses like iridoviruses, herpesviruses, arboviruses, chlorellaviruses and poxviruses, encode their own topoisomerase II enzymes (Afonso et al. 2006, Coelho and Leitão 2020, Ebert et al. 1990, Fortune et al. 2001, Jakob and Darai 2002).

Topoisomerase II, also known as DNA topoisomerase II, is an essential enzyme involved in the management of DNA topology, which refers to the three-dimensional structure of DNA. It plays a crucial role in various cellular processes, particularly in DNA replication and transcription (Berger 1998). Topoisomerase II is primarily responsible for introducing transient double-stranded breaks in DNA molecules (Champoux 2001). Moreover, the study of viral topoisomerase II has implications for antiviral drug development, as inhibiting this enzyme can disrupt the viral life cycle (Afowowe et al. 2022).

Codon usage pattern significantly impacts viral evolution (Deb et al. 2021). The genetic code exhibits redundancy, as it comprises 64 codons that represent 20 distinct amino acids, resulting in numerous synonymous codons (Spencer and Barral 2012). Nonetheless, patterns of codon usage are not arbitrary, and certain codons are favored over others in various species, which is referred to as codon usage bias (CUB) (Parvathy et al. 2022). CUB can be shaped by a variety of elements, such as nucleotide composition, gene length, natural selection and mutational pressure (Nasrullah et al. 2015). Differences in patterns of codon usage exist across viruses, and analyzing codon usage assists in uncovering the evolutionary processes within the genetic composition of viruses and how they adapt to their hosts (Jiang et al. 2022, Kumar et al. 2018).

To date, several genomic sequences of IIVs have been documented. However, research on codon usage bias in iridoviruses has been constrained, and solely a limited set of viral species have been investigated (Aktürk Dizman 2023, Tian et al. 2020, Zhao et al. 2022). There is a notable absence of a comprehensive analysis regarding the CUB in the topoisomerase II gene of IIVs. In this research, diverse techniques were employed to examine the CUP in the topoisomerase II genes of IIV6 and nine other IIVs. The aim was to identify the primary factor influencing the CUB in these viruses. This research will advance our understanding of the molecular evolution of IIVs.

2. Materials and Methods

2.1. Sequence data

The coding sequences of the topoisomerase II gene in ten IIVs were sourced from the GenBank database of the National Center for Biotechnology Information (Int.Ref.1). A list detailing the virus names along with their respective accession numbers is available in Table 1.

2.2. Nucleotide composition analysis

The CodonW software (Int.Ref. 2) was employed for the computation of various parameters, including the occurrences of the nucleotides A, T, G, and C, the occurrences of GC and AT, nucleotide occurrences at the 3rd position of synonymous codons (A3s, G3s, C3s, T3s), and the Gravy and Aroma scores. The CAIcal server. (Int. Ref. 3) was utilized to determine the GC content at the 1st, 2nd, and 3rd positions of every codon, referred to as GC1s, GC2s, and GC3s. In the present study, GC12s was established as the mean value of GC1s and GC2s.

2.3. Relative synonymous codon usage (RSCU)

The RSCU enables the assessment of how synonymous codons are employed for every amino acid (Sharp and Li, 1986). The MEGA 11.0 program was used to determine the RSCU values for the topoisomerase II genes in 10 IIVs (Tamura et al. 2021). An RSCU value of 1 signifies that the synonymous codons are used with equal frequency, while values exceeding 1.0 or falling below 1.0 indicate codons that are more abundant or less abundant, respectively. When RSCU values are greater than 1.6 or less than 0.6, this signifies that the codons are overrepresented or underrepresented, respectively (Zhou et al. 2013). For each synonymous codon, we chose the codon with the highest RSCU and the greatest frequency, designating it as the optimal codon for the IIV6 topoisomerase II gene. We then proceeded to compare these optimal codons with those of the host organism, *Chilo suppressalis*.

2.4. Effective number of codons (ENC)

The ENC value measures the degree of CUB present in a gene, providing insight into the diversity of codons utilized in a sequence. The CodonW software was used to compute the ENC values. It spans from 20 (where each synonymous codon is represented by only one codon) to 61 (when all used codons have the same frequencies for encoding amino acids). Lower ENC values signify a strong preference for particular codons, while more elevated values suggest a more even utilization of synonymous codons. The ENC value of 35 or less is indicative of a remarkably notable CUB (Wright 1990, Comeron and Aguadé 1998).

Table 1. Details about the topoisomerase II genes of IIVs utilized in the examination of codon utilization

	Gene	Virus name	Host	Length (bp)
NC_003038.1	<i>IIV6 045L</i>	Invertebrate iridescent virus 6 (IIV6)	<i>Chilo suppressalis</i>	3399
NC_024451.1	<i>IIV31 092R</i>	Invertebrate iridescent virus 31 (IIV31)	<i>Armadillidium vulgare</i>	3474
NC_008187.1	<i>IIV3 086L</i>	Invertebrate iridescent virus 3 (IIV3)	<i>Ochlerotatus taeniorhynchus</i>	3342
NC_023613.1	<i>IIV25 151R</i>	Invertebrate iridescent virus 25 (IIV25)	<i>Simulium vittatum</i>	3411
NC_021901.1	<i>IIV22 141R</i>	Invertebrate iridescent virus 22 (IIV22)	<i>Simulium vittatum</i>	3396
NC_023615.1	<i>IIV22A 147R</i>	Invertebrate iridescent virus 22A (IIV22A)	<i>Simulium vittatum</i>	3396
NC_023611.1	<i>IIV30 149R</i>	Invertebrate iridescent virus 30 (IIV30)	<i>Helicoverpa zea</i>	3387
NC_015780.1	<i>IIV9 089R</i>	Invertebrate iridescent virus 9 (IIV9)	<i>Oxycanus dirempta</i>	3408
NC_040612.1	<i>CQIV 075L</i>	Cherax quadricarinatus iridovirus (CQIV)	<i>Litopenaeus vannamei</i>	3243
ON887238.1	<i>CSAIV 135L</i>	Carnivorous sponge associated iridovirus strain MJ4 (CSAIV)	<i>Chondrocladia grandis</i>	3243

2.5. ENC-GC3s plot analysis

ENC-GC3s plot is generally employed to uncover the factors that influence CUB (Wright 1990). The expected ENC value was computed by the formula (1) provided below (Hartl et al. 1994):

$$ENC_{exp} = 2 + GC3s + \frac{29}{GC3s^2 + (1 - GC3s^2)} \quad (1)$$

When a data point falls close to the standard curve or directly on it, this suggests that CUB is mainly impacted by mutation pressure. Conversely, if the data point is situated below the standard curve and at a distance from it, it implies that additional factors, particularly natural selection, remarkably contribute to shaping CUB (Liu 2013).

2.6. Neutrality plot analysis

A graph was created using GC12s and GC3s values, and a regression curve was computed to evaluate the impact of natural selection and mutational pressure on codon usage (Sueoka 1988). Each data point represents a distinct sequence that has been selected for analysis. When the slope of the equation is close to 1, it suggests a strong correlation between GC12s and GC3s, with mutation pressure being the prevailing factor. In contrast, if the slope approaches either the x-axis or the y-axis, it signifies that natural selection is the predominant influencing factor (Wu et al. 2020).

2.7. Dinucleotide relative abundance analysis

Dinucleotide relative frequencies in the topoisomerase II genes of IIVs were determined using compseq software (Int. Ref. 4). The occurrences of 16 dinucleotides were determined as follows(2):

$$\rho_{xy} = \frac{f_{xy}}{f_y f_x} \quad (2)$$

Here, the frequency of nucleotide y is denoted as f_y , and the frequency of nucleotide x is denoted as f_x . f_{yx} signifies the expected frequency of the dinucleotide xy, and f_{xy} signifies the observed frequency of the dinucleotide xy. When the value of ρ_{xy} falls below 0.78 or exceeds 1.23, it indicates that the dinucleotides are considered underrepresented or overrepresented, respectively (Kariin and Burge 1995).

2.8. Correspondence analysis (COA)

Codon usage bias can vary between different genes. Hence, the COA was employed to assess the interrelationship and variability in codon usage among the topoisomerase II genes of IIVs (Suzuki et al. 2008). The RSCU values for 59 synonymous codons were graphed on a plot with two axes, namely, axis-1 and axis-2. To carry out the COA, the CodonW software was utilized.

2.9. Codon adaptation index analysis

An analysis of the Codon Adaptation Index (CAI) was performed to anticipate the ability of the topoisomerase II genes in IIVs to adapt to their individual host organisms. The CAI values of the topoisomerase II genes in IIVs were evaluated utilizing the CAIcal server. (Int. Ref. 5) (Puigbò et al. 2008). The host reference datasets were acquired from the CoCoPUTs Database (Int. Ref. 6). The CAI values, based on the reference codon usage pattern, fall within a range of 0 to 1, and elevated CAI values signify a more effective viral adaptation to the specific host.

2.10. Correlation analysis

A Spearman's rank correlation analysis was performed to assess the relationships between nucleotide composition,

ENC, Aromo, Gravy, and the initial two axes of COA. Statistical analyses were executed using OriginPro 9.0.

3. Results

3.1. Nucleotide composition of the IIVs topoisomerase genes

To explore the potential effect of nucleotide constraints in codon usage, the nucleotide composition of the topoisomerase II genes in IIVs was first assessed (Table 2).

The average percentages of A, G, C, and T were found to be 36.62%, 18.56%, 15.06%, and 29.08%, respectively. Likewise, in the IIV6 topoisomerase II gene, the nucleotides A and T were the most prevalent, accounting

for 40.90% and 30.00% of the composition, followed by G at 16.50% and C at 12.60%. Moreover, the codon composition at the 3rd position, comprising A3s, T3s, G3s, and C3s, were computed, and they exhibited average values of 47.27%, 47.13%, 18.19%, and 19.78%, respectively, and this pattern remained consistent within the topoisomerase II gene of IIV6. Besides, the mean AT content and the mean GC content were found to be 66.37% and 33.63%, respectively. In addition, the average AT3 content was identified at 70.28%, and the average GC3 content was calculated as 27.96%. Similar results were observed in the topoisomerase II gene of IIV6. These results indicate that the topoisomerase II genes in IIVs exhibit a high AT content and a tendency for A/T nucleotides at the 3rd position of codons.

Table 2. Analysis of nucleotide content of IIVs topoisomerase II genes

IIVs															
topoisomerase	A%	C%	T%	G%	A3s%	C3s%	T3s%	G3s%	AT%	AT3%	GC%	GC12%	GC3s%	ENC	CAI
II genes															
<i>IIV6 045L</i>	40.90	12.60	30.00	16.50	61.15	11.41	52.35	8.31	70.90	82.70	29.10	35.00	14.30	34.83	0.84
<i>IIV31 092R</i>	37.30	16.20	26.10	19.90	48.9	24.68	39.75	18.73	63.90	66.00	36.10	37.25	31.90	48.07	0.70
<i>IIV22 141R</i>	34.50	10.30	34.50	14.60	55.87	6.69	63.44	7.01	75.00	88.60	25.00	31.75	9.70	34.72	0.50
<i>IIV22A 147R</i>	40.50	10.20	34.50	14.70	56.49	6.58	63.28	6.73	75.10	88.90	24.90	31.85	9.50	34.57	0.50
<i>IIV30 149R</i>	40.40	10.60	34.20	14.70	55.92	7.99	62.27	7.06	74.60	87.50	25.40	31.85	10.80	35.74	0.74
<i>IIV25 151R</i>	39.90	12.00	32.20	15.90	54.83	10.52	56.07	10.00	72.10	83.60	27.90	33.65	14.80	40.70	0.50
<i>IIV9 089R</i>	39.60	12.00	32.60	15.80	55.49	9.70	56.35	9.65	72.20	84.40	27.80	33.90	14.00	39.99	0.84
<i>IIV3 086L</i>	26.50	25.20	21.90	26.40	17.97	44.62	22.08	46.93	48.40	30.70	51.60	42.80	68.50	46.72	0.54
<i>CSAIV 135L</i>	28.60	25.20	19.40	26.80	16.54	50.97	19.83	44.71	48.10	27.10	51.90	41.45	71.60	48.18	0.54
<i>CQIV 075L</i>	38.00	16.30	25.40	20.30	49.56	24.63	35.84	22.73	63.40	63.30	36.60	36.60	34.50	44.28	0.58
Mean	36.62	15.06	29.08	18.56	47.27	19.78	47.13	18.19	66.37	70.28	33.63	35.61	27.96	40.78	0.63
SD	5.174	5.768	5.534	4.698	16.200	16.260	16.677	15.521	10.421	23.589	10.421	3.941	23.874	5.698	0.138

3.2. RSCU analysis

The RSCU analysis identified preferences for certain synonymous codons that encode the same amino acid. The findings indicated that in the topoisomerase II gene of IIV6, the majority of the favored codons are those that end with A or T (Table 3). Out of the eighteen most prevalent codons (bold, in Table 3), ten concluded with A (TTA, TCA, CCA, ACA, GCA, CAA, AAA, GAA, AGA, and GGA), while eight terminated with T (TTT, ATT, GTT, TAT, CAT, AAT, GAT, and TGT). Of these favored codons, thirteen had RSCU values exceeding 1.6, while three had RSCU values below 0.6. This suggests a notable bias in the usage of synonymous codons. A comparison was made between the CUB of the topoisomerase II gene in IIV6 and

those of its host to explore the possible influence of the host species on the CUB of this gene (Table 3). This analysis demonstrated that 54 synonymous codons in the topoisomerase II gene of IIV6 were similar to those found in *Chilo suppressalis*.

3.3. Codon usage bias of IIVs topoisomerase genes

To unravel the factors affecting codon preference in the topoisomerase II genes of IIVs, an ENC-GC3s plot was generated. As depicted in Figure 1, some data points closely align with the theoretical fitting curve, while others are situated below this curve. These findings signify the contribution of both mutation pressure and natural selection in molding the codon usage pattern of

Table 3. The RSCU patterns of the topoisomerase II gene of the IIV6

		RSCU				RSCU	
AA	Codon	IIV6 045L	C. Suppressalis	AA	Codon	IIV6 045L	C. suppressalis
Phe (F)	TTT	1.87	1.71	Ala (A)	GCT	1.10	2.07
	TTC	0.13	0.29		GCC	0.55	0.40
Leu (L)	TTA	3.07	3.54	Tyr (Y)	GCA	2.21	1.49
	TTG	0.64	0.49		GCG	0.14	0.04
	CTT	1.64	0.85	TAT	1.47	1.75	
	CTC	0.07	0.23	TAC	0.53	0.25	
Ile (I)	CTA	0.50	0.77	His (H)	CAT	1.54	1.55
	CTG	0.07	0.11		CAC	0.46	0.45
	ATT	1.45	1.70	Gln (Q)	CAA	1.88	1.66
	ATC	0.45	0.30		CAG	0.12	0.34
Val (V)	ATA	1.10	1.80	Asn (N)	AAT	1.44	1.68
	GTT	2.65	1.52		AAC	0.56	0.32
	GTC	0.18	0.24	Lys (K)	AAA	1.66	1.85
	GTA	0.94	2.00		AAG	0.34	0.15
Ser (S)	GTG	0.24	0.24	Asp (D)	GAT	1.62	1.63
	TCT	1.95	2.13		GAC	0.38	0.37
	TCC	0.08	0.75	Glu (E)	GAA	1.77	1.71
	TCA	2.42	1.83		GAG	0.23	0.29
	TCG	0.08	0.19	Cys (C)	TGT	1.60	1.38
	AGT	1.01	0.62		TGC	0.40	0.63
Pro (P)	AGC	0.47	0.58	Arg (R)	CGT	0.00	0.42
	CCT	1.43	1.38		CGC	0.00	0.53
	CCC	0.19	1.22	CGA	0.35	2.84	
	CCA	2.29	1.38	CGG	0.00	0.21	
	CCG	0.10	0.03	AGA	5.47	1.41	
Thr (T)				AGG	0.18	0.49	
	ACT	1.23	1.48	Gly (G)	GGT	1.16	1.12
	ACC	0.25	0.98		GGC	0.23	0.12
	ACA	2.28	1.39		GGA	2.38	2.44
ACG	0.25	0.14	GGG		0.23	0.32	

IIVs topoisomerase II genes. Neutrality plots are commonly utilized for assessing the relative effects of mutation and natural selection. The analysis of the neutrality plot revealed a significant correlation between GC12s and GC3s in the topoisomerase II genes of IIVs ($p < 0.05$, $R^2 = 0.9343$) (Figure 2). Nevertheless, the calculated slope of the regression line within the topoisomerase II gene of IIVs was determined to be 0.1602. This indicates that direct mutation pressure contributes to 16.02% of the influence, while natural selection accounts for 83.98% in influencing the CUB.

This highlights that, overall, CUB is predominantly shaped by natural selection.

3.5. The dinucleotide composition analysis in IIVs topoisomerase II genes

In order to evaluate whether dinucleotide compositional constraints could impact the CUP of IIVs topoisomerase II genes, the relative frequencies of 16 dinucleotides were determined (Table 4). The outcomes indicated that CC is overrepresented, while CG, GC, and TA are underrepresented, implying that dinucleotide

occurrences are not random. For the IIV6 topoisomerase II gene, the overrepresented dinucleotides were CA (1.277), TG (1.248) and TT (1.271), while the underrepresented dinucleotides were CG (0.341), GC (0.681) and TA (0.707) (Figure 3). CG emerged as the most notably underrepresented dinucleotide, which aligns with the fact that GC nucleotide content is the lowest that none of the eighteen most commonly utilized synonymous codons terminated with G or C. Among codons containing the TA sequence, not all of them were favored for their corresponding amino acids, with the exception of TTA (Leucine) and TAT (Tyrosine). These findings indicate that the CUB in the topoisomerase II gene of IIV6, as well as that of other IIVs topoisomerase II genes, is affected by dinucleotide composition.

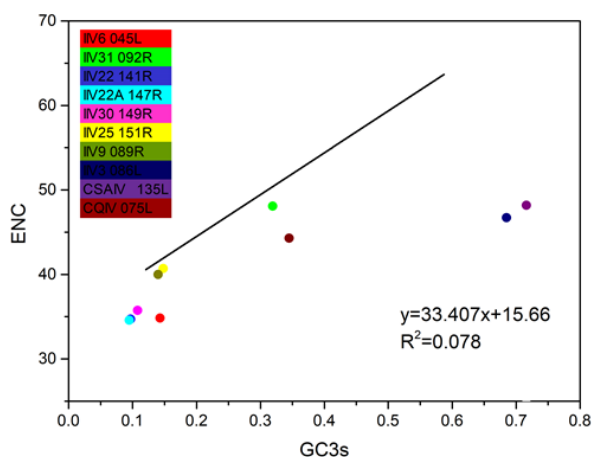


Figure 1. ENC-GC3s plot for IIVs topoisomerase II genes. The plot displays the association between the effective number of codons (ENC) and the GC content at the third position of synonymous codons. The solid black line corresponds to the expected ENC values.

Table 4. The relative frequency of 16 dinucleotides in the topoisomerase II genes

Dinucleotides	Range	Means ± SD
AA	0.994-1.303	1.164 ± 0.080
AC	0.918-1.123	1.007 ± 0.061
AG	0.674-1.018	0.867 ± 0.093
AT	0.763-1.026	0.867 ± 0.068
CA	0.904-1.277	1.064 ± 0.136
CC	0.840-1.737	1.355 ± 0.331
CG	0.311-1.045	0.628 ± 0.284
CT	0.695-1.164	0.990 ± 0.159
GA	0.964-1.193	1.043 ± 0.084
GC	0.574-0.932	0.736 ± 0.106
GG	0.928-1.348	1.194 ± 0.140
GT	0.722-1.077	0.962 ± 0.101
TA	0.486-0.816	0.682 ± 0.145
TC	0.915-1.331	1.043 ± 0.143
TG	1.110-1.318	1.222 ± 0.070
TT	0.904-1.441	1.209 ± 0.149

3.6. Codon adaptation index (CAI) analysis

CAI can provide insights into how well a gene is adapted to its host. CAI values were computed for all codons present within the topoisomerase II genes, employing the codon usage information of eight distinct hosts (Table 1). The CAI value for the IIV6 topoisomerase II gene was 0.84, which notably exceeded the values of others (Table 2). The results of this study reveal a trend to elevated CAI values (≥ 0.5) in the topoisomerase II genes of IIVs, implying a more effective adapted to their specific host organisms.

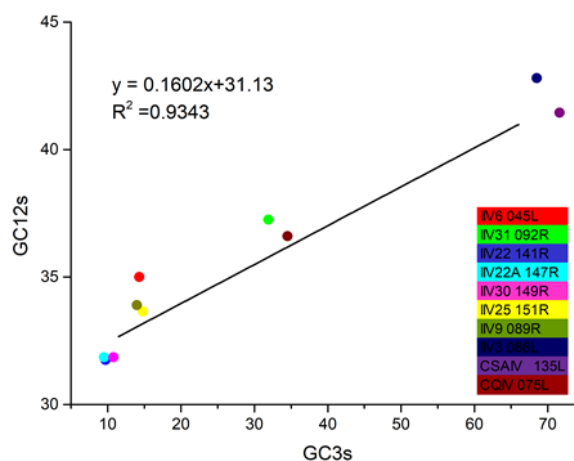


Figure 2. Neutrality plot analysis in IIVs topoisomerase II genes. GC12s denotes the average GC content in the first and second positions of codons (GC1s and GC2s), whereas GC3s signifies the GC content in the third position. The solid line indicates the linear regression relationship between GC12s and GC3s.

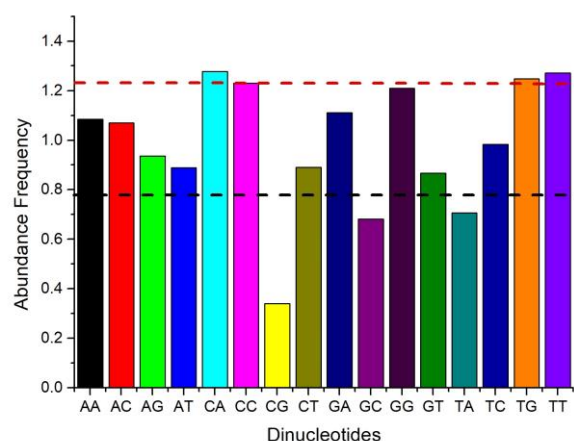


Figure 3. Dinucleotide abundance frequencies in the IIV6 topoisomerase II gene. The lines signify overrepresented values (represented by red dotted lines) and underrepresented values (represented by black dotted lines). The different colored bars depict the frequencies of dinucleotides within the IIV6 topoisomerase II gene.

3.7. Correspondence analysis

Correspondence analysis (COA), a frequently utilized multivariate statistical technique in codon usage analysis, has been employed to examine the main trend of variability within codon usage across genes. COA was carried out utilizing the values of RSCU of 59 sense codons. In line with the COA analysis results, it explained 69.09% of the overall variations, while axis 2 made a contribution of 2.61% to the overall variations. Later on, a scatterplot was created for codons, employing data from the first two axes (Figure 4). The codon scatterplot exhibited prominent groupings that were associated with the nucleotide content in the 3rd codon position.

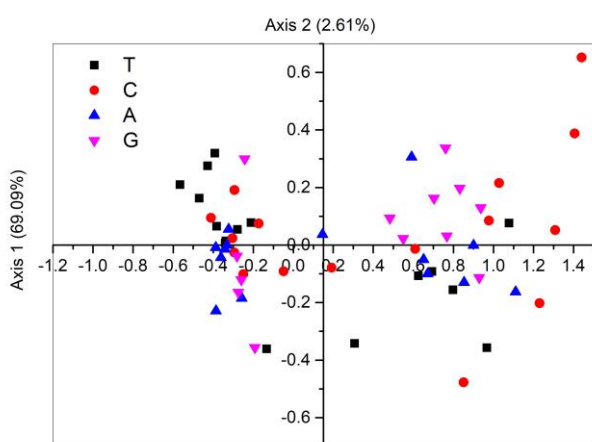


Figure 4. Correspondence analysis of topoisomerase II genes in IIVs. COA was carried out using the 59 synonymous codons' RSCU values. Every symbol in the plot corresponds to distinct codons ending with various bases.

The scatterplot clearly depicted that codons that terminate with G-C and those that end with A-T are organized into diverse and readily distinguishable clusters.

3.8. Correlation analysis of IIVs topoisomerase II genes

To examine CUB in the topoisomerase II genes, the two primary factors, namely natural selection and mutational pressure, were taken into account. To explore the impact of mutation pressure on CUB, we conducted a correlation analysis to examine the relationships between A3s, T3s, G3s, C3s, GC3s, ENC values, and nucleotide contents (Table 5).

A Significant correlation was detected among these variables. Additionally, the correlation analysis indicated that axis 1 positively correlated with ENC, C3s, and GC3s, and negatively correlated with A3s and T3s. These findings suggested that mutational pressure could have a significant impact on shaping CUB of IIV topoisomerase II genes.

Correlation analysis was employed to evaluate the connection between CUB and the Gravy and Aroma scores (Table 5), revealing the influence of natural selection. The findings indicated that the codon compositions did not exhibit a notable correlation with the Gravy and Aroma scores. Only a minor correlation was observed between the Gravy score and axis 2, revealing that natural selection contributes to shaping the CUB in the topoisomerase II genes of IIVs.

Table 5. The correlation among the codon compositions (A3s, T3s, G3s, C3s, and GC3s), the ENC values, nucleotide compositions (A, T, G, C, and GC), the 1st axis values, the 2nd axis values, the Gravy values, and the Aroma values in the topoisomerase II genes of IIVs

	A	C	G	T	GC	1st axis	2nd axis	Gravy	Aroma
T3s	0.50303	-0.98173*	-0.99697*	0.99697*	-0.98788*	-0.93939*	0.4303	0.2	0.31611
C3s	-0.58788	0.98173*	-0.98481*	-0.98481*	0.98788*	0.93939*	-0.38182	-0.22424	-0.29179
A3s	0.85455*	-0.7866*	-0.76596*	0.7842*	-0.79394*	-0.89091*	0.06667	-0.15152	0.50456
G3s	-0.67273*	-0.94833*	0.9301*	0.95733*	0.95152*	1	-0.24848	0.04242	-0.32827
ENC	-0.66061*	0.87807*	0.86323*	-0.88754*	0.89091*	0.92727*	-0.30909	-0.09091	-0.49848
GC3s	-0.61212	0.97563*	0.96657*	-0.98481*	0.98788*	0.97576*	-0.3697	-0.11515	-0.38906
2nd axis	-0.27273	-0.36586	-0.43769	0.41945	-0.40606	-0.24848	1	0.73333*	0.56535

4. Discussion

CUB pertains to the uneven utilization of codons in encoding amino acids. While mutation and natural selection are the predominant forces impacting CUB in the genome of a species, other elements like nucleotide composition, evolutionary pressure, and geographical distribution could also exert an impact (Iriarte et al. 2021, Shi et al. 2016). Extensive research has been conducted

on the nucleotide content properties and CUB in complex organisms like *Drosophila* and mammals (Machado et al. 2020, Ouyang et al. 2022). However, comparable studies involving pathogens are relatively scarce. Understanding codon usage patterns and the elements that influence them is considered essential for comprehending the genetic evolution of infectious agents, including bacteria and viruses (Begum and Chakraborty 2022, Sharma et al.

2023). In order to address the knowledge voids in the examination of IIVs, we employed various analytical methods in this research to explore the codon usage patterns and uncover the factors that impact CUB in the topoisomerase II genes of IIVs. The general nucleotide composition significantly impacts codon usage preferences (Xu et al. 2017). Based on our analysis, the topoisomerase II gene of IIVs exhibits a highly pronounced AT richness, especially noticeable in the third position of synonymous codons. It has been proposed that in viruses, especially those with AT or GC-rich genomes, there tends to be a correlation with RSCU patterns. For example, codons with a preference for AT-rich or GC-rich compositions typically end with either A and T or G and C, respectively. These observed trends provide evidence of the effect of mutational pressure (Jenkins and Holmes 2003).

The RSCU analysis demonstrated that there was a notable inclination towards codons ending with A and T in the IIV6 topoisomerase II gene. To account for potential host-specific patterns, we computed RSCU values specific to the host. Consequently, we conducted a comparative analysis between the RSCU patterns of the IIV6 topoisomerase II gene and those of its respective host. It was noted that the codon usage patterns specific to the host also displayed a preference for codons that conclude with A and T. Therefore, consistent with the analysis of nucleotide composition, the RSCU analysis provided additional confirmation of the bias toward codons ending with A and T. Hence, it can be inferred that mutational bias was identified to be the major force shaping the codon usage patterns in the topoisomerase II gene of IIV6, indicating that compositional constraints were a contributing factor in the choice of favored codons.

The analysis of ENc values indicates that the CUB in the IIVs topoisomerase II gene is minimal. A potential advantage of this low CUB is the enhancement of gene transcription and translation efficiency for the IIVs topoisomerase II gene. In fact, several viruses exhibit a similarly low codon usage bias, including the Rabies virus, PEDV, and HCV (Khandia et al. 2023, Yu et al. 2021, Zhang et al. 2018). Nevertheless, our research found that the IIV6 topoisomerase II gene displayed a more significant CUB in comparison to the remaining topoisomerase II genes.

Mutational pressure and natural selection are two crucial components that have impacted codon usage patterns, a phenomenon that is widely observed across the genomes of various viruses and is significantly shaped by the evolution of the genome (Tao et al. 2009). To appraise the

effectiveness of natural selection and mutation in influencing CUB in viruses, ENC-plot and neutrality analysis were conducted. These results indicate that the CUB sighted in the topoisomerase II genes of IIVs is likely influenced by both mutational pressure and natural selection rather than mutational pressure alone. These results align with previous research (Patil et al. 2021, Nyayanit et al. 2021).

The frequencies of 16 dinucleotides were examined to explore the possible influence of dinucleotides. Among these dinucleotides, the CG content in the IIVs topoisomerase II genes was notably the lowest. Previous research has indicated that in the evolutionary process, many viruses tend to decrease the presence of CG in their genomic elements. This reduction offers advantages related to immune evasion or host adaptation (Molteni et al. 2023, Sharp et al. 2023). Our findings corroborated the hypothesis that a decreased CG content within a viral genome might provide an advantage for adapting to host organisms (Shackelton et al. 2006, Si et al. 2021). TA is another dinucleotide commonly found to be underrepresented in the genomes of both DNA and RNA viruses (Aktürk Dizman 2023, Kumar et al. 2016). This is due to TA dinucleotides being more prone to degradation by cytoplasmic RNase, a mechanism that contributes to the regulation of mRNA turnover in the cell (Odon et al. 2019). This analysis implied that dinucleotide contents have a considerable impact on shaping the CUP in IIVs topoisomerase II genes.

To investigate how natural selection impacted codon usage, using the codon usage of the hosts as reference sets, CAI values were computed. As CAI measures the resemblance between synonymous codon usage in a gene and this of a reference set, elevated CAI values signify a strong codon usage bias, reflecting the dominant impact of natural selection (Carbone et al. 2003). The mean CAI value for IIVs topoisomerase II genes in host organisms is 0.64, indicating a high expression level in these hosts. This implies that the formation of CUB in topoisomerase II genes of IIVs has been influenced by natural selection. These results align with previous studies, emphasizing the significance of natural selection in shaping the CUB of genes present in viruses (He et al. 2019, Tian et al. 2020).

In this investigation, we also carried out COA using RSCU to unveil the principal trends in CUP within the topoisomerase II genes and to present the results visually in a straightforward manner. The COA revealed clear clusters of G/C-ended and A/T-ended codons on the scatterplot, indicating a pronounced preference for these

codon types in IIVs topoisomerase II genes. This preference is impacted by the nucleotide content and indicates that various patterns of codon usage and affecting elements across topoisomerase genes, depending on the level of CUB. This finding aligns with earlier research (Duan et al. 2021, Wei et al. 2014).

Codon usage bias in some viruses is shaped by both mutational pressure and natural selection, both of which are recognized as significant driving factors (Chen 2013). The significance of mutational pressure in molding codon usage bias was additionally supported by the remarkably strong correlations observed between the overall nucleotide compositions and A3s, T3s, G3s, C3s, and GC3s. Additionally, the substantial correlation between the ENC values and the overall nucleotide compositions further reinforced the significance of mutational pressure. The first axis values of COA were also noted to have a significant correlation with the overall nucleotide compositions. These observations validate that mutational pressure is a significant driving force behind the CUB observed in IIVs topoisomerase II genes.

Throughout the process of a virus adapting to a host cell, the codon usage pattern might also be affected by natural selection (Shi et al. 2016). The notable correlation between the Gravy value and axis 2 suggests that the characteristics of viral proteins contribute to the observed differences in codon usage among IIVs topoisomerase II genes. This underscores the significance of natural selection in molding CUB within these genes.

5. Conclusions

Considering all of these findings, our investigations demonstrate that the IIV6 topoisomerase gene possesses a notable codon usage bias, affected by mutational pressure, natural selection, and dinucleotide abundance. To our knowledge, this is the initial extensive study delving into codon usage bias and its determinants in the IIV6 topoisomerase II gene. Our research contributes to a deeper understanding of the evolutionary dynamics of the IIV6 topoisomerase II gene, providing a foundation for future fundamental research in this area.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, investigation, methodology and software, visualization and writing – original draft, supervision and writing – review and editing.

Declaration of Competing Interest

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

Data Availability Statement

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

Acknowledgement

I would like to thank Assoc. Prof. Dr. Serdar DİZMAN for his contributions in drawing the graphs in the article and I would also like to thank the referees and editors who contributed to the revision of the article for their support.

6. References

- Afonso, C.L., Tulman, E.R., Delhon, G., Lu, Z., Viljoen, G.J., Wallace, D.B., Kutish, G.F. and Rock, D.L., 2006. Genome of Crocodilepox Virus. *Journal of Virology*, **80**, 4978–4991. <https://doi.org/10.1128/jvi.80.10.4978-4991.2006>
- Afowowe, T.O., Sakurai, Y., Urata, S., Zadeh, V.R. and Yasuda, J., 2022. Topoisomerase II as a Novel Antiviral Target against Panarenaviral Diseases. *Viruses*, **15**, 105. <https://doi.org/10.3390/v15010105>
- Aktürk Dizman, Y., 2023. Codon usage bias analysis of the gene encoding NAD⁺-dependent DNA ligase protein of Invertebrate iridescent virus 6. *Archives of Microbiology*, **205**, 352. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03688-5>
- Begum, N. and Chakraborty, S., 2022. Influencing elements of codon usage bias in Birnaviridae and its evolutionary analysis. *Virus Research*, **310**, 198672. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2021.198672>
- Berger, J.M., 1998. Structure of DNA topoisomerases. *Biochimica et Biophysica Acta*, **1400**, 3–18. [https://doi.org/10.1016/S0167-4781\(98\)00124-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4781(98)00124-9)
- Carbone, A., Zinovyev, A. and Képès, F., 2003. Codon adaptation index as a measure of dominating codon bias. *Bioinformatics*, **19**, 2005–2015. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btg272>
- Champoux, J.J., 2001. DNA topoisomerases: structure, function, and mechanism. *Annual Review of Biochemistry*, **70**, 369–413. <https://doi.org/10.1146/annurev.biochem.70.1.36>
- Chen, Y., 2013. A comparison of synonymous codon usage bias patterns in DNA and RNA virus genomes: Quantifying the relative importance of mutational pressure and natural selection. *BioMed Research International*, **2013**, 406342. <https://doi.org/10.1155/2013/406342>
- Chinchar, V.G., Waltzek, T.B. and Subramaniam, K., 2017. Ranaviruses and other members of the family

- Iridoviridae: Their place in the virosphere. *Virology*, **511**, 259–271.
<https://doi.org/10.1016/j.virol.2017.06.007>
- Coelho, J. and Leitão, A., 2020. The African swine fever virus (ASFV) topoisomerase ii as a target for viral prevention and control. *Vaccines*, **8**, 1–16.
<https://doi.org/10.3390/vaccines8020312>
- Comeron, J.M. and Aguadé, M., 1998. An evaluation of measures of synonymous codon usage bias. *Journal of Molecular Evolution*, **47**, 268–274.
<https://doi.org/10.1007/PL00006384>
- Deb, B., Uddin, A. and Chakraborty, S., 2021. Composition, codon usage pattern, protein properties, and influencing factors in the genomes of members of the family Anelloviridae. *Archives of Virology*, **166**, 461–474.
<https://doi.org/10.1007/s00705-020-04890-2>
- Duan, H., Zhang, Q., Wang, C., Li, F., Tian, F., Lu, Y., Hu, Y., Yang, H. and Cui, G., 2021. Analysis of codon usage patterns of the chloroplast genome in *Delphinium grandiflorum* L. reveals a preference for AT-ending codons as a result of major selection constraints. *PeerJ*, **9**, e10787.
<https://doi.org/10.7717/peerj.10787>
- Eaton, H.E., Metcalf, J., Penny, E., Tcherepanov, V., Upton, C. and Brunetti, C.R., 2007. Comparative genomic analysis of the family Iridoviridae: Re-annotating and defining the core set of iridovirus genes. *Virology Journal*, **4**, 11.
<https://doi.org/10.1186/1743-422X-4-11>
- Ebert, S.N., Shtrom, S.S. and Muller, M.T., 1990. Topoisomerase II cleavage of herpes simplex virus type 1 DNA in vivo is replication dependent. *Journal of Virology*, **64**, 4059–4066.
<https://doi.org/10.1128/jvi.64.9.4059-4066.1990>
- Fortune, J.M., Lavrukhin, O. V., Gurnon, J.R., Van Etten, J.L., Lloyd, R.S. and Osheroff, N., 2001. Topoisomerase II from Chlorella Virus PBCV-1 Has an Exceptionally High DNA Cleavage Activity. *Journal of Biological Chemistry*, **276**, 24401–24408.
<https://doi.org/10.1074/jbc.M101693200>
- Hartl, D.L., Moriyama, E.N. and Sawyer, S.A., 1994. Selection intensity for codon bias. *Genetics*, **138**, 227–234.
<https://doi.org/10.1093/genetics/138.1.227>
- He, Z., Gan, H. and Liang, X., 2019. Analysis of synonymous codon usage bias in potato virus M and its adaption to hosts. *Viruses*, **11**, 752.
<https://doi.org/10.3390/v11080752>
- Hernandez, O., Maldonado, G. and Williams, T., 2000. An Epizootic of Patient Iridescent Virus Disease in Multiple Species of Blackflies in Chiapas, Mexico. *Medical and Veterinary Entomology*, **14**, 458–462.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2915.2000.00258.x>
- Iriarte, A., Lamolle, G. and Musto, H., 2021. Codon Usage Bias: An Endless Tale. *Journal of Molecular Evolution*, **89**, 589–593.
<https://doi.org/10.1007/s00239-021-10027-z>
- Jakob, N.J. and Darai, G., 2002. Molecular anatomy of Chilo iridescent virus genome and the evolution of viral genes. *Virus Genes*, **25**, 299–316.
<https://doi.org/10.1023/A:1020984210358>
- Jenkins, G.M. and Holmes, E.C., 2003. The extent of codon usage bias in human RNA viruses and its evolutionary origin. *Virus Research*, **92**, 1–7.
[https://doi.org/10.1016/S0168-1702\(02\)00309-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1702(02)00309-X)
- Jiang, L., Zhang, Q., Xiao, S. and Si, F., 2022. Deep decoding of codon usage strategies and host adaption preferences of soybean mosaic virus. *International Journal of Biological Macromolecules*, **222**, 803–817.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.179>
- Kariin, S. and Burge, C., 1995. Dinucleotide relative abundance extremes: a genomic signature. *Trends in Genetics*, **11**, 283–290.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9525\(00\)89076-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9525(00)89076-9)
- Khandia, R., Khan, A.A., Karuvantevida, N., Gurjar, P., Rzhepakovsky, I.V. and Legaz, I., 2023. Insights into Synonymous Codon Usage Bias in Hepatitis C Virus and Its Adaptation to Hosts. *Pathogens*, **12**, 325.
<https://doi.org/10.3390/pathogens12020325>
- Kleespies, R.G., Tidona, C.A. and Darai, G., 1999. Characterization of a New Iridovirus Isolated from Crickets and Investigations on the Host Range. *Journal of Invertebrate Pathology*, **73**, 84–90.
<https://doi.org/10.1006/jipa.1998.4821>
- Kumar, N., Bera, B.C., Greenbaum, B.D., Bhatia, S., Sood, R., Selvaraj, P., Anand, T., Tripathi, B.N. and Virmani, N., 2016. Revelation of influencing factors in overall codon usage bias of equine influenza viruses. *PLoS One* **11**, 1–26.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154376>
- Kumar, N., Kulkarni, D.D., Lee, B., Kaushik, R., Bhatia, S., Sood, R., Pateriya, A.K., Bhat, S. and Singh, V.P., 2018. Evolution of codon usage bias in henipaviruses is governed by natural selection and is host-specific. *Viruses*, **10**, 604.
<https://doi.org/10.3390/v10110604>
- Liu, X., 2013. A more accurate relationship between “effective number of codons” and GC3s under assumptions of no selection. *Computational Biology and Chemistry*, **42**, 35–39.
<https://doi.org/10.1016/j.compbiolchem.2012.11.003>

- Machado, H.E., Lawrie, D.S. and Petrov, D.A., 2020. Pervasive Strong Selection at the Level of Codon Usage Bias in *Drosophila melanogaster*. *Genetics*, **214**, 511–528. <https://doi.org/10.1534/genetics.119.302542>
- Molteni, C., Forni, D., Cagliani, R., Bravo, I.G. and Sironi, M., 2023. Evolution and diversity of nucleotide and dinucleotide composition in poxviruses. *Journal of General Virology*, **104**, 1–19. <https://doi.org/10.1099/jgv.0.001897>
- Nasrullah, I., Butt, A.M., Tahir, S., Idrees, M. and Tong, Y., 2015. Genomic analysis of codon usage shows influence of mutation pressure, natural selection, and host features on Marburg virus evolution. *BMC Evolutionary Biology*, **15**, 1–15. <https://doi.org/10.1186/s12862-015-0456-4>
- Nyayanit, D.A., Yadav, P.D., Kharde, R. and Cherian, S., 2021. Natural selection plays an important role in shaping the codon usage of structural genes of the viruses belonging to the coronaviridae family. *Viruses*, **13**, 3. <https://doi.org/10.3390/v13010003>
- Odon, V., Fros, J.J., Goonawardane, N., Dietrich, I., Ibrahim, A., Alshaihahmed, K., Nguyen, D. and Simmonds, P., 2019. The role of ZAP and OAS3/RNaseL pathways in the attenuation of an RNA virus with elevated frequencies of CpG and UpA dinucleotides. *Nucleic Acids Research*, **47**, 8061–8083. <https://doi.org/10.1093/nar/gkz581>
- Ouyang, T., Zhong, J., Chai, Z., Wang, J., Zhang, M., Wu, Z. and Xin, J., 2022. Codon Usage Bias and Cluster Analysis of the MMP-2 and MMP-9 Genes in Seven Mammals. *Genetics Research*, **2022**, 2823356. <https://doi.org/10.1155/2022/2823356>
- Parvathy, S.T., Udayasuriyan, V. and Bhadana, V., 2022. Codon usage bias. *Molecular Biology Reports*, **49**, 539–565. <https://doi.org/10.1007/s11033-021-06749-4>
- Patil, S.S., Indrabalan, U.B., Suresh, K.P. and Shome, B.R., 2021. Analysis of codon usage bias of classical swine fever virus. *Veterinary World*, **14**, 1450–1458. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.1450-1458>
- Puigbò, P., Bravo, I.G. and Garcia-Vallve, S., 2008. CAIcal: A combined set of tools to assess codon usage adaptation. *Biology Direct*, **3**, 38. <https://doi.org/10.1186/1745-6150-3-38>
- Shackelton, L.A., Parrish, C.R. and Holmes, E.C., 2006. Evolutionary basis of codon usage and nucleotide composition bias in vertebrate DNA viruses. *Journal of Molecular Evolution*, **62**, 551–563. <https://doi.org/10.1007/s00239-005-0221-1>
- Sharma, A., Gupta, S. and Paul, K., 2023. Codon usage behavior distinguishes pathogenic *Clostridium* species from the non-pathogenic species. *Gene*, **873**, 147394. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2023.147394>
- Sharp, C., Thompson, B., Nash, T., Diebold, O., Pinto, R., Thorley, L., Lin, Y., Sives, S., Wise, H., Clohisey Hendry, S., Grey, F., Vervelde, L., Simmonds, P., Digard, P. and Gaunt, E., 2023. CpG dinucleotide enrichment in the influenza A virus genome as a live attenuated vaccine development strategy. *PLoS Pathogens*, **19**, e1011357. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1011357>
- Sharp, P.M. and Li, W.H., 1986. An evolutionary perspective on synonymous codon usage in unicellular organisms. *Journal of Molecular Evolution*, **24**, 28–38. <https://doi.org/10.1007/BF02099948>
- Shi, S.L., Jiang, Y.R., Yang, R.S., Wang, Y. and Qin, L., 2016. Codon usage in Alphabaculovirus and Betabaculovirus hosted by the same insect species is weak, selection dominated and exhibits no more similar patterns than expected. *Infection, Genetics and Evolution*, **44**, 412–417. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2016.07.042>
- Si, F., Jiang, L., Yu, R., Wei, W. and Li, Z., 2021. Study on the Characteristic Codon Usage Pattern in Porcine Epidemic Diarrhea Virus Genomes and Its Host Adaptation Phenotype. *Frontiers in Microbiology*, **12**, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.738082>
- Spencer, P.S. and Barral, J.M., 2012. Genetic code redundancy and its influence on the encoded polypeptides. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, **1**, e201204006. <https://doi.org/10.5936/csbj.201204006>
- Sueoka, N., 1988. Directional mutation pressure and neutral molecular evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **85**, 2653–2657. <https://doi.org/10.1073/pnas.85.8.2653>
- Suzuki, H., Brown, C.J., Forney, L.J. and Top, E.M., 2008. Comparison of correspondence analysis methods for synonymous codon usage in bacteria. *DNA Research*, **15**, 357–365. <https://doi.org/10.1093/dnares/dsn028>
- Tamura, K., Stecher, G. and Kumar, S., 2021. MEGA11: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 11. *Molecular Biology and Evolution*, **38**, 3022–3027. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab120>
- Tao, P., Dai, L., Luo, M., Tang, F., Tien, P. and Pan, Z., 2009. Analysis of synonymous codon usage in classical

swine fever virus. *Virus Genes*, **38**, 104–112.
<https://doi.org/10.1007/s11262-008-0296-z>

Genetics and Evolution, **14**, 105–110.
<https://doi.org/10.1016/j.meegid.2012.09.02>

Tian, H. feng, Hu, Q. mu, Xiao, H. bing, Zeng, L. bing, Meng, Y. and Li, Z., 2020. Genetic and codon usage bias analyses of major capsid protein gene in Ranavirus. *Infection, Genetics and Evolution*, **84**, 104379.
<https://doi.org/10.1016/j.meegid.2020.104379>

Wei, L., He, J., Jia, X., Qi, Q., Liang, Z., Zheng, H., Ping, Y., Liu, S. and Sun, J., 2014. Analysis of codon usage bias of mitochondrial genome in *Bombyx mori* and its relation to evolution. *BMC Evolutionary Biology*, **14**, 1–12.
<https://doi.org/10.1186/s12862-014-0262-4>

Wright, F., 1990. The “effective number of codons” used in a gene. *Gene*, **87**, 23–29.
[https://doi.org/10.1016/0378-1119\(90\)90491-9](https://doi.org/10.1016/0378-1119(90)90491-9)

Wu, H., Bao, Z., Mou, C., Chen, Z. and Zhao, J., 2020. Comprehensive Analysis of Codon Usage on Porcine Astrovirus. *Viruses*, **12**, 991.
<https://doi.org/10.3390/v12090991>

Xu, X., Fei, D., Han, H., Liu, H., Zhang, J., Zhou, Y., Xu, C., Wang, H., Cao, H. and Zhang, H., 2017. Comparative characterization analysis of synonymous codon usage bias in classical swine fever virus. *Microbial Pathogenesis*, **107**, 368–371.
<https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.04.019>

Yan, X., Yu, Z., Zhang, P., Battisti, A.J., Holdaway, H.A., Chipman, P.R., Bajaj, C., Bergoin, M., Rossmann, M.G. and Baker, T.S., 2009. The Capsid Proteins of a Large, Icosahedral dsDNA Virus. *Journal of Molecular Biology*, **385**, 1287–1299.
<https://doi.org/10.1016/j.jmb.2008.11.002>

Yu, X., Gao, K., Pi, M., Li, H., Zhong, W., Li, B. and Ning, Z., 2021. Phylogenetic and codon usage analysis for replicase and capsid genes of porcine circovirus 3. *Veterinary Research Communications*, **45**, 353–361.
<https://doi.org/10.1007/s11259-021-09816-0>

Zhang, X., Cai, Y., Zhai, X., Liu, J., Zhao, W., Ji, S., Su, S. and Zhou, J., 2018. Comprehensive analysis of codon usage on rabies virus and other lyssaviruses. *International Journal of Molecular Sciences*, **19**, 2397.
<https://doi.org/10.3390/ijms19082397>

Zhao, R., Gu, C., Zou, X., Zhao, M., Xiao, W., He, M., He, L., Yang, Q., Geng, Y. and Yu, Z., 2022. Comparative genomic analysis reveals new evidence of genus boundary for family Iridoviridae and explores qualified hallmark genes. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, **20**, 3493–3502.
<https://doi.org/10.1016/j.csbj.2022.06.049>

Zhou, J., Gao, Z., Zhang, J., Ding, Y., Stipkovits, L., Szathma, S., Pejsak, Z. and Liu, Y., 2013. The analysis of codon bias of foot-and-mouth disease virus and the adaptation of this virus to the hosts. *Infection*,

Internet References

1-National Center for Biotechnology Information, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>, (1.10.2023)

2-CodonW, <http://codonw.sourceforge.net/>, (16.10.2023)

3-CAIcal server, <http://genomes.urv.es/CAIcal/>, (17.10.2023)

4-<https://www.bioinformatics.nl/cgi-bin/emboss/compseq>, (23.10.2023)

5-RCDI server, <http://genomes.urv.cat/CAIcal/RCDI/>, (17.10.2023)

6-Codon and Codon Pair Usage Tables, https://dnahive.fda.gov/dna.cgi?cmd=codon_usage&id=537&mode=cocoputs, (15.10.2023)

2-klorokinolinin Moleküler ve Spektroskopik Özelliklerinin Kuantum Kimyasal Hesaplama Yöntemleriyle Araştırılması

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 18.10.2023

Kabul/Accepted: 06.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Investigating the Molecular and Spectroscopic Properties of 2-chloroquinoline by Quantum Chemical Computational Methods

Fehmi BARDAK*, Etem KÖSE

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Fizik Bölümü, Manisa, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Mevcut çalışma, kinolin türevlerinin aktif madde olma potansiyeli ve reaktivitesi üzerindeki klor ikame etkisini ortaya çıkarmak için 2-klorokinolin molekülünün temel moleküler özelliklerinin araştırılmasıyla ilgilidir. Buna göre FT-IR, FT-Raman, ¹H ve ¹³C NMR spektrumlarından elde edilen deneysel sonuçlarla ve kuantum kimyasal hesaplamalarla desteklenen 2-klorokinolin için spektroskopik bir araştırmayı içermektedir. Molekülün optimize edilmiş yapısı ve enerji parametreleri, yoğunluk fonksiyonel teorisi B3LYP yöntemi 6-311++G(d,p) temel seti kullanılarak elde edildi. Molekülün titreşim özellikleri, titreşim enerji dağılımı analizi yoluyla ve moleküler modelleme yoluyla elde edilen simüle edilmiş spektrumlara uygun olarak elde edildi. Atomik Orbitaleri İçeren Gauge Yaklaşımı yöntemiyle tahmin edilen ¹H ve ¹³C NMR kimyasal kayma özellikleri deneysel verilerle karşılaştırıldı. Ayrıca bileşiğin moleküler elektrostatik potansiyel yüzey özellikleri, atomik kısmi yükler, elektronik yörüngeler ve olası elektronik geçişler sunuldu. Klor ikamesinin 2-klorokinolin molekülünün temel özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğu ve kimyasal reaktivitesini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir.

Abstract

The current work deals with the exploration of fundamental molecular properties of 2-chloroquinoline molecule to reveal the chlorine substitution effect on the reactivity and potency of being active matter of quinoline derivatives. Accordingly, it includes a spectroscopic search for 2-chloroquinoline supported by experimental results obtained from FT-IR, FT-Raman, and ¹H and ¹³C NMR spectra, and through quantum chemical calculations. The molecule's optimized structure and energy parameters were obtained using the density functional theory B3LYP method 6-311++G(d,p) basis set. The vibrational characteristics of the molecule were obtained via the vibrational energy distribution analysis and in accordance with the simulated spectra obtained through molecular modeling. The ¹H and ¹³C NMR chemical shift properties were estimated by the Gauge Invariant Atomic Orbital method and discussed in comparison with the experimental data. Moreover, molecular electrostatic potential surface characteristics, atomic partial charges, electronic orbitals, and possible electronic transitions of the compound were presented. It has been shown that chlorine substitution has significant effects on the fundamental characteristics of the compound and enhances its chemical reactivity in an important manner.

Anahtar Kelimeler: 2-klorokinolin; DFT; FT-IR; Raman; UV-Vis; NMR

Keywords: 2-Chloroquinoline; DFT; FT-IR; Raman; UV-Vis; NMR

1. Giriş

Kinolin, C₉H₇N moleküler formülüne sahip heterosiklik aromatik bir organik bileşiktir. Bir piridin halkasına kaynaşmış bir benzen halkasından oluşur ve organik kimya alanında önemli bir yapı taşıdır. Kinolin ve türevleri farmasötik ve tıbbi kimyada büyük öneme sahiptir. Pek çok ilaç ve bileşik kinolin motiflerinden türetilir veya bunları içerir. Antibakteriyel (Fujita et al., 1998; Kidwai et al., 2000), antiparaziter (Tewari et al., 2000), antimalarial (Famin et al., 1999; Ismail et al., 1998; Ziegler et al., 2001), biyolojik (Dubé et al., 1998; Gupta et al., 1998, 2000), kardiyovasküler (Khan et al., 2000), ve antineoplastik (Deady et al., 2001) aktiviteleri yönünden de kinolin türevleri üzerine birçok çalışma yürütülmüştür. Örneğin, Aminokinolinin insan immün yetmezlik virüsü (HIV) için

inhibe edici özelliğini ortaya koyan çalışmalar bulunmaktadır (Strekowski et al., 1991). Bu kayda değer aktif doğaları göz önünde bulundurularak, kinolin türevlerinden bazıları da kuantum kimyasal hesaplamaları kullanılarak araştırılmış ve spektroskopik özellikleri sunulmuştur (Arjunan et al., 2011; Arjunan, Mohan, et al., 2009; Arjunan, Saravanan, et al., 2009; Kumru et al., 2016; Oanca et al., 2016; Sivaprakash et al., 2017). Kinolin türevlerine ait çalışmalardan anlaşıldığı üzere fonksiyonel grubun ikamesinin, temelde molekülün kimyasal ve biyolojik reaktivitesine dolayısıyla da fizikokimyasal özelliklerini kayda değer ölçüde etkilediği görülmektedir. Kimyasal türevlendirmenin en temel yollarından birisi de moleküle ait atom veya atomların muhtemel aktivitesi yüksek atomlar ile yer değiştirilmesi ile mümkün

olmaktadır. Klor atomlarının yüksek elektronegatifliği nedeniyle, kinoline klor bağlanması, bu özellikleri önemli ölçüde etkilemesi muhtemel bir durum oluşturmaktadır. Kinolin türevinde klor ikamesinin sonuçlarını daha derinlemesine açıklayabilmek için molekülün reaktivite ve spektroskopik özelliklerinin detaylı olarak incelendiği çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu nedenle, bu çalışmada 2-klorokinolin (2CQ) molekülünün yapısal özellikleri, elektrostatik ve elektronik özellikleri, UV, titreşim ve NMR- spektroskopik özellikleri ortaya konulmuştur. Kinolin türevlerinde klor ikamesinin etkisini ortaya koymak için moleküler modelleme ile elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca gözlemsel olarak elde edilemeyen bazı temel nicelikler de teorik olarak sunulmuştur. Çalışmada 2CQ molekülünün deneysel olarak elde edilmiş FT-IR, FT-Raman, ve ^1H ve ^{13}C nükleer manyetik rezonans (NMR) spektrumlarının literatür verilerine ve teorik olarak Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT) kullanılarak elde edilen kararlı yapı geometrik parametrelerine ve titreşimsel karakteristiklerinin tanımlanmasına, Zamana Bağımlı DFT (TD-DFT) kullanılarak elde edilen elektronik seviyeler ve orbitaller arası geçişlere, ve Atomik Orbitalleri İçeren Gauge Yaklaşımı (Gauge-Invariant Atomic Orbital, GIAO) metodu kullanılarak belirlenen kimyasal kayma değerlerine yer verilmiştir. Bunlar yanında, molekülün reaktif doğasının daha iyi aydınlatılabilmesi için atomik yüklerin dağılımı ve Moleküler Elektrostatik Potansiyel (MEP) yüzey tasvirlerine yer verilmiştir. Klor ikamesinin etkilerinin referans moleküler yapılar da göz önünde bulundurularak sunulduğu bu çalışma, 2CQ molekülünde klor ikamesinin yapısal ve spektroskopik özellikler üzerine etkisini detaylı olarak tanımlamakla birlikte ikame etkisinin hangi türden özelliklerde en açık şekilde kendini gösterdiğini belirleme açısından da literatüre katkılar sağlamaktadır. Ayrıca kinolin türevlerinde ikame etkisinin anlaşılması üzerine oluşmuş birikimlere veriye dayalı somut katkılar da sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot / Materials and Methods

2.1. Kuantum Kimyasal Hesaplamalar ve Deneysel Veriler

Çalışmadaki molekül için deneysel FT-IR, FT-Raman ve (^1H ve ^{13}C) NMR spektrumları Spectral Database for Organic Compounds, SDBS sitesinden alındı (SDBS Web: <http://sdb.srioddb.aist.go.jp> (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), 2018). Molekülün en kararlı yapısının elde edilmesinde Yoğunluk Fonksiyoneli Teorisi (Density Functional Theory, DFT) (Hohenberg et al., 1964) temelinde Becke'nin üç

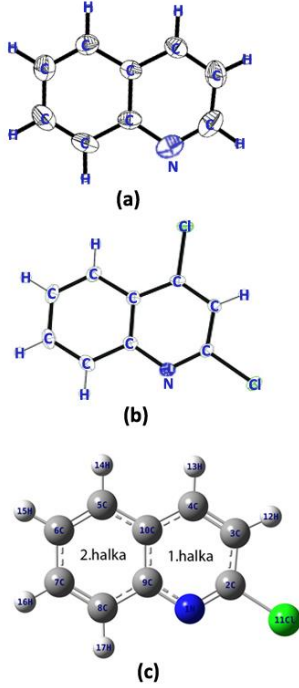
parametrelili hibrit fonksiyonu (B3) (Becke, 1988, 1993) değiş-tokuş ve Lee–Yang–Parr (LYP) korelasyonunu (Lee et al., 1988) dikkate alan B3LYP metodu seçildi, ve dalga fonksiyonu tanımlamalarında Pople tipi 6-311++G(d,p) temel seti seçildi. Seçilen B3LYP/6-311++G(d,p) model kimyası hem ağır atomlar hem de hidrojen atomları için yeterli düzeyde polarizasyon ve yayılma etkilerini göz önünde bulundurarak orta düzeyde Hartree-Fock değiş-tokuş hibritleşmesi ile büyük bir yaklaşıklıkla deneysel spektrumların modellenmesine ve elektronik seviyelerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu yüzden tüm spektroskopik modellemelerde seçilen bu metod/temel set kombinasyonu kullanılmıştır. Moleküler yapı ve spektroskopik özelliklerin belirlenmesi için gerekli hesaplamalar Gaussian 16 (Frisch et al., 2016) programı kullanılarak yapıldı ve hesaplama sonuçlarının görselleştirilmesi ve analizinde GaussView 6 (Dennington et al., 2009) arayüzü kullanıldı. Temel titreşim işaretlemeleri VEDA programı (Jamróz, 2013) kullanılarak potansiyel enerji dağılımına (Potential Energy Distribution; PED) göre yapıldı. PED dağılımlarının yanı sıra GaussView 6 (Dennington et al., 2009) ara yüzünün titreşimsel modların yer değiştirme vektörleri ile görüntülenmesinden de yararlandı. Moleküler orbital karakteristikler ve elektronik seviyeler arası geçişler zamana bağlı (Time-Dependent) DFT (TD-DFT) (Fabian, 2010; Guillaumont & Nakamura, 2000) metodu kullanılarak vakumda, etanol ve su çözücü ortamlarında integral denklem formalizmi kutuplaştırılabilir süreklilik modeli (Integral Equation Formalism Polarizable Continuum Model (IEFPCM)) ile belirlendi. ^1H ve ^{13}C NMR kimyasal kayma değerleri yaygın olarak kullanılan ve deneysel değerlerle oldukça uyumlu sonuçlar üretebilen GIAO (Ditchfield, 1972; Wolinski et al., 1990) yaklaşımı ile vakumda ve kloroform çözücüsü içinde elde edildi.

3. Bulgular

3.1. Moleküler yapı analizi

2CQ molekülünün yapılan kuantum kimyasal hesaplamalar sonucunda elde edilen en düşük enerjili kararlı yapısının C_s simetri grubuna ait olduğu görülmektedir. Elde edilen bu yapı, atom numaralandırmaları ve sembolleri ile **Şekil-1**'de sunulmuştur. İncelenen moleküle ait kristal yapı verilerinin bulunmamasından dolayı, modellemede elde edilen geometrik yapı parametrelerinin kabul edilebilir aralıklarda bulunduğunu tanımlayabilmek adına deneysel kristal yapı verileri bulunan kinolin (Davies & Bond, 2001) ve 2,4-diklorokinolin (2,4DCQ) (Kimmel et al., 2010) molekülleri referans olarak değerlendirilmiştir. Referans

moleküllerine ait deneysel veriler ile 2CQ molekülüne ait modellenmiş geometrik yapı parametreleri mukayeseli bir şekilde **Çizelge 1**'de sunulmuştur.



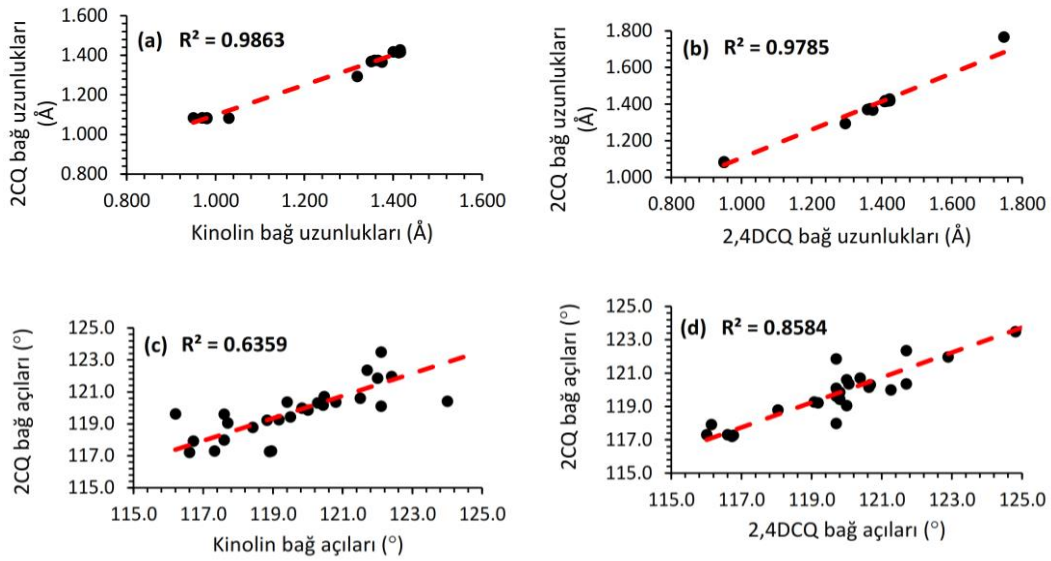
Şekil 1 (a) ve (b) sırasıyla, Kinolin ve 2,4-diklorokinolin moleküllerinin X-ışınları kırınımından elde edilmiş deneysel yapıları, (c) 2-klorokinolinin molekülünün DFT-B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde elde edilen en düşük enerji kararlı yapısı

Çizelge 1'deki sonuçlar, halkadaki C-C bağ uzunluklarının deneysel sonuçlardan önemli ölçüde farklı olmadığını göstermektedir (Davies & Bond, 2001; Kimmel et al., 2010). Bununla beraber, 2,4DCQ molekülünde klor atomlarının da var olması nedeniyle daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Fenil grubundaki teorik C-C bağ uzunlukları, B3LYP yöntemi 6-311G++(d,p) temel seti için 1.370-1.427 Å aralığındadır. Kinolin için 1.350 ve 1.415 Å ve 2,4DCQ için 1.367 ve 1.418 Å arasında bildirilen deneysel değerleri ile iyi bir uyum içindedirler. Bağ uzunluklarının deneysel değerlerden ortalama sapması, halihazırda kinolin ve 2,4DCQ molekülleri için sırasıyla yaklaşık 0.086 ve 0.072 Å'dir. İncelenen molekülde C-N bağ uzunluğu 1.294 Å ve 1.367 Å olarak hesaplandı ve kinolin için elde edilmiş deneysel değerlerle 1.319 Å ve 1.374 Å (Kimmel et al., 2010) uyumlu olduğu görüldü. C-N bağ uzunlukları sırasıyla, N₁-C₂ için 1.259 ve N₁-C₉ için 1.374 Å olarak hesaplandı. Bu değerler 2,4DCQ molekülü için kaydedilmiş deneysel veriler ile tam bir uyum içindedir. C-H bağ uzunlukları, deneysel değerleri deneysel veriler ile bir korelasyon içinde olmakla beraber moleküler modellemede kristal yapıdan farklı olarak hesaplamaların vakum ortamında yapılması nedeniyle molekülün maruz kaldığı bir kristal alanı

tanımlanmadığından ortalama olarak 0.1 Å kadar daha yüksek olarak kaydedilmektedir. Örneğin, hesaplanan C-H bağ uzunluklarının ortalaması 1.084 Å iken, kinolin ve 2,4DCQ molekülleri için sırasıyla 0.984 Å ve 0.950 Å olarak kaydedilmiştir. Diğer yandan hidrojen atomlarının hafifliği nedeni ile x-ışınları saçılma deneylerinde konumlarının belirlenmesindeki diğer atomlara göre yüksek belirsizlik de göz önünde bulundurulduğunda modelleme ile elde edilen sonuçların oldukça kabullenilebilir olduğu ortaya çıkmaktadır. Klor atomunun bağlı bulunduğu C₂ atomunun klor atomu ile yaptığı bağ uzunluğunun 2CQ molekülü için 2,4DCQ molekülüne göre daha uzun olduğu ve her iki molekül için de kinolin molekülünde aynı karbon atomuna bağlı olan hidrojen atomunun yaptığı bağdan çok uzun oldukları görülmektedir. Klor atomlarının hacminin daha büyük olması bunun doğrudan bir göstergesi olmasının yanında birden fazla klor atomun ikame edilmesi durumunda C-Cl bağının daha kararlı bir bağlanma gerçekleştirdiği görülmektedir. Bunun sebebinin klor atomunun elektron yoğunluğunun yüksek olması ve bağ yapması durumunda halkadaki π orbitali elektron yoğunluğu ile etkileşmesinin dolayısı ile daha kararlı bir yük transferi sağlanabildiğini göstermektedir. 2CQ molekülünde tek bir klor ikamesi bulunduğundan dolayı bu π-halojen etkileşmesinin daha zayıf kaldığı ve buna bağlı olarak kurulan C-Cl bağının daha uzun olduğu görülmektedir. Deneysel değerleri ile teorik değerleri bir korelasyon içinde olduğu görülmektedir. Bağ açılarındaki duruma bakılacak olursa halkadaki bağ açılarının normal değeri olan 120.0° den sapmalar gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni halkadaki azot atomu ve komşuluğundaki Cl atomunun varlığından kaynaklanmaktadır. Bağ açısı hesaplamaları ayrıca kinolin ve 2,4DCQ moleküllerine göre sırasıyla yalnızca 0.8° ve 1.9° sapma ortalamaları ile deneysel sonuçlarla iyi bir korelasyona sahiptir. Bağ açısında maksimum değişim C₁₀-C₄-H₁₃ açısında 3.4° olarak gözlenmekte olup, bu durum bu açının para pozisyonunda bulunan azot atomunun bağ uzunlukları üzerinde herhangi bir etkisi olmamasına rağmen benzen halkasının çarpıklaşmasında önemli rol oynadığını göstermektedir. Sonuç olarak bağ uzunluklarının deneysel değerlerden sapması beklendiği gibi neredeyse önemsizdir. Son olarak, dihedral açılar, molekülün tamamen düzlemsel olduğunu açıkça gösterir. Özet olarak, azot atomu ve halojenin etkisiyle ideal hegzagonal yapıli halkaların yapısının biraz deforme olduğu söylenebilir. Buna bağlı olarak halka içindeki bağların uzunluk ve açıların az miktarda farklılık gösterdiği, deneysel sonuçlarla bir değerlendirildiğinde, bağ uzunlukları ve bağ açıları için korelasyonun **Şekil 2**'deki gibi olduğu görülmektedir.

Çizelge 1 Kinolin ve 2,4DCQ moleküllerinin deneysel geometrik parametreleri ve 2CQ molekülünün DFT/B3LYP metodu ve 6-311++G(d,p) temel seti ile elde edilen optimize geometrik parametreleri

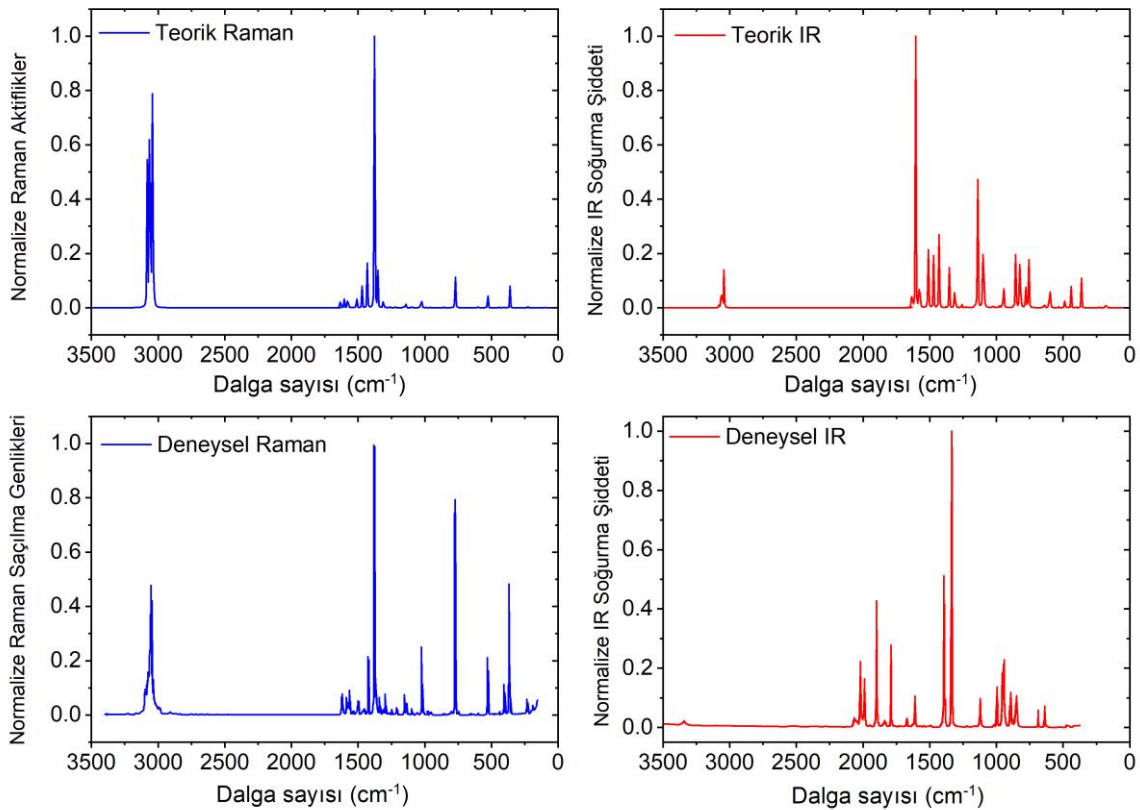
Geometrik Parametreler	X-ray	X-ray	B3LYP 6-311++G(d,p)	Geometrik Parametreler	X-ray	X-ray	B3LYP 6-311++G(d,p)
Bağ Uzunluğu (Å)	2,4DCQ ^a	Kinolin ^b	2CQ	Bağ Açıları (°)	2,4DCQ ^a	Kinolin ^b	2CQ
N ₁ -C ₂	1.296	1.319	1.294	C ₂ -N ₁ -C ₉	116.1	116.7	117.9
N ₁ -C ₉	1.374	1.374	1.367	N ₁ -C ₂ -C ₃	126.5	124.5	125.5
C ₂ -C ₃	1.410	1.400	1.418	N ₁ -C ₂ -Cl ₁₁ (H)	116.7	116.6	117.2
C ₂ -Cl ₁₁ (H)	1.748	1.010	1.767	C ₃ -C ₂ -Cl ₁₁ (H)	116.8	118.9	117.3
C ₃ -C ₄	1.359	1.350	1.370	C ₂ -C ₃ -C ₄	116.6	119.0	117.3
C ₃ -H ₁₂	0.950	0.980	1.081	C ₂ -C ₃ -H ₁₂	121.7	119.4	120.4
C ₄ -C ₁₀	1.423	1.414	1.419	C ₄ -C ₃ -H ₁₂	121.7	121.7	122.3
C ₄ -H ₁₃		0.970	1.085	C ₃ -C ₄ -C ₁₀	121.3	119.8	120.0
C ₅ -C ₆	1.371	1.358	1.375	C ₃ -C ₄ -H ₁₃	-	124.0	120.4
C ₅ -C ₁₀	1.418	1.416	1.417	C ₁₀ -C ₄ -H ₁₃	-	116.2	119.6
C ₅ -H ₁₄	0.950	0.950	1.085	C ₆ -C ₅ -C ₁₀	120.1	120.8	120.4
C ₆ -C ₇	1.408	1.412	1.414	C ₆ -C ₅ -C ₁₄	120.0	121.5	120.6
C ₆ -H ₁₅	0.950	0.970	1.084	C ₁₀ -C ₅ -H ₁₄	120.0	117.7	119.1
C ₇ -C ₈	1.367	1.365	1.376	C ₅ -C ₆ -C ₇	120.7	120.3	120.3
C ₇ -H ₁₆	0.950	0.982	1.084	C ₅ -C ₆ -H ₁₅	119.7	122.1	120.1
C ₈ -C ₉	1.411	1.410	1.416	C ₇ -C ₆ -H ₁₅	119.7	117.6	119.6
C ₈ -H ₁₇	0.950	1.032	1.083	C ₆ -C ₇ -C ₈	120.4	120.5	120.7
C ₉ -C ₁₀	1.422	1.415	1.427	C ₆ -C ₇ -H ₁₆	119.8	119.5	119.4
Dihedral açılar(°)	2,4DCQ^a	Kinolin^b	2CQ	C ₈ -C ₇ -H ₁₆	119.8	120.0	119.9
C ₉ -N ₁ -C ₂ -C ₃			0	C ₇ -C ₈ -C ₉	120.6	120.4	120.2
C ₉ -N ₁ -C ₂ -Cl ₁₁			180	C ₇ -C ₈ -H ₁₇	119.7	122.0	121.9
C ₂ -N ₁ -C ₉ -C ₈			180	C ₉ -C ₈ -H ₁₇	119.7	117.6	118.0
C ₂ -N ₁ -C ₉ -C ₁₀			0	N ₁ -C ₉ -C ₈	118.0	118.4	118.8
N ₁ -C ₂ -C ₃ -C ₄			0	N ₁ -C ₉ -C ₁₀	122.9	122.4	122.0
N ₁ -C ₂ -C ₃ -H ₁₂			180	C ₈ -C ₉ -C ₁₀	119.1	119.2	119.3
Cl ₁₁ -C ₂ -C ₃ -C ₄			180	C ₄ -C ₁₀ -C ₅	124.8	122.1	123.5
Cl ₁₁ -C ₂ -C ₃ -H ₁₂			0	C ₄ -C ₁₀ -C ₉	116.0	117.3	117.3
C ₃ -C ₄ -C ₁₀ -C ₅			180	C ₅ -C ₁₀ -C ₉	119.2	118.8	119.2

^aX-Ray verileri (Kimmel et al., 2010) ^bX-Ray verileri (Davies & Bond, 2001) çalışmalarından alındı.**Şekil 2** (a) Kinolin ve 2CQ bağ uzunlukları ilişkisi, (b) 2,4DCQ ve 2CQ bağ uzunlukları ilişkisi, (c) Kinolin ve 2CQ bağ açıları ilişkisi (d) 2,4DCQ ve 2CQ bağ açıları ilişkisi

3.2. Titreşim Spektrumlarının analizi

2CQ molekülüne ait deneysel FT-IR ve Raman spektrumları teorik olarak B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde simüle edilmiş halleriyle **Şekil 3** de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. DFT yöntemlerinden yararlanarak elde edilen hesaplar her ne kadar moleküler yapı için uyum gösterse de deneysel titreşim frekanslarıyla tam bir uyum olmaz. Bunun sebepleri arasında temel setin yetersizliği, elektron korelasyon yaklaşıklığı ve anharmonikliğin karşılanmaması olabilir. Bunu düzeltmek için bu metotla elde edilen frekanslar literatürde kabul görmüş ölçeklendirme katsayısı (Becke, 1993) ile düzeltildi. **Çizelge 2'**de hesaplanan, ölçeklendirilmiş frekanslar, deneysel sonuçlar ve temel mod işaretlemeleri verilmiştir. Görüldüğü gibi moleküller için hesaplanan titreşim frekansları ölçeklendirildikten sonra da deneysel verilerle bazı farklılıklar gösterebilmektedir. Bunun sebebi ise; moleküllerin deneysel verileri katı/sıvı fazda olmasına karşılık hesaplamalar gaz fazı içinde olması ve komşuluğunda bulunan kristal alan etkileri, fonon etkileşimleri ve dipol-dipol, dipole-kuadrupol, kuadrupol-kuadrupol etkileşimleri gibi çoklu zayıf etkileşmelerin dikkate alınamamasından kaynaklanabileceği bilinmektedir.

Serbest halde incelenen molekülde 17 tane atom olup, moleküllerin koordinat eksenleri boyunca öteleme ve dönme hareketleri çıkartıldığında, $3N-6$ bağıntısı gereği 45 tane temel titreşimi mevcut olup C_s nokta grubuna sahip molekülün düzlemsel yapısı dihedral açılarından görülmektedir. Bu yüzden molekülde yer alan A' ve A'' sırasıyla düzlem içi ve düzlem dışı modları temsil eden $31A' + 14A''$ olarak dağıtılabilen 45 temel titreşim moduna sahiptir. Halkadaki düzlemsellik, elde edilen sonuçların yorumlanırken titreşim modlarının işaretlenmesinde de kullanılmıştır. **Çizelge 2'**de hesaplanan, ölçeklendirilmiş frekanslar, deneysel sonuçlar ve temel mod işaretlemeleri verilmiştir. Görüldüğü gibi moleküller için hesaplanan titreşim frekansları ölçeklendirildikten sonra da deneysel verilerle bazı farklılıklar gösterebilmektedir. Bunun sebebi ise; moleküllerin deneysel verileri katı/sıvı fazda olmasına karşılık hesaplamalar gaz fazı içinde olması ve komşuluğunda bulunan kristal alan etkileri, fonon etkileşimleri ve dipol-dipol, dipole-kuadrupol, kuadrupol-kuadrupol etkileşimleri gibi çoklu zayıf etkileşmelerin dikkate alınamamasından kaynaklanabileceği bilinmektedir.



Şekil 3 2CQ molekülüne ait teorik ve deneysel FT-IR ve Raman spektrumları

Çizelge 2 2CQ molekülünün B3LYP metodu ile 6–311++G(d,p) temel setinde hesaplanan ve ölçeklendirilmiş dalga sayısı değerleri (cm^{-1}) ve deneysel FT-IR ve FT-Raman tekniği ile elde edilen sonuçlar ve temel titreşim modları için PED işaretlemeleri

Mod	Sim.	Teorik		Deneysel ^c		İşaretlemeler
		Ham frekans	Ölçekli Frekans ^a	FT-IR	FT-Raman	
v1	A'	3216	3081			$\nu_{\text{CHsym.}}$ (100) 1.halka
v2	A'	3200	3066	3062	3054	$\nu_{\text{CHsym.}}$ (99) 2.halka
v3	A'	3188	3054		3048	$\nu_{\text{CHasym.}}$ (100) 2.halka
v4	A'	3174	3041		3045	$\nu_{\text{CHasym.}}$ (99) 1.halka + 2.halka
v5	A'	3170	3037			$\nu_{\text{CHasym.}}$ (100) 1.halka + 2.halka
v6	A'	3163	3030			$\nu_{\text{CHasym.}}$ (100) 1.halka + 2.halka
v7	A'	1656	1628	1618	1620	ν_{CC} (61), δ_{CCH} (21), δ_{CCC} (13)
v8	A'	1628	1600	1605	1594	ν_{CC} (46), ν_{CN} (19), δ_{CCH} (16), δ_{CCC} (10)
v9	A'	1600	1572	1585	1586	ν_{CC} (39), ν_{CN} (16), δ_{CCC} (31)
v10	A'	1533	1507	1497	1502	ν_{CC} (29), ν_{CN} (10), δ_{CCH} (41), δ_{CCN} (13)
v11	A'	1492	1466	1466	1493	ν_{CC} (27), δ_{CCH} (44), δ_{CCN} (10), δ_{CCC} (10)
v12	A'	1450	1425	1422	1425	ν_{CC} (22), δ_{CCH} (65)
v13	A'	1395	1372	1377	1384	ν_{CC} (48), ν_{CN} (11), δ_{CCC} (26), δ_{CCH} (12)
v14	A'	1372	1348	1336	1340	ν_{CC} (47), ν_{CN} (18), δ_{CCH} (31)
v15	A'	1328	1305	1307	1300	ν_{CC} (15), ν_{CN} (28), δ_{CCH} (36), δ_{CCC} (14)
v16	A'	1277	1255	1247	1250	ν_{CC} (18), δ_{CCH} (57), δ_{CCC} (14)
v17	A'	1238	1217	1208	1211	ν_{CC} (21), ν_{CN} (13), δ_{CCH} (46), δ_{CCC} (10)
v18	A'	1175	1155		1152	ν_{CC} (18), δ_{CCH} (72)
v19	A'	1166	1146	1148	1142	ν_{CC} (29), δ_{CCH} (66)
v20	A'	1155	1136	1137	1134	ν_{CC} (31), δ_{CCH} (38), δ_{CCC} (16), δ_{CCN} (10),
v21	A'	1111	1092	1094	1098	ν_{CC} (40), ν_{CN} (13), δ_{CCH} (22), δ_{CCC} (14)
v22	A'	1038	1020		1022	ν_{CC} (64), δ_{CCH} (26)
v23	A''	1002	985			τ_{CCCH} (78), τ_{CCCN} (18)
v24	A''	989	972		976	τ_{CCCH} (73), τ_{CCCN} (24)
v25	A''	972	955			τ_{CCCH} (70), τ_{CCCN} (21)
v26	A'	957	940	943		ν_{CC} (11), δ_{CCH} (14), δ_{CCC} (54), δ_{CCN} (10)
v27	A''	881	866	868		τ_{CCCH} (89), τ_{CCCN} (10)
v28	A'	864	849	853	851	ν_{CC} (11), δ_{CCC} (52), δ_{CCN} (21)
v29	A''	831	817	816		τ_{CCCH} (90)
v30	A''	787	774	781	773	τ_{CCCH} (25), τ_{CCCN} (61), τ_{CCCC} (12)
v31	A'	779	766	770		ν_{CC} (19), ν_{CN} (13), δ_{CCN} (30), δ_{CCH} (11), δ_{CCC} (23)
v32	A''	763	750	749	745	τ_{CCCH} (78), τ_{CCCN} (12)
v33	A''	666	654			τ_{CCCH} (21), τ_{CCCN} (38), τ_{CCCC} (15), τ_{CNCCI} (25)
v34	A'	645	634	633		ν_{CC} (22), ν_{CCl} (10), δ_{CCN} (25), δ_{CCH} (14), δ_{CCC} (24)
v35	A'	604	594	596		ν_{CC} (14), ν_{CCl} (19), δ_{CCN} (11), δ_{CCC} (45)
v36	A''	536	527		528	τ_{CCCH} (21), τ_{CCCN} (38), τ_{CCCC} (18), τ_{CNCCI} (21)
v37	A'	530	521			ν_{CC} (23), δ_{CCN} (16), δ_{CCH} (21), δ_{CCC} (36)
v38	A''	487	478	481		τ_{CCCH} (14), τ_{CCCN} (67), τ_{CCCC} (14)
v39	A'	441	434			ν_{CC} (19), δ_{CNCl} (22), δ_{CCC} (45)
v40	A''	404	397		402	τ_{CCCH} (14), τ_{CCCN} (73), τ_{CCCC} (11)
v41	A'	361	354		366	ν_{CN} (10), ν_{CCl} (49), δ_{CCH} (10), δ_{CCC} (15)
v42	A''	275	270			τ_{CCCN} (60), τ_{CNCCI} (25), τ_{CCCC} (11)
v43	A'	223	219		227	ν_{CC} (12), δ_{CNCl} (61), δ_{CCC} (16)
v44	A''	173	170		185	τ_{CCCN} (95)
v45	A''	99	98			τ_{CCCN} (67), τ_{CNCCI} (16)

^a Ölçekli frekans (B3LYP/6–311++G(d,p)) sırasıyla 4000–1700 cm^{-1} için 0.983 ve 1700–0 cm^{-1} için 0.958 ölçeklendirme katsayıları ile çarpılmış titreşim dalga sayılarını göstermektedir.

^b PED: Potansiyel Enerji Dağılımı, ν ; gerilme, δ ; düzlem içi eğilme, τ ; burkulma,

^c (SDBS Web: <http://sdb.s.riodb.aist.go.jp> (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), 2018) referansından alındı.

3.2.1. C-H gerilme titreşimleri

Organik moleküllerin C–H gerilme modları halka için karakteristik modlardandır. Bu modlar aromatik halka içeren bileşiklerde karakteristik bölgede 3000–3100 cm^{-1} aralığında çok ve zayıf soğurma şiddetiyle görülür (Sundaraganesan et al., 2009) . Bu çalışmada, **Çizelge 2**'de

PED sütununda görüldüğü gibi DFT'nin B3LYP fonksiyoneli ile 3062 cm^{-1} de FT-IR spektrumunda ve 3045–3054 cm^{-1} aralığında FT-Raman spektrumunda deneysel olarak gözlemlendi ve 3030–3081 cm^{-1} aralığında saf modlar (ν_1 – ν_6) olarak hesaplandı. C-H simetrik titreşim modları, halkalarda asimetrik olanlardan daha yüksek dalga

boylarına sahip ve PED analizine göre C–H gerilme modları saf titreşimler olup 100% katkılı olduğu da görülmektedir.

Düzlem içi C–H bükülme modları 1000–1300 cm^{-1} aralığında, düzlem dışı C–H bükülme modları da 750–1000 cm^{-1} aralığında gözlenir (Silverstein et al., 2005). Bu çalışmada düzlem içi C–H modları 1020-1507 cm^{-1} aralığında teorik olarak tahmin edilip, deneysel olarak 1094-1497 cm^{-1} (FT-IR) ve 1022-1502 cm^{-1} (FT-Raman) gözlemlendi. Bu modlar genellikle halka titreşimleriyle beraber görülmektedir. C–H düzlem dışı bükülme titreşim modları ise 654-985 cm^{-1} arasında teorik olarak hesaplandı ve deneysel sonuçlarla 749-943 cm^{-1} (FT-IR) ve 745-851 cm^{-1} (FT-Raman) uyum gösterdi. Diğer torsiyon modları geniş bölgede birbirleriyle karışık halde olup ilgili çizelgeden de anlaşılacağı üzere düzlem dışı C–H, ve C–Cl titreşimleri olarak tasnif edildi.

3.2.2. C-N gerilme titreşimleri

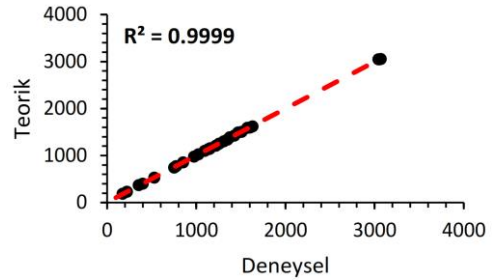
C–N gerilme titreşimlerini diğer titreşimlerden ayırmak genellikle zor (Sundaraganesan et al., 2009) olmakla birlikte Silverstein tarafından aromatik aminler için 1386–1266 cm^{-1} bölgesinde olduğu belirlendi (Silverstein et al., 1981). C–N gerilmeleri bu çalışmada çok geniş bölgede diğer titreşimlerle karışık halde bulundu. En büyük katkılı titreşim 1305 cm^{-1} olarak elde edilen titreşim olarak tespit edildi. C–N moduna ait en yüksek katkılı titreşimin deneysel FT-IR spektrumunda 1307 cm^{-1} ve FT-Raman spektrumunda 1300 cm^{-1} olarak işaretlendi. CN titreşimine ait genel sonuçlar, benzer kinolin türevleri için de iyi bir uyum ve korelasyona sahiptir (Arjunan et al., 2011; Kose et al., 2018; Ozel et al., 2009). τ CCCN torsiyon modları ise diğer torsiyon modları ile C–H ve C–Cl düzlem dışı titreşim modları olarak (bakınız Çizelge 2) görüldü. δ CCN modlarında ise PED e göre en katkı sağlayan mod 766 cm^{-1} olarak belirlendi. Ayrıca sonuçlar literatürle benzer yapıllı moleküllerin sonuçları ile paralellik gösterdiği görülmektedir (Kose et al., 2015; Pathak et al., 2014).

3.2.3. C–C gerilme titreşim modları

En yaygın karakteristik aromatik halka modlarından biri karbon-karbon (C–C) gerilmeleridir. Yaklaşık 1400-1650 cm^{-1} aralığındaki spektral bölgede görülürler. Varsányi (Varsányi, 1973) bu titreşimleri beş adet bölgede sırasıyla 1625–1590, 1590–1575, 1540–1470, 1465–1430 ve 1380–1280 cm^{-1} şeklinde göstermektedir. Bu çalışmada C–C gerilme titreşimleri 1628–1020, 940, 849, 766, 594-634, 521, 434, ve 219 cm^{-1} olarak görüldü. En büyük katkı

ise %61 ve %64 ile ν_7 ve ν_{22} nolu modlardan gelmektedir. C–C gerilme titreşimleri genel olarak deneysel (FT-IR ve FT-Raman) sonuçlarla da tutarlıdır. Ayrıca literatürde (Balachandran et al., 2014; Bardak et al., 2016; Kose et al., 2018) benzer yapıllı moleküllerdeki sonuçlar, bizim sonuçları destekler niteliktedir.

C-Cl'nin gerilme titreşimleri genellikle 760-505 cm^{-1} de geniş bantlar bölgesi olarak kaydedilir (Socrates, 2001). 1-kloroizokinolin molekülünün C-Cl gerilme modları sırasıyla 675 cm^{-1} de ve 674 cm^{-1} de FT-Raman ve FT-IR bantlarında tanımlandı (Arivazhagan & Krishnakumar, 2005). Ayrıca 8CQ'nun (Arjunan et al., 2011) C-Cl gerilme modları IR ve Raman'da sırasıyla 659 ve 651 cm^{-1} de çok güçlü bir bant olarak kaydedilmiştir. 355 ve 589 cm^{-1} de ortaya çıkan C-Cl gerilme titreşimleri, elektro-negatif özelliklere sahip nitrojen atomlarından kaynaklanan bir sapma göstermektedir (Kose et al., 2018). Bu çalışmada, 2CQ molekülünün C-Cl gerilme modları 596 ve 633 cm^{-1} de FT-IR ve 366 cm^{-1} de FT-Raman spektrumunda gözlemlendi genel olarak bu titreşime ait deneysel sonuçlar da ve literatür ile Şekil 4'te görüldüğü gibi iyi bir korelasyon gösterdi.



Şekil 4: Deneysel ve hesaplanan titreşim frekanslarının korelasyonu

3.3. Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) Spektrumu

NMR spektroskopisi, özellikle organik bileşenlerinin yoğun olduğu moleküllerin yapısını incelemede en etkili temel yöntemlerdendir. Bunun yanında simülasyon teknikleri ile desteklenmesi, incelenen yapıların daha detaylı tanımlanabilmesine ve biyomoleküler yapılar kadar büyük yapıların dahi etkili biçimde ortaya konulabilmesine olanak sağlamaktadır (Ditchfield, 1972; Wolinski et al., 1990). Bu çalışmada incelenen 2CQ molekülüne ait kloroform çözücüsünde elde edilmiş deneysel ^1H ve ^{13}C NMR kimyasal kayma değerleri (SDBS Web: <http://sdfs.riondb.aist.go.jp> (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), 2018) GIAO/6-311++G(d,p) metot/temel set kombinasyonu (Ditchfield, 1972; Wolinski et al., 1990) ile

teorik olarak belirlenerek kinolin ve 2,4DCQ molekülleri için elde edilen değerler ile karşılaştırmalı olarak **Çizelge 3**'te sunuldu.

Organik moleküllerde ^1H ve ^{13}C NMR kimyasal kayma değerleri sırasıyla 7.00–8.00 ppm ve 100-150 ppm aralığındadır. Kinolin halkasının bir fenil ve bir piridin halkası içerdiği varsayılabilir. Fenil halkasındaki protonların sinyali genellikle 7–8.5 ppm aralığında gözlenir. Elektron çeken atom veya atom grupları perdelemeyi azaltabilir ve rezonansı daha yüksek bir frekansa taşıyabilirken, elektron veren sistemlerde daha düşük bir frekansa düşer (Friebolin, 2005). Çalışmadaki molekül dokuz tane karbon atomuna sahip ve bunların hepsi halkadadır. ^{13}C NMR kimyasal kaymaları özellikle 100-150 ppm'de bölgede rezonans ve örtüşme gösterir (Kalinowski et al., 1988; Pihlaja & Kleinpeter, 1994). Aynı bölge literatürde kinolin için de benzer sonuçlar gözlenmiştir (Fort et al., 2007; Pretsch et al., 2009). Bununla birlikte C_2 , C_9 , karbon atomlarının

kimyasal kayma değerlerine bakılırsa komşu azot atomu etkisiyle daha yüksek olduğu ve Cl atomunun etkisiyle de klora bağlı karbon atomlarının biraz daha yüksek olduğu görüldü. C_2 atomunun NMR deneysel kimyasal kayma değeri 150.5 ppm ve hesaplanan 157.6 ppm olarak makul olup, diğer karbonlarda da benzer korelasyonlar görülmektedir. 2CQ için teorik ve deneysel veriler arasındaki korelasyonun ölçütü olarak $R^2 = 0.9849$ değerindedir. Çizelgede $\Delta\delta$ olarak sunulan farklar klor ikamesinin kinolin molekülünde izotropik perdeleme üzerine yaptığı etkiyi göstermektedir. İlginç olarak 2CQ da klor ikamesi C_7 'nin perdelenmesi üzerinde de etkili olmuştur. Bu durum klor atomundaki elektronların konjuge yapı üzerinden 2.halka sonuna kadar iletilebildiğini ve molekül içinde yük hareketine katkı sağladığını gösterir. 8,9, ve 10. karbon atomlarına olan etkisi de aromatiklik üzerinde de etkisi olduğunu göstermektedir. İki klor atomu ikamesi olan 2,4DCQ molekülünde bu durum daha baskın bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 3 2CQA molekülünün deneysel ve GIAO/B3LYP metodu 6–311++G(d,p) temel seti ile elde edilmiş teorik ^1H ve ^{13}C NMR kimyasal kayma değerleri. Deneysel NMR spektrumu CDCl_3 çözücüsünde alınmış ve modellemelerde de aynı çözücü ortamı dikkate alınmıştır.

Atom	$\delta_{\text{Deneyisel}}$ 2CQ	δ_{Teorik} 2CQ	δ_{Teorik} Kinolin	$\Delta\delta$ 2CQ-Kinolin	δ_{Teorik} 2,4DCQ	$\Delta\delta$ 2,4DCQ-Kinolin
C(2)	150.5	163.1	157.6	7.3	163.7	6.1
C(3)	122.2	126.6	127.2	1.2	128.2	1.0
C(4)	138.8	144.5	143.3	3.2	160.8	17.5
C(5)	127.5	132.5	134.9	-0.1	131.1	-3.8
C(6)	126.9	132.1	133.3	0.7	134.9	1.5
C(7)	130.5	135.6	136.0	1.6	138.7	2.6
C(8)	128.4	134.5	137.7	-1.1	137.2	-0.6
C(9)	126.7	154.0	156.9	-1.3	155.8	-1.1
C(10)	147.7	132.5	135.6	-1.4	132.4	-3.2
H(11)			9.2			
H(12)	7.35	7.49	7.7	-0.1	7.7	0.0
H(13)	8.05	8.28	8.5	-0.1		
H(14)	7.75	8.06	8.2	0.0	8.5	0.3
H(15)	7.56	7.84	7.9	0.0	8.0	0.1
H(16)	7.71	8.05	8.1	0.0	8.2	0.1
H(17)	8.00	8.20	8.5	-0.2	8.3	-0.1

3.4. Karakteristik elektronik özellikler

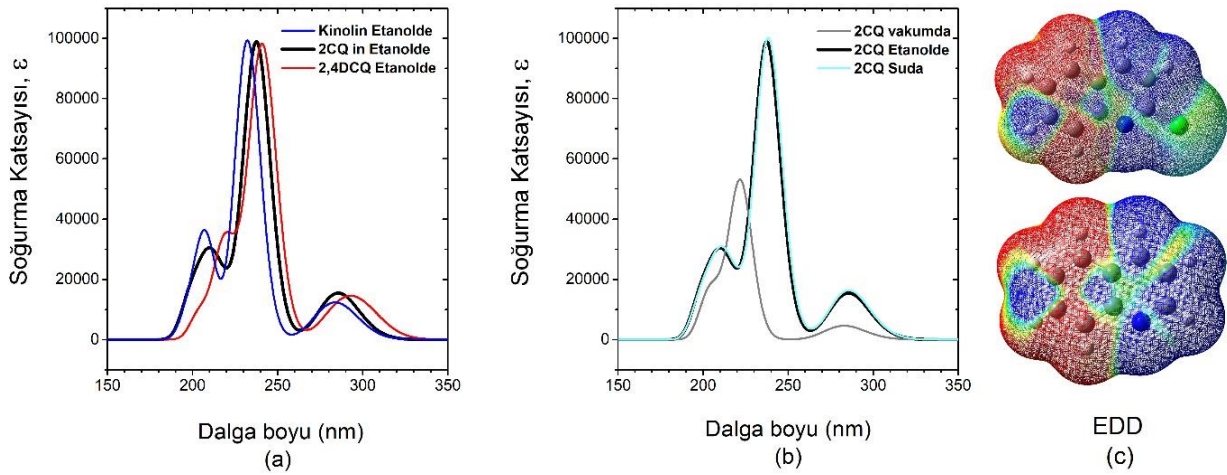
3.4.1 UV-Vis spektrumu ve moleküler orbital analizi

Elektronik absorpsiyon spektrumları, elektronik geçişleri anlamak ve 2CQ'nun UV-Vis spektrumunu tahmin etmek için teorik olarak gaz fazı, su ve etanol solventlerinde elde edildi. Hesaplamalar Zamana Bağlı Yoğunluk Fonksiyoneli Teorisi (Time-Dependent Density Functional Theory, TD-DFT) (Guillaumont & Nakamura, 2000; Runge & Gross, 1984; Zangwill & Soven, 1980) B3LYP metodu ve 6–311++G(d,p) temel seti kullanılarak gerçekleştirildi. Klor

ikamesinin etkisini ortaya koyabilmek adına da aynı modellemeler kinolin ve 2,4CDQ için de gerçekleştirildi. Elde edilen spektrumlar ve 2CQ ve kinolin için taban durumdan ilk uyarılmış duruma geçişte elektron yoğunluğundaki değişim (Electron Density Difference, EDD) in haritalanması **Şekil 5**'te sunulmuştur. Klor ikamesinin soğurma spektrumundaki tüm piklerde batokromik kaymaya sebep olduğu görülmektedir, **Şekil 5-a**. Molekülün gaz fazındaki spektrumunun da çözücü ortamındaki spektrumlarından oldukça yüksek enerjilerde olacağı kaydedilmiş, ancak farklı çözücüler içinde alınmış

spektrumlarında, çözücülerin kutupluluk ve dipol momentleri oldukça farklı olmasına rağmen, kayda değer bir farklılığın olmadığı görülmüştür, **Şekil 5-b**. Moleküle ait gaz fazında, etanol ve su çözücüsünde hesaplanan dalga boyları λ (nm), uyarılma enerjileri (eV) salınım şiddeti (f), her bir uyarılmaya karşılık gelen muhtemel geçişler **Çizelge 4**'te verildi. Her bir dalga boyundaki muhtemel geçiş durum işaretlemesi (majör katkılar) GaussSum 2.2 (O'Boyle et al., 2008) programı ile yüzde olarak elde edildi. Spektrumda temel olarak üç pik görülmektedir. Yapılan analiz bu piklerin kayda değer salınım frekansına sahip beş

geçişin bir sonucu olduğunu ortaya koymaktadır. λ_{max} pikinin iki yakın geçişin bir sonucu olduğu ve büyük oranda HOMO-LUMO geçişinden kaynaklandığını, bununla beraber HOMO-1 ve LUMO+1 seviyelerinde bu geçişlerde rol aldığını göstermektedir. En yüksek genlikli pikin tek pik olarak HOMO-1'den LUMO'ya ve HOMO'dan LUMO+1'e olan geçişlerin bir kombinasyonu olduğu kaydedilmiştir. En yüksek enerjili geçişinde yine tek bir pik olduğu ancak bu pikin HOMO-1'den LUMO+1'e ve HOMO'dan LUMO+2'ye olan geçişlerin bir kombinasyonu olduğu bulunmuştur.



Şekil 5 (a) 2CQ, kinolin ve 2,4DCQ moleküllerinin karşılaştırmalı UV-Vis spektrumları, (b) 2CQ molekülünün vakum, su ve etanol ortamlarındaki UV-Vis spektrumu, (c) 2CQ (üstteki) ve kinolin (alttaki)'in EDD haritası.

Çizelge 4 2CQA molekülünün UV-Vis spektrumunda gözlene piklere karşılık gelen dalga boyları, λ , uyarılma enerjileri, E, salınım şiddeti, f , ve elektronik geçişler.

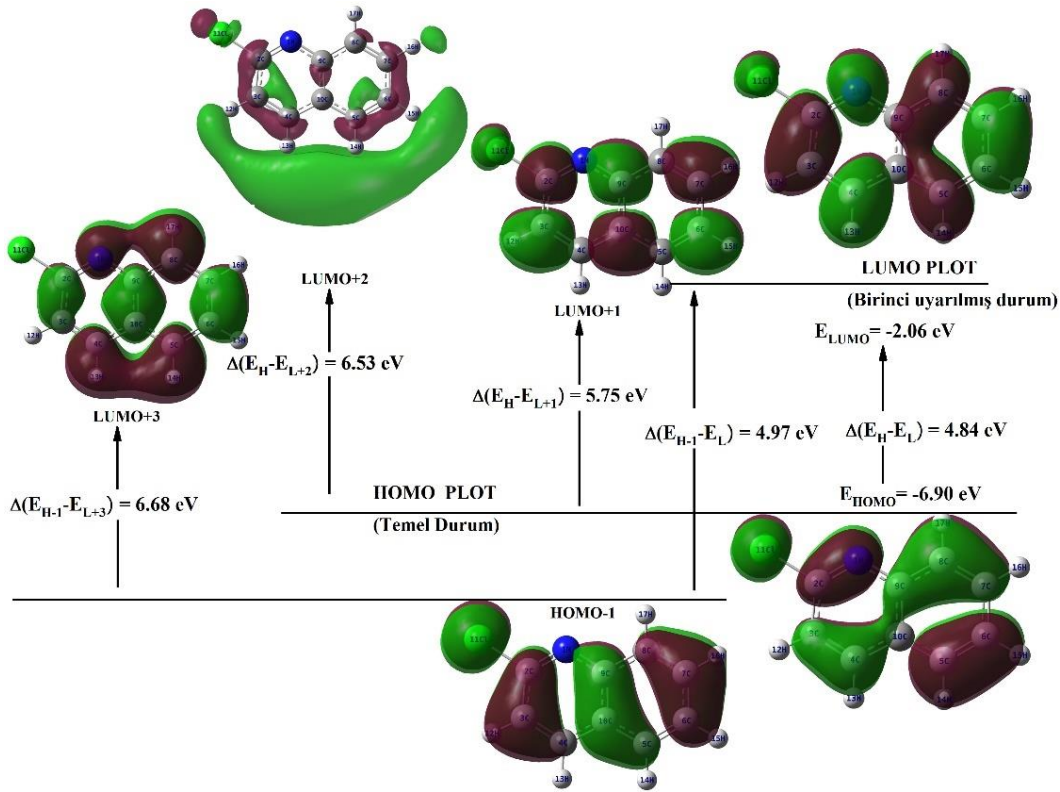
Çözücü	λ (nm)	E (eV)	f (a.u.)	Majör katkılar
Gaz	287.89	4.3072	0.0361	H-1→L (12%), H→L (75%)
	278.71	4.4490	0.0377	H-1→L (56%), H→L (18%), H→L+1 (24%)
	222.10	5.5830	0.7369	H-4→L (11%), H-1→L (24%), H→L+1 (50%)
	207.69	5.9705	0.1632	H-4→L (21%), H-1→L+1 (25%), H→L+3 (43%)
	201.59	6.1510	0.1328	H-5→L (10%), H-1→L+3 (73%)
Su	288.11	4.3040	0.0426	H→L (89%)
	280.59	4.4192	0.0661	H-1→L (66%), H→L+1 (27%)
	225.72	5.4936	1.0625	H-1→L (26%), H→L+1 (61%)
	206.39	6.0079	0.2396	H-1→L+1 (29%), H→L+2 (53%)
Etanol	200.42	6.1870	0.2022	H-1→L+2 (79%)
	288.21	4.3025	0.0438	H→L (88%)
	280.65	4.4183	0.0677	H-1→L (66%), H→L+1 (27%)
	226.12	5.4837	1.0777	H-1→L (26%), H→L+1 (61%)
	206.61	6.0017	0.2412	H-1→L+1 (40%), H→L+2 (44%)
	200.55	6.1831	0.1998	H-1→L+2 (79%)

Gözlenen seviyeler arası geçişlerde moleküler orbitallerin aldığı şekillenimler ve enerji seviyeleri arası geçişler için gerekli enerji miktarları **Şekil 6**'da detaylı olarak sunulmuştur. Molekülün taban ve ilk uyarılmış durumlarında orbitallerin halkalarda π orbitalleri üzerinde yoğunlaşmasının yanında klor atomu üzerinde de

yerleşiminin olduğu ancak yüksek uyarılmış seviyelerde orbital halkaları çevreleyen hidrojen atomlarına doğru kaydığı ve klor atomu üzerinde yoğunlaşmanın ortadan kalktığı görülmektedir. Sınır orbitalleri, molekül içi etkileşimlerde moleküler orbital oluşumunda önemli rol oynar. Elektron verme ve alma yatkınlığı, HOMO ve LUMO

enerjisi ve HOMO ile LUMO arasındaki fark ise moleküler kimyasal kararlılığı tanımlar (Atkins & de Paula, 2014; Fukui, 1982). LUMO değerinin negatif iyonlaşma potansiyeli (I) ve HOMO değerinin negatif ise elektron alma yatkınlığı (H) nı tanımlar. Bu değerlere bağlı olarak kimyasal sertlik $\eta=(I-H)/2$ olarak tanımlanır. Kimyasal sertliği yüksek olması molekülün molekül içi yük transferinin az veya olmadığını gösterir. Bu bağlamda enerji aralığı ne kadar büyükse kimyasal sertlik o kadar

fazla olur ve dolayısıyla yük transferi olasılığı gitgide azalır. Elektrofilik indeks (ω) (Parr et al., 1989), kararlılığın bir ölçüsü olup, $\omega=\mu^2/2\eta$ ile ifade edilir. Elektronegatiflik (χ) moleküldeki bir atomun elektronları çekme gücünü ifade etmektedir. Orbital enerji değerleri ve tanımlanan bu reaktivite parametreleri kinolin molekülüne ait değerler ile çözücü etkisini de ortaya koyacak şekilde **Çizelge 5**'te sunulmuştur.



Şekil 6 2CQ molekülünün moleküler orbital enerji seviyeleri ve enerji farkları diyagramı.

Çizelge 5 2CQA moleküllerinin TD-DFT metodu ile hesaplanan elektronik geçişlerde etkin rolü olan temel ve uyarılmış durumların enerji değerleri ile kimyasal sertlik, elektronegatiflik, elektrofilik index değerleri.

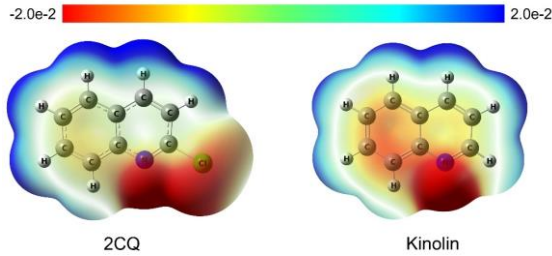
TD-DFT B3LYP/6-311++G(d,p)	2CQ			Kinolin		
	Gaz	Etanol	Su	Gaz	Etanol	Su
E_{HOMO} (eV)	-6.90	-6.89	-6.90	-6.65	-6.73	-6.74
E_{LUMO} (eV)	-2.06	-2.06	-2.06	-1.82	-1.90	-1.90
$E_{HOMO-LUMO}$ gap (eV)	4.84	4.83	4.84	4.83	4.83	4.84
Kimyasal sertlik (h)	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42
Elektronegatiflik (χ)	4.48	4.48	4.48	4.24	4.32	4.32
Elektrofilik indeks (ω)	4.15	4.15	4.15	3.71	3.85	3.86

Çalışmada yer alan molekül için kimyasal sertlik değerleri çok büyük değildir. Elektronegatiflik ve kimyasal potansiyel değerleri ise sertliğe göre büyük kabul edilebilir. Bu da molekülde yer alan elektronegatifliği fazla olan klor atomundan kaynaklı olabilir. Molekülün reaktivite parametrelerinin, UV-Vis spektrumlarından da

anlaşıldığı üzere, çözücü farklılığından etkilenmediği görülmektedir. Molekülde klor ikamesinin ise hem elektronegativiteyi hem de elektrofiliğini artırdığı görülmektedir. Bunun klor atomunun yarattığı molekül içi yük dağılımındaki asimetriden kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.4.2. Moleküler elektrostatik potansiyel yüzey (MEP) analizi

Moleküler elektrostatik potansiyel yüzey (MEP), elektron yoğunluğu ile doğrudan ilgili ve hidrojen bağlarının yanı sıra nükleofilik ve elektrofilik atak bölgelerinin belirlenmesi için en önemli tanımlayıcılardandır. Moleküllerin MEP yüzeyi yoğunlukla moleküllerin reaktif davranışlarını pozitif ve negatif bölgeleri sırasıyla elektrofilik ve nükleofilik bölgeler olarak belirler ve kırmızı renk negatif kısımları mavi renk pozitif kısımlar gösterir (Arivazhagan & Anitha Rexalin, 2012; Luque et al., 2000; Okulik & Jubert, 2005). 2CQ ve kinolin molekülüne ait MEP yüzeyleri Şekil 7'de sunulmuştur. Kinolin molekülünde azot atomunun olduğu bölge nükleofilik ataklar için en uygun olmasının yanı sıra halkaların da π orbitalleri aracılığı ile nükleofilik etkileşimlere açık olduğu, özellikle 2.halkanın daha negatif bir yük yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir. Bu durum 2CQ molekülü için klor atomunun ikamesi ile kayda değer bir değişime uğramıştır. Halkaların reaktifliğinin azaldığı ve klor atomunun negatif yük dağılımını daha kutupsal bir yönelime taşıdığı görülmektedir. Bunun yanında 2CQ molekülündeki hidrojen atomlarının elektrofilik etkileşmeye yatkınlıklarının da arttığı görülmektedir.



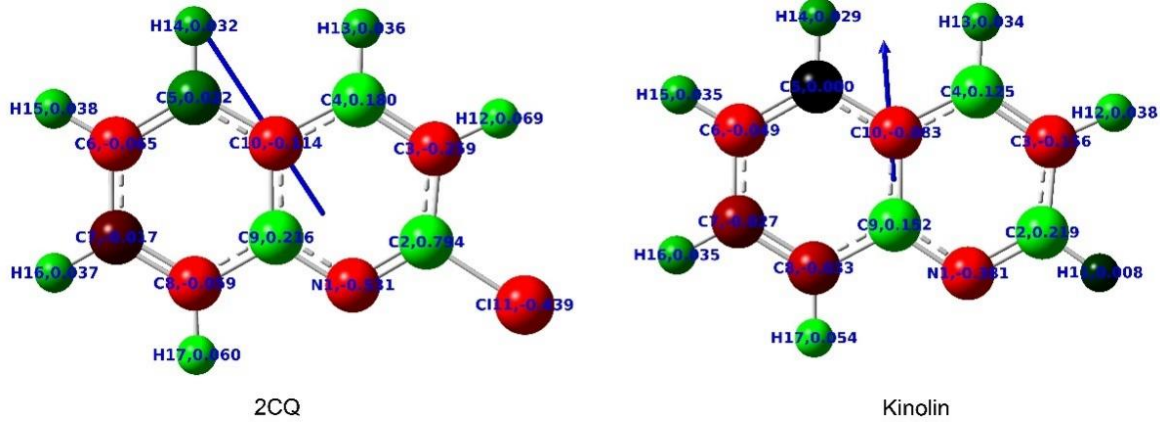
Şekil 7 2CQ ve Kinolin moleküllerine ait MEP yüzeyleri

3.4.3. Atomik yük dağılımları

Reaktif yük dağılımları, moleküler sistemlerde kuantum mekaniksel hesaplarda önemli rol oynar. Atomik yük dağılımları Mulliken popülasyon analizinden (Mulliken, 1955) ve Atomik Polar Tensör (APT)'e göre iki farklı yöntem izlenerek değerlendirilmiş 2CQ ve kinolin için hesaplanan atomik yük değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 6 da sunulmuştur. Atomların taşıdıkları yükler göre renklendirildiği yük dağılımları ve moleküllere ait dipol moment temsillemesi Şekil 6'da sunulmuştur. Mulliken popülasyon analizinin ürettiği sonuçlara göre azot ve klor atomları pozitif yüke sahip olmaları gerekir ki bu durum MEP yüzeyi analizinde elde edilen sonuçlar ile çelişmekte ve bu atomların doğalarına aykırı bir sonuç ortaya koymaktadır. Bunun da ötesinde C9 ve C10 karbon atomları için sırasıyla negatif ve pozitifte kabul edilemez sonuçlar üretmektedir. Tabii ki bu durum Mulliken yüklerinin tamamen kullanışsız olduğu anlamını ortaya koymaz. Literatürde daha düşük temel setler kullanılarak yapılan hesaplamalarda Mulliken yüklerinin makul sonuçlar üretebildiği görülmekte ve yayılma ve polarizasyon etkisi yüksek temel setler kullanılarak yapılan hesaplamalarda hatalı sonuçlar ortaya koyabileceği belirtilmiştir (Kose et al., 2018). Bunun yanında, APT yüklerinin değerleri MEP yüzeyine oldukça uygundur. Azot ve klor atomları için makul bir negatiflik üretmiş, tüm hidrojenlerin pozitif yüke sahip olacağını ve karbon atomlarının küçük değerler ile değişiklikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Atomik yükler bakımından klor ikamesinin hem kendisinin bir negatif yüke sahip olduğu hem de azot atomunu daha negatif hale getirdiği söylenebilir. Azot atomunun kinolindeki yükü -0.381 iken 2CQ'da -0.531 olarak kaydedilmiştir.

Çizelge 6 Kinolin ve 2CQ'ya ait Mulliken ve Atomik Polar Tensör (APT) atomik yükleri.

Atom	Kinolin		2CQ		Atom	Kinolin		2CQ				
	APT	Mulliken	APT	Mulliken		APT	Mulliken	APT	Mulliken			
1	N	-0.381	0.049	-0.531	0.212	11	H	0.008	0.197	Cl	-0.439	0.446
2	C	0.219	0.041	0.794	-0.292	12	H	0.038	0.180	H	0.069	0.210
3	C	-0.156	-0.235	-0.259	-0.137	13	H	0.034	0.158	H	0.036	0.165
4	C	0.125	-0.183	0.180	-0.563	14	H	0.029	0.135	H	0.032	0.140
5	C	0.000	0.000	0.022	-0.049	15	H	0.035	0.166	H	0.038	0.171
6	C	-0.049	-0.183	-0.065	-0.170	16	H	0.035	0.167	H	0.037	0.172
7	C	-0.027	-0.330	-0.017	-0.329	17	H	0.054	0.195	H	0.060	0.202
8	C	-0.033	-0.464	-0.059	-0.524							
9	C	0.152	-1.992	0.216	-1.701							
10	C	-0.083	2.097	-0.114	2.046							



Şekil 8 2CQ ve Kinolin moleküllerinin atomik polar tensör yükleri. Atomlar yüklerine göre renklendirilmiş ve mavi ok dipol momentin yön ve büyüklüğünü temsil etmektedir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

2-klorokinolin molekülünün elektronik yapı ve spektroskopik özelliklerinin ortaya konulduğu bu çalışmada, klor ikamesinin molekülün reaktivitesine ve elektronik yapı özelliklerine etkileri kinolin molekülü ve bazı durumlarda 2,4-klorokinolin molekülü ile karşılaştırmalı olarak sunuldu. Çalışmada sürdürülen elektronik yapı modellemelerinin mevcut deneysel veriler ile yüksek düzeyde uyumlu sonuçlar ürettiği ve deneysel olarak elde edilemeyen detaylı bilgilerin ortaya konulabildiği görüldü. FT-IR ve Raman spektrumlarında görülen pikler temel titreşim modlarının PED analizi doğrultusunda detaylı olarak işaretlendi. Molekülün soğurma spektrumlarında farklı çözücülerin bir değişikliğe sebep olmadığı, ancak klor ikamesinin tüm piklerde batokromik kaymaya sebep olduğu bulundu. Elektronik seviyeler arası geçişlerin analizi soğurma spektrumunda gözlenen en yüksek dalga boyundaki soğurma pikinde HOMO ve LUMO seviyelerinden başka bunların alt ve üst seviyeleri arasındaki geçişlerin de etkili olduğunu gösterdi. Kinolin molekülüne kıyasla klor ikamesinin yarattığı molekül içi yük dağılımındaki asimetrinin bir sonucu olarak hem elektronegativiteyi hem de elektrofiliğini artırdığı görüldü. NMR spektrumlarının sonuçlarına göre klor ikamesinin halkalardaki karbon atomlarının perdelenmelerini etkilediği ve molekülün aromatikliğini düşürdüğü görüldü. MEP yüzeyleri analizine göre molekülün nükleofilik bölgesinin klor ikamesi ile daha etkin hale geldiği bulundu. Atomik yüklerin belirlenmesinde hesaplamalarda yayılma ve polarizasyon etkisi yüksek temel setlerin kullanılması durumunda Mulliken popülasyon analizinin geçersiz olacağı, bunun yerine APT yüklerinin daha anlamlı sonuçlar üretebildiği sonucuna varıldı.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: Araştırma, Yazma, Orijinal taslak, Metodoloji,

Yazar-2: Araştırma, Deneysel, Biçimsel analiz, Görselleştirme, Yazma, Kaynaklar

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği/ Data Availability Statement

Yazarlar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan ederler.

Teşekkür

Bu çalışmada yer alan tüm/kısmi nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FBE-2017/139 Proje Numarası ile desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

Arivazhagan, M., & Anitha Rexalin, D. (2012). FT-IR, FT-Raman, NMR studies and ab initio-HF, DFT-B3LYP vibrational analysis of 4-chloro-2-fluoroaniline. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **96**, 668–676.

<https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.07.040>

Arivazhagan, M., & Krishnakumar, V. (2005). Normal coordinate analysis of 1-chloroisoquinoline and 2-methyl-8-nitroquinoline. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, **43**, 573–578.

Arjunan, V., Mohan, S., Balamourougane, P. S., & Ravindran, P. (2009). Quantum chemical and spectroscopic investigations of 5-aminoquinoline. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **74(5)**, 1215–1223.

<https://doi.org/10.1016/j.saa.2009.09.039>

- Arjunan, V., Ravindran, P., Rani, T., & Mohan, S. (2011). FTIR, FT-Raman, FT-NMR, ab initio and DFT electronic structure investigation on 8-chloroquinoline and 8-nitroquinoline. *Journal of Molecular Structure*, **988(1)**, 91–101.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.12.032>
- Arjunan, V., Saravanan, I., Ravindran, P., & Mohan, S. (2009). Ab initio, density functional theory and structural studies of 4-amino-2-methylquinoline. *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **74(2)**, 375–384.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2009.06.028>
- Atkins, P., & de Paula, J. (2014). *Atkins' Physical Chemistry*. OUP Oxford.
- Balachandran, V., Boobalan, M., Amaladasan, M., & Velmathi, S. (2014). Synthesis and vibrational spectroscopic investigation of methyl l-prolinate hydrochloride: A computational insight. *Spectroscopy Letters*, **47(9)**, 676–689.
<https://doi.org/10.1080/00387010.2013.834456>
- Bardak, F., Karaca, C., Bilgili, S., Atac, A., Mavis, T., Asiri, A. M., Karabacak, M., & Kose, E. (2016). Conformational, electronic, and spectroscopic characterization of isophthalic acid (monomer and dimer structures) experimentally and by DFT. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **165**, 33–46.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.03.050>
- Becke, A. D. (1988). Density-functional exchange-energy approximation with correct asymptotic behavior. *Physical Review A*, **38(6)**, 3098–3100.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.38.3098>
- Becke, A. D. (1993). Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange. *The Journal of Chemical Physics*, **98(7)**, 5648–5652.
<https://doi.org/10.1063/1.464913>
- Davies, J. E., & Bond, A. D. (2001). Quinoline. *Acta Crystallographica Section E*, **57(10)**, 947–949.
- Deady, L. W., Desneves, J., Kaye, A., Finlay, G., Baguley, B., & Denny, W. (2001). Positioning of the carboxamide side chain in 11-oxo-11H-indeno[1,2-b]quinolinecarboxamide anticancer agents: Effects on cytotoxicity. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, **9(2)**, 445–452.
[https://doi.org/10.1016/S0968-0896\(00\)00264-9](https://doi.org/10.1016/S0968-0896(00)00264-9)
- Dennington, R., Keith, T., & Millam, J. (2009). GaussView, Version 5. In *Semichem Inc., Shawnee Mission KS* (GaussView, Version 5.).
- Ditchfield, R. (1972). Molecular Orbital Theory of Magnetic Shielding and Magnetic Susceptibility. *The Journal of Chemical Physics*, **56(11)**, 5688–5691.
<https://doi.org/10.1063/1.1677088>
- Dubé, D., Blouin, M., Brideau, C., Chan, C. C., Desmarais, S., Ethier, D., Falguyret, J. P., Friesen, R. W., Girard, M., Girard, Y., Guay, J., Riendeau, D., Tagari, P., & Young, R. N. (1998). Quinolines as potent 5-lipoxygenase inhibitors: Synthesis and biological profile of L-746,530. *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, **8(10)**, 1255–1260.
[https://doi.org/10.1016/S0960-894X\(98\)00201-7](https://doi.org/10.1016/S0960-894X(98)00201-7)
- Fabian, J. (2010). TDDFT-calculations of Vis/NIR absorbing compounds. *Dyes and Pigments*, **84(1)**, 36–53.
<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2009.06.008>
- Famin, O., Krugliak, M., & Ginsburg, H. (1999). Kinetics of inhibition of glutathione-mediated degradation of ferriprotoporphyrin IX by antimalarial drugs. *Biochemical Pharmacology*, **58(1)**, 59–68.
[https://doi.org/10.1016/S0006-2952\(99\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0006-2952(99)00059-3)
- Fort, P. O., Pinto, D. C. G. a, Santos, C. M. M., & Silva, A. M. S. (2007). Advanced NMR techniques for structural characterization of heterocyclic structures. In *Recent Research Developments in Heterocyclic Chemistry* (Vol. **661**, Issue 2).
- Friebolin, H. (2005). *Basic One- and Two-Dimensional NMR Spectroscopy*. Wiley.
- Frisch, M. J., Trucks, G. W., Schlegel, H. B., Scuseria, G. E., Robb, M. A., Cheeseman, J. R., Scalmani, G., Barone, V., Mennucci, B., Petersson, G. A., Nakatsuji, H., Caricato, M., Li, X., Hratchian, H. P., Izmaylov, A. F., Bloino, J., Zheng, G., Sonnenberg, J. L., Hada, M., ... Gaussian 16 Revision A.03 (Gaussian, Inc., Wallingford CT,). (2016). *Gaussian 16 Revision A.03* (A.03). Gaussian, Inc., Wallingford, CT.
- Fujita, M., Chiba, K., Tominaga, Y., & Hino, K. (1998). 7-(2-Aminomethyl-1-azetidiny)-4-oxoquinoline-3-carboxylic Acids as Potent Antibacterial Agents: Design, Synthesis, and Antibacterial Activity. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, **46(5)**, 787–796.
<https://doi.org/10.1248/cpb.46.787>
- Fukui, K. (1982). Role of frontier orbitals in chemical reactions. *Science (New York, N.Y.)*, **218(4574)**, 747–754.
<https://doi.org/10.1126/science.218.4574.747>
- Guillaumont, D., & Nakamura, S. (2000). Calculation of the absorption wavelength of dyes using time-dependent density-functional theory (TD-DFT). *Dyes and Pigments*, **46(2)**, 85–92.
[https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(00\)00030-9](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(00)00030-9)
- Gupta, R., Gupta, A. K., Paul, S., & Kachroo, P. L. (1998). Synthesis and biological activities of some 2-chloro-6/8-substituted-3-(3-alkyl aryl-5, 6-dihydro-s-triazolo-[3, 4-h][1, 3, 4] thiadiazol-6-yl) quinolines. *Indian Journal of Chemistry*, **37B**, 1211–1213.

- Gupta, R., Gupta, A. K., Paul, S., & Somal, P. (2000). Microwave-assisted synthesis and biological activities of some 7/9-substituted-4-(3-alkyl/aryl-5, 6-dihydro-s-triazolo [3, 4-b][1, 3, 4] thiadiazol-6-yl) tetrazolo [1, 5-a] quinolines. *Indian Journal of Chemistry*, **39B**, 847–852.
- Hohenberg, P., Kohn, W., & Khon, W. (1964). Inhomogeneous Electron Gas. *Physical Review*, **136(3B)**, 864–871.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.136.B864>
- Ismail, F. M. D., Dascombe, M. J., Carr, P., Mérette, S. A. M., & Rouault, P. (1998). Novel aryl-bis-quinolines with antimalarial activity in-vivo. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, **50(5)**, 483–492.
<https://doi.org/10.1111/j.2042-7158.1998.tb06189.x>
- Jamróz, M. H. (2013). Vibrational energy distribution analysis (VEDA): scopes and limitations. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **114**, 220–230.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.05.096>
- Kalinowski, H. O., Berger, S., & Braun, S. (1988). *Carbon-13 NMR spectroscopy*. Wiley.
- Khan, K. M., Saify, Z. S., Khan, Z. A., Ahmed, M., Saeed, M., Schick, M., Kohlbau, H. J., & Voelter, W. (2000). Syntheses and cytotoxic, antimicrobial, antifungal and cardiovascular activity of new quinoline derivatives. *Arzneimittelforschung*, **50(10)**, 915–924.
<https://doi.org/10.1055/s-0031-1300313>
- Kidwai, M., Bhushan, K. R., Sapra, P., Saxena, R. K., & Gupta, R. (2000). Alumina-supported synthesis of antibacterial quinolines using microwaves. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, **8(1)**.
[https://doi.org/10.1016/S0968-0896\(99\)00256-4](https://doi.org/10.1016/S0968-0896(99)00256-4)
- Kimmel, R., Nečas, M., & Vícha, R. (2010). 2,4-Dichloroquinoline. *Acta Crystallographica Section E Structure Reports Online*, **66(6)**, o1261–o1261.
<https://doi.org/10.1107/S160053681001576X>
- Kose, E., Atac, A., & Bardak, F. (2018). The structural and spectroscopic investigation of 2-chloro-3-methylquinoline by DFT method and UV–Vis, NMR and vibrational spectral techniques combined with molecular docking analysis. *Journal of Molecular Structure*, **1163**, 147–160.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.02.099>
- Kose, E., Karabacak, M., & Atac, A. (2015). The spectroscopic and quantum chemical studies of 3,4-difluoroaniline. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **143C**, 265–280.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.01.079>
- Kumru, M., Altun, A., Kocademir, M., Küçük, V., Bardakçı, T., & Şaşmaz, B. (2016). Combined experimental and quantum chemical studies on spectroscopic (FT-IR, FT-Raman, UV–Vis, and NMR) and structural characteristics of quinoline-5-carboxaldehyde. *Journal of Molecular Structure*, **1125**, 302–309.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.06.066>
- Lee, C., Yang, W., & 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.
- Luque, F. J., López, J. M., & Orozco, M. (2000). Perspective on “Electrostatic interactions of a solute with a continuum. A direct utilization of ab initio molecular potentials for the prevision of solvent effects.” *Theoretical Chemistry Accounts: Theory, Computation, and Modeling (Theoretica Chimica Acta)*, **103(3–4)**, 343–345.
<https://doi.org/10.1007/s002149900013>
- Mulliken, R. S. (1955). Electronic Population Analysis on LCAO-MO Molecular Wave Functions. I. *The Journal of Chemical Physics*, **23(10)**, 1833–1840.
<https://doi.org/10.1063/1.1740588>
- Oanca, G., Stare, J., Todirascu, A. G., Creanga, D., & Dorohoi, D. O. (2016). Substituent influence on the spectra of some benzo[f]quinoline derivatives. *Journal of Molecular Structure*, **1126**, 158–164.
<https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2016.03.072>
- O’Boyle, N. M., Tenderholt, A. L., & Langner, K. M. (2008). Software News and Updates cclib : A Library for Package-Independent Computational Chemistry Algorithms. *Journal of Computational Chemistry*, **29(5)**, 839–845.
<https://doi.org/10.1002/jcc.20823>
- Okulik, N., & Jubert, A. H. (2005). Theoretical analysis of the reactive sites of non-steroidal anti-inflammatory drugs. *Internet Electronic Journal of Molecular Design*, **4**, 17–30.
- Ozel, A. E., Celik, S., & Akyuz, S. (2009). Vibrational spectroscopic investigation of free and coordinated 5-aminoquinoline: The IR, Raman and DFT studies. *Journal of Molecular Structure*, **924**, 523–530.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.12.065>
- Parr, R. G., & Pearson, R. G. (1983). Absolute hardness: companion parameter to absolute electronegativity. *Journal of the American Chemical Society*, **105(26)**, 7512–7516.
<https://doi.org/10.1021/ja00364a005>
- Parr, R. G., Weitao, Y., & Yang, W. (1989). *Density-Functional Theory of Atoms and Molecules*. Oxford University Press, USA.
- Pathak, S. K., Haress, N. G., El-Emam, A. A., Srivastava, R., Prasad, O., & Sinha, L. (2014). Structural, spectroscopic

- (FT-IR, FT-Raman and UV) studies, HOMO–LUMO, NBO, NLO analysis and reactivity descriptors of 2,3-Difluoroaniline and 2,4-Difluoroaniline. *Journal of Molecular Structure*, **1074**, 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2014.06.036>
- Pihlaja, K., & Kleinpeter, E. (1994). *Carbon-13 NMR Chemical Shifts in Structural and Stereochemical Analysis*. VCH.
- Pretsch, E., Bühlmann, P., & Affolter, C. (2009). Structure determination of organic compounds. In *East China University of Science and Technology ...* (Fourth, Re, Vol. **40**, Issue 3). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-93810-1>
- Runge, E., & Gross, E. K. U. (1984). Density-Functional Theory for Time-Dependent Systems. *Physical Review Letters*, **52(12)**, 997–1000.
- SDBS Web: <http://sdb.s.riondb.aist.go.jp> (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology). (2018). *SDBS Web: http://sdb.s.riondb.aist.go.jp (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)*. http://sdb.s.db.aist.go.jp/sdb/cgi-bin/direct_frame_top.cgi
- Silverstein, R. M., Bassler, G. C., & Morrill, T. C. (1981). *Spectrometric identification of organic compounds*. Wiley.
- Silverstein, R. M., Webster, F. X., & Kiemle, D. J. (2005). *Spectrometric identification of organic compounds*. John Wiley & Sons.
- Sivaprakash, S., Prakash, S., Mohan, S., & Jose, S. P. (2017). Molecular structure, vibrational analysis (IR and Raman) and quantum chemical investigations of 1-aminoisoquinoline. *Journal of Molecular Structure*, **1149**, 835–845. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.08.060>
- Socrates, G. (2001). *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts*. John Wiley & Sons Ltd.
- Strekowski, L., Honkan, V. A., Czarny, A., Cegla, M. T., Wydra, R. L., Patterson, S. E., Mokrosz, J. L., & Schinazi, R. F. (1991). Synthesis and Quantitative Structure-Activity Relationship Analysis of 2-(Aryl or Heteroaryl)quinolin-4-amines, a New Class of Anti-HIV-1 Agents. *Journal of Medicinal Chemistry*, **34(5)**, 1739–1746. <https://doi.org/10.1021/jm00109a031>
- Sundaraganesan, N., Karpagam, J., Sebastian, S., & Cornard, J. P. (2009). The spectroscopic (FTIR, FT-IR gas phase and FT-Raman), first order hyperpolarizabilities, NMR analysis of 2,4-dichloroaniline by ab initio HF and density functional methods. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **73(1)**, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2009.01.007>
- Tewari, S., Chauhan, P. M. S., Bhaduri, A. P., Fatima, N., & Chatterjee, R. K. (2000). Syntheses and antifilarial profile of 7-chloro-4(substituted amino) quinolines: A new class of antifilarial agents. *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, **10(13)**, 1409–1412. [https://doi.org/10.1016/S0960-894X\(00\)00255-9](https://doi.org/10.1016/S0960-894X(00)00255-9)
- Varsányi, G. (1973). *Assignments for vibrational spectra of 700 benzene derivatives*. Halsted Press. [https://doi.org/10.1016/0022-2860\(75\)85047-2](https://doi.org/10.1016/0022-2860(75)85047-2)
- Wolinski, K., Hinton, J. F., & Pulay, P. (1990). Efficient implementation of the gauge-independent atomic orbital method for NMR chemical shift calculations. *Journal of the American Chemical Society*, **112(23)**, 8251–8260. <https://doi.org/10.1021/ja00179a005>
- Zangwill, A., & Soven, P. (1980). Density-functional approach to local-field effects in finite systems: Photoabsorption in the rare gases. *Physical Review A*, **21(5)**, 1561–1572. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.21.1561>
- Ziegler, J., Linck, R., & Wright, D. W. (2001). Heme aggregation inhibitors: Antimalarial drugs targeting an essential biomineralization process. *Studies in Natural Products Chemistry*, **25**, 327–366. [https://doi.org/10.1016/S1572-5995\(01\)80011-9](https://doi.org/10.1016/S1572-5995(01)80011-9)



Atmosferik Basınç Hava Plazması ile Denim Ağartma İşlemi Yapılarak Silikozis Hastalığının Azaltılmasına Yönelik Alternatif Bir Çalışma

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 29.11.2023

Kabul/Accepted: 13.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

An Alternative Study for Reducing Silicosis Disease by Denim Bleaching with Atmospheric Pressure Air Plasma

Ferhat BOZDUMAN*

Karabük Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Biyofizik Anabilim Dalı, Karabük, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Günümüzde denim ağartma işlemlerinde kullanılan silika tekniği ile taşlama bu sektörde çalışan insanların hayatları üzerinde büyük tehlikeler oluşturmaktadır. Uzun çalışma yıllarında çalışanlar üzerinde kalıcı hasara sebep olan bu hastalık silikozis olarak tanımlanmaktadır. Bu sektörde çalışan insanlarda hastalığa yakalanma sayısı her geçen gün artmaktadır. Camın hammaddesi olan silisyum ile bu taşlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlem esnasında yüzeye yüksek basınç altında sıkıştırılan kumlar gönderilerek yüzeyden boyanın sökülmesi sağlanmaktadır. Bu çalışmada atmosferik basınç plazma tekniği kullanılarak denim üzerinde kimyasal kullanmadan ve ortama kimyasal salınmadan ağartma işleminin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Maddenin 4. hali olan plazma, hava kullanılarak oluşturulmuştur. Havanın iyonize edilerek plazmaya dönüştürülmesi için kapasitif elektrot dizaynı plazma kalemi kullanılmıştır. Plazmanın aşındırıcı ve sökücü etkisinden yararlanılarak denim yüzeyinde ağartma işlemi başarı ile gerçekleştirilmiştir. Geleneksel taşlama yöntemi ile kıyaslandığında plazma işleminin vücuda herhangi bir zararının olmadığı raporlanmıştır. Ağartma işleminin gerçekleştiğini ve denim yüzeyine herhangi bir zarar vermediğini belirtmek için elektron ve ışık mikroskobu kullanılarak detaylı yüzey morfolojisi analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında denim yüzeyinde plazmadan kaynaklı bir hasarın oluşmadığı tespit edilmiştir. Renkli kameralı ışık mikroskobu ile oluşan renk tonu farklılığından ağartma işleminin gerçekleştiği sonucuna ulaşıktık.

Anahtar Kelimeler: Silikozis; Denim; Ağartma; Atmosferik basınç plazma; Taşlama.

Abstract

Grinding with silica technique used in denim bleaching processes today poses great dangers to the lives of people working in this sector. This disease, which causes permanent damage to employees during long working years, is defined as silicosis. The number of people working in this sector is increasing day by day. This grinding process is carried out with silicon, which is the raw material of glass. During this process, sand compressed under high pressure is sent to the surface to remove the paint from the surface. In this study, it is aimed to perform bleaching process on denim without using chemicals and without releasing chemicals into the environment by using atmospheric pressure plasma technique. Plasma, the state of matter 4, was created using air. A plasma pen with capacitive electrode design was used to ionize the air and convert it into plasma. By utilizing the abrasive and removing effect of plasma, the bleaching process was successfully carried out on the denim surface. Compared to the traditional grinding method, the plasma process is reported to have no harm to the body. Detailed surface morphology analyses were performed using electron and light microscopy to confirm that the bleaching process was successful and did not cause any damage to the denim surface. When the analysis results were analyzed, it was determined that there was no damage caused by plasma on the denim surface. We concluded that the bleaching process took place from the color tone difference formed by the color camera light microscope.

Keywords: Silicosis; Denim; Bleaching; Atmospheric pressure plasma; Grinding.

1. Giriş

Çağımızda yaygın olarak kullanılan kot pantolonlar birçok insan tarafından vazgeçilmez hale gelmiş bir tüketim ürünü olarak yerini almıştır. Bir denim giysinin tüm yaşam döngüsü boyunca çevreye etkisi oldukça önemlidir ve çevre dostu olabilmesi için bu etkinin önemli ölçüde azaltılması gerekir (Rıza vd. 2023). Kot pantolonlar da desen görünüşüne üretici firmalar önem vermektedir. Bu nedenle silika kumunu yüksek basınç altında kot pantolona püskürterek kumlama işlemi yapılmakta ve

uygulanan bölge ağartılmaktadır. Değişik hareketler sergilenerek farklı desenlerde kumlama yapılmaktadır. Bu işlemler denetimsiz ve kontrolsüz yapıldıkları zaman inorganik yapıda olan silika partiküllerinin inhalasyonu sonucu gelişme gösteren ve interstisyel bir akciğer hastalığı türü olarak adlandırılan silikozis meydana gelmektedir (Bakan 2011). Silikozis bir meslek hastalığı olarak geçmektedir (Akgün 2005). Denim ağartma işleminde, yıkama sırasında taşlamalı veya taşlamasız olarak sodyum hipoklorit veya potasyum permanganat gibi güçlü bir oksidatif ağartma maddesi eklenir. Üretilen

renk değişikliği genellikle ağartma sıvısı miktarının kuvvetine, sıcaklığa ve işlem süresine bağlı olarak daha belirginleşmektedir. Kısa işlem süresine sahip güçlü bir ağartıcının olması tercih edilir. Ağartılmış ürünlerde nötralizasyon işlemi yapılarak yeterli miktarda antikleme yapılmalı veya daha sonra sararmayı en aza indirmek için peroksit ile yıkanmalıdır (Ivedi vd. 2021).

Bu mevcut uygulama sistemlerine alternatif olarak plazma teknolojisi farklı bir bakış açısı sunmaktadır. Plazma, toplu davranış sergileyen yüklü türlerden (iyonlar ve elektronlar) ve nötr parçacıklardan (atomlar, moleküller ve radikaller) oluşan, elektriksel olarak yarı nötr bir ortamdır (yaklaşık olarak aynı sayıda pozitif ve negatif parçacık) (Domonkos ve Ticha 2023). Plazma bazlı yüzey modifikasyonu, plazma-katı etkileşimlerine göre üç ana kategoriye ayrılabilir: plazma kaplama; aşındırma/temizleme dekontaminasyonu ve işlevselleştirme.

Plazma aşındırma (yani atomların/iyonların/moleküler parçaların soyutlanması), bir malzemenin belirli parçalarının çıkarılmasına yönelik bir işlemdir (Domonkos ve Kromka 2022). Plazma işlemi, son on yılda tanıtılan tekstil malzemesi modifikasyonu için yeni bir yöntemdir. Tekstil malzemeleri üzerindeki işlemin, hacimsel özellikleri etkilemeden malzeme performansını değiştirmede başarılı olduğu kanıtlanmıştır (Inbakumar 2010). Üstelik plazma işlemi, hiçbir kimyasala ihtiyaç duyulmayan, tamamen kuru, tek adımlı bir işlemdir. Ayrıca diğer ağartma işlemleri ile kıyaslandığında plazma işleminde uygun çalışma parametreleri sağlandığında denim yüzeyinde sararma meydana gelmemektedir. Bu nedenle plazma muamelesi, geleneksel ıslak muamele potansiyel bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Bhat 2011, Cai ve Qiu 2006, Cai vd. 2003, Matthews vd. 2005, Peng vd. 2009, Vladimirtseva vd. 1995).

Çizelge 1, plazma işleminin geleneksel ıslak işleme göre avantajlarının bir karşılaştırmasını göstermektedir (Rauscher vd. 2010, Shishoo 2007). Geleneksel işlem görmüş ve plazma işlemine tabi tutulmuş pamuklu kumaşların verdiği sonuçlar, atık su ve ilgili kimyasalların atılmasından kaynaklanan sorunları en aza indirmek için karşılaştırılıp analiz edilmiştir. Ancak literatürde tekstil ağartma işlemleri ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu yüzden denim ağartma işlemlerinde atmosferik basınç plazma teknolojisinin kullanımı önemli bir yere sahiptir. Bu alanda çok az çalışma yapılmıştır. Ayrıca mevcut makalelerin çoğu, pamuklu kumaş üzerinde PVA'nın haşıl sökülümü için plazma işleminin uygulanmasıyla ilgilidir (Cai vd. 2003, Peng vd. 2009, Matthews vd. 2005).

Ayrıca, gri pamuklu kumaşın işlenmesinde daha temiz bir seçenek olarak atmosferik basınçlı plazma işleminin

kullanıldığı çok az çalışma rapor edilmiştir (Wang vd. 2013). Bu zorlu ve tehlikeli tekniklerin yanında lazer teknolojisi de kullanılmaktadır. Fakat lazer tekniğininde zehirli duman ve maliyet gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Çizelge 1. Plazma işleminin geleneksel ıslak kimyasal işlemeye göre sunduğu avantajların karşılaştırılması

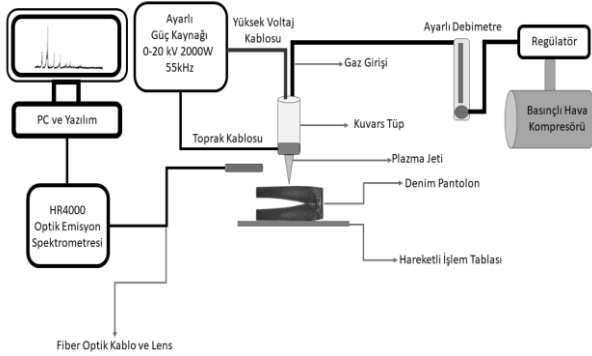
Üretim Operasyonu	Geleneksel Islak İşlem	Plazma İşlemi
Kimyasalların taşınması ve depolanması	Evet	Hayır
Kimyasalların ve banyoların hazırlanması	Evet	Hayır
Su kullanımı	Çok	Yok ya da çok az
Hammadde tüketimi	Yüksek	Nispeten düşük
Kurutma ve kütleme işlemleri	Evet	Hayır
İşlem adımlarının sayısı	Çoklu	Tek
Enerji tüketimi	Yüksek	Çok düşük
Ardışık atık su arıtmaları	Evet	Hayır
Çevreye zarar verme	Evet	Hayır
Ekipmanların kapladığı alan	Geniş	Küçük
Tek kisten çok yönlü üretim	Tek veya birkaç işlem seçeneğiyle sınırlıdır	Kite bağlı olarak, yüksek olabilir
İnovasyon potansiyeli	Olumlu	Çok yüksek

Diğer bir çalışmada Illy vd. (2020) atmosferik basınç plazmasını kullanarak denimde farklı tonlarda soldurma işlemleri yapmışlardır. Plazma sisteminin en önemli avantajı tehlikesiz olması ve maliyet açısından kurululumunun kolay olmasıdır. Plazma teknoloji özellikle sabit bir noktanın dışında CNC sistemlerine entegre edilerek farklı desenlerde ağartma işlemlerini mümkün kılmaktadır. Çalışmamız bu konu üzerine yoğunlaşmaktadır. Nemsiz kompresör havasını kullanarak atmosferik basınç plazması elde edilmiştir. Daha sonra bu plazma CNC sistemine entegre edilerek farklı desenlerin elde edilmesi sağlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmanın öncesi olarak kapasitif elektrot düzenekli bir plazma kalemi tasarlandı. Deşarj gazı olarak maliyet ve tehlikesizlik açısından nemi alınmış basınçlı hava kullanıldı. Basınçlı hava bir kompresör yardımı ile sağlandı. Deşarj gazı olarak hava kullanacağımız için plazmanın oluşturulmasını kolaylaştırmak amacıyla plazma kalemi içerisindeki yüksek voltaj elektrotunun gazı direkt olarak görmesi sağlandı. Yüksek voltaj elektrotu olarak 1mm çapında tungsten çubuk kullanıldı. Bu elektrot kalemin

merkezinde kalacak şekilde sabitlendi. Plazma kaleminin gövdesinde 10mm dış çapında, 8 mm iç çapında kuvars cam tüp kullanıldı. Toprak elektrotu ise plazma kaleminin nozul kısmına çıkış gazını görecektir şekilde yerleştirildi. Böylece akış halindeki gaz içerisinde deşarjın kolay bir şekilde oluşması mümkün oldu. Gaz akışının ölçülüp kontrol edilebilmesi için analog kontrollü debimetre kullanıldı. Yapılan çalışmanın deney şeması Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekil 2'de plazmanın oluşturulması için kullanılan plazma kaleminin detaylı şeması verilmiştir. Plazma kalemi kapasitif elektrot yapısıyla tasarlanmıştır. Aynı zamanda elektrotların ve gazın birbirlerini direkt olarak görmesi sağlanmıştır. Çünkü deşarj gazı olarak hava kullandığımız için iyonlaşma enerjisinden dolayı elektrotlar arasında dielektrik malzeme kullanmamamız gerekiyor. Deşarjın hava ortamında başlaması için elektrotlar arasında ark oluşması gerekmektedir. Kırılma voltajı dediğimiz bu olay plazmanın başlatılabilmesi için önemli bir koşuldur.



Şekil 1. Deney düzeneğinin bileşenleri

Gaz elektrotları direkt olarak görmelidir. Güç kaynağı olarak frekansı ve gücü kontrol edilebilen bir ünite kullanıldı. İşlem yapılacak malzeme olarak denim pantolon tercih edildi. Denim pantolon üzerine yapılması planlanan ağartma deseni bilgisayar ortamında çizilerek CNC cihazına aktarıldı. Bunun öncesinde plazma kalemi CNC cihazının Z eksine sabitlendi. İşlem sırasında dijital osiloskop, yüksek voltaj ve akım probu kullanılarak güç kaynağının çıkış parametreleri 12 kV, 55 kHz ve 10 mA olarak ölçüldü. Plazma jetinin sıcaklığını ölçmek için K tipi termokupl kullanıldı. Nozuldan çıkan plazma jetinin sıcaklığı 80 °C olarak ölçüldü. Plazma kaleminin sabit bir noktada durması yerine hareketli olması avantaj sağlamaktadır. Çünkü termal etkiden dolayı yüzey deforme olabilmektedir.

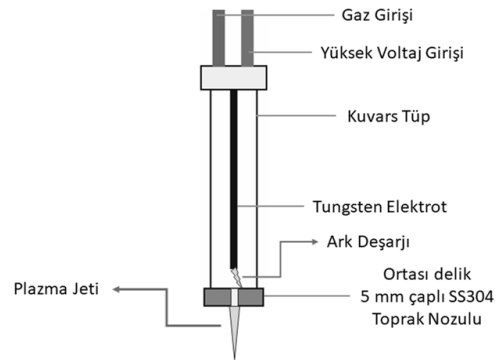
Bu çalışmada hava akış miktarı 50 lt/dk olarak ayarlandı. Plazma jet nozul uç çapı 5 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Plazma jet ile denim arasındaki mesafe 15 mm olarak optimize edildi. Böylece ideal sonuçlar için bu

parametreler sabitlendi. Çünkü akış miktarının ve güç parametrelerinin doğru ayarlanmaması sonucunda işlem yaparken denim yüzeyinin zarar gördüğünü gözlemledik. Uygulama sırasında oluşan plazmanın optik emisyon spektrometresi kullanılarak analizi yapıldı. Bu analizin sonucunda işlem sırasında ortamda oluşan serbest radikaller tespit edildi. Çizelge 2'de deney düzeneğinin çalışma parametrelere ve birimleri gösterilmiştir.

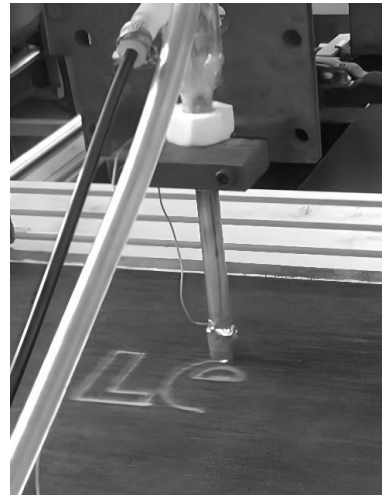
Şekil 3'de CNC tablasına bağlı olan atmosferik basınç plazma kaleminin denim üzerinde ağartma işlemi gösterilmektedir. CNC makinasındaki kodlar kontrol edilerek farklı desenlerde ağartma işlemi yapılması mümkün olmaktadır.

Çizelge 2. Plazma ünitesinin çalışma parametreleri

Parametre	Değer
Güç ve Voltaj	120W ve 12kV
Frekans	55 kHz
Çalışma Mesafesi	15 mm
Gaz Akışı	50 lt/dk
CNC XY Ekseni Hareket Hızı Z Ekseni: Sabit	5 m/dk



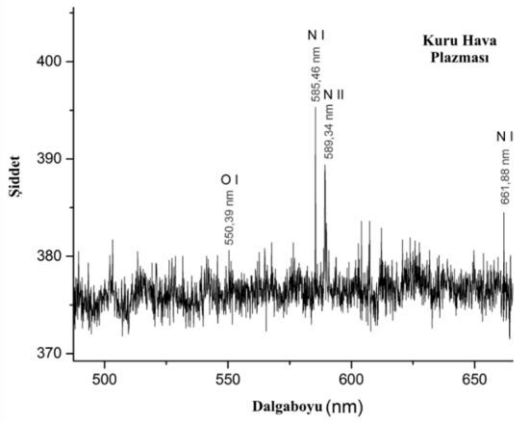
Şekil 2. Plazma kaleminin bileşenleri



Şekil 3. Plazma kaleminin denim üzerinde işlem yapması

3. Bulgular

Şekil 4'te Ocean Optics marka HR4000 model ve 200-1100 nm ölçüm aralıklı optik emisyon spektrometresi kullanılarak hava plazmasının spektrum değerleri elde edilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi havanın deşarjına bağlı olarak azot ve oksijen piklerinin oluştuğunu görülmektedir. 550 nm'de uyarılan oksijen O I çizgisi, 585 nm'de uyarılan azot N I çizgisi, 589,34 nm ve 661 nm'de 1. iyonlaşma düzeyinde olan azot N II çizgileri ortaya çıkmıştır. Çünkü kuru havanın bileşenleri %78 Azot ve %21 Oksijen 'den oluşmaktadır. Oluşturulan plazmaya yanıt veren ölçüm aralığı 450-700 nm'dir. Spektrum çizgileri NIST (Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü) web sayfasından referans olarak alınmıştır (NIST, 2023).

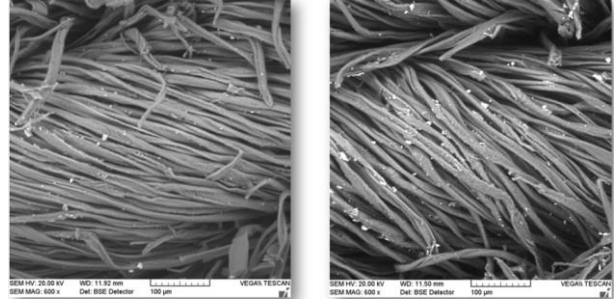


Şekil 4. Kuru hava plazmasının spektrum çizgileri

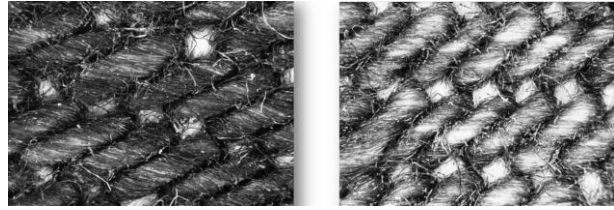
Uygulama sonrasında denim yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve ışık mikroskobu kullanılarak işlem öncesine ve işlem sonrasına ait görüntüleri alındı. Şekil 5'te TESCAN VEGA II LSU model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak denim yüzeylerinden elde edilen görüntüler verilmiştir. Görüntüleri incelediğimizde denim yüzeyine herhangi bir zararın verilmediği anlaşılmaktadır. Ölçümler büyütme olarak 600X seviyesinde olup analizlerin gerçekleştirilebilmesi için yeterli seviyede olduğuna karar verilmiştir. TEM görüntülerinde görülen beyaz partiküller plazma oluşumu sırasında yüksek debili akan havanın tozları dağıtmasından dolayı oluşmuştur.

SEM görüntüleri detaylı olarak incelendiğinde denim yapı bütünlüğünde herhangi bir parçalanmanın, hasarın ve delinmenin oluşmadığı açıkça görülmektedir. Optik mikroskoba kıyasla elektron mikroskobu yüzey morfolojisi anlamında daha detaylı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle yüzeyde hasarı tespit etmek için elektron mikroskobu kullandık. Şekil 6'te Nikon ShuttlePix P-400R model renkli dijital ışık mikroskobu kullanılarak denim yüzeyinin işlem öncesi ve işlem sonrası renkli görüntüleri alınmıştır.

Görüntülerde plazma tarafından ağartma işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir. Işık mikroskobunun renkli görüntü alabilme kabiliyetini kullanarak ağartma işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini kanıtladık. Görüntülere bakıldığında da yüzeyde ciddi bir hasarın oluşmadığını söyleyebiliriz. Yapılan görüntü analizleri hasar tespiti ve ağartma işleminin kanıtlanması açısından yeterlidir.



Şekil 5. Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak denim yüzeyinin işlem öncesi ve işlem sonrası görüntüleri a) İşlem Öncesi, b) İşlem Sonrası



Şekil 6. Optik mikroskop kullanılarak denim yüzeyinin işlem öncesi ve işlem sonrası görüntüleri a) İşlem Öncesi, b) İşlem Sonrası

Şekil 7'de çalışmada kullanılan denim pantolonun üzerinde CNC destekli plazma kalemi ile oluşturulan ağartma deseni görülmektedir. CNC yardımı ile plazma tabanlı ağartma işlemi daha fazla esneklik kazanmaktadır. Oluşturulan plazmanın yüzeye temas etmeden ağartma işlemi yapması düzgün olmayan yüzeyler için büyük bir avantajdır.

4. Tartışma ve Sonuç

Elde edilen optimizasyon ayarlamaları ile beyazlatmanın diğer yöntemlere göre insan sağlığı açısından tehlikesiz bir şekilde elde edildiği gözlemlendi. Çünkü ortama zararlı herhangi bir gazın emisyonu bulunmamaktadır. Plazma oluşturmak için düşük frekanslı sinyal kullanılmıştır. Bu yönüyle vücudumuz için tehlike teşkil etmemektedir. Ayrıca literatürde daha önce CNC-plazma kombinasyonu kullanılarak yapılan bir denim ağartma işlemi mevcut değildir. Tekstil alanında literatürde bulunan plazma ile ilgili çalışmalar genellikle boyama için ön işlem, hidrofobik ve hidrofobik özellikler için yapılmıştır. Denimin ağartılma ihtiyacı günümüzdeki giysilerin tüketilme miktarı ile

orantılı olarak artmaktadır. Bu yönüyle çalışma bir ilk olmaktadır. Plazma işleminden sonra denim yüzeyinde önemli bir hasar oluşmadı. Sistem maliyet ve iş gücü açısından geleneksel sisteme kıyasla daha verimli olarak hedef sorunu çözmek için yeni yollar açtı.



Şekil 7. CNC sistemi ile oluşturulan plazma ağartma deseni

Çünkü çalışmada kullanılan gaz havadan kompresör yardımı ile sağlanmaktadır. Çünkü plazma sistemlerinde özel gazların (helyum, argon gibi) kullanılması önemli bir maliyet ölçüsüdür. Gaz olarak yüksek basınçlı kuru hava kullanılarak çevreye herhangi bir kimyasal madde bırakmadan işlem gerçekleştirildi. Aynı zamanda bu sistemin kurulmasının maliyet anlamında ekonomik olduğunu söyleyebiliriz. Çünkü sistemde herhangi bir sarf malzeme kullanılmamaktadır. Bunun yanında CNC sisteminin kombinasyonu ile iş gücü önemli ölçüde azalmaktadır. Çünkü CNC makinesine gönderilen kodlar ile farklı ağartma desenlerinin elde edilmesi mümkün olmakta ve plazma kodlara bağlı olarak açılıp kapanabilmektedir. Kısaca bu işlemin yapılabilmesi için bir operatör yeterli olmaktadır. Plazma ile beyazlatma işleminin kalıcılığı klasik taşlama yöntemindeki kalıcılık ile aynı değerde bulunmaktadır. Buradaki temel faktör yıkanma sonrasında denimde kullanılan boya maddesinin yüzeye tutunma değerinin zayıf olması nedeniyle boyanmanın oluşabilmesidir. Özellikle yüksek yıkanma sıcaklıklarında (90°C gibi) bu durum ortaya çıkmaktadır. Denim malzemeli giysiler genellikle 30°C sıcaklığında yıkandığı için beyazlatmanın kalıcılığı hakkında herhangi bir sorun oluşmamaktadır. Beyazlatmanın kalıcılığı denimin ömrü boyunca devam etmektedir. Sonuç olarak elde edilen yöntem sayesinde klasik kuşlama

yönteminden kaynaklı ortaya çıkan silikoz hastalığının önüne geçilmiş olacaktır. Plazma kavramının gün geçtikçe multidisipliner alanlara yayılmasıyla kolaylıkların yolu açılmış olacaktır. Özellikle atmosferik basınç plazmalarının ekonomik kurulum maliyeti ve geniş uygulama alanları açısından önemi artacaktır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Ferhat Bozduman: Kaynakların hazırlanması, deneylerin yapılması, sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılması.

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

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

Teşekkür

Bu çalışma Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi teknokentinde bulunan PlazmaTek şirketinin plazma fiziği laboratuvarı altyapısının desteği ve imkanları ile gerçekleştirilmiştir.

5. Kaynaklar

- Akgun, M., Gorguner, M., Meral, M. et al. 2005. Silicosis caused by sandblasting of jeans in Turkey: a report of two concomitant cases. *Journal of Occupational Health*, **47**, 346–349. <https://doi.org/10.1539/joh.47.346>
- Atav, R., Gunduz, O., Yaz, S., Cakan, G. and Sevgili, B., 2023. Laser-Activated Organic Bleaching Process as an Environmentally Friendly Clean Alternative to Permanganate Bleaching in Denim Washing. *Fibers and Polymers*, **24**, 2725–2730. <https://doi.org/10.1007/s12221-023-00251-3>
- Bakan, N.D., Özkan, G., Camsarı, G., Gür, A., Bayram, M., Acıkmese, B. and Cetinkaya, E., 2011. Silicosis in denim sandblasters. *Chest*, **140**(5), 1300–1304. <https://doi.org/10.1378/chest.10-1856>
- Bhat, N.V., Netravali, A.N., Gore, A.V., Sathianarayanan, M.P., Arolkar, G.A. and Deshmukh, R.R., 2011. Surface modification of cotton fabrics using plasma technology. *Textile Research Journal*, **81**, 1014–1026. <https://doi.org/10.1177/0040517510397574>
- Cai, Z.S. and Qiu, Y.P., 2006. The mechanism of air/oxygen/helium atmospheric plasma action on PVA. *Journal of Applied Polymer Science*, **99**, 2233–2237. <http://dx.doi.org/10.1002/app.22307>

- Cai, Z.S., Zhang, C.Y., Qiu, Y.P., Hwang, Y.J. and McCord, M., 2003. Effect of atmospheric plasma treatment on desizing of PVA on cotton. *Textile Research Journal*, **73**,670–674.
<http://dx.doi.org/10.1177/004051750307300803>
- Domonkos, M. and Kromka, A., 2022. Nanosphere lithography-based fabrication of spherical nanostructures and verification of their hexagonal symmetries by image analysis. *Symmetry*, **14**, 2-16.
<https://doi.org/10.3390/sym14122642>
- Domonkos, M. and Ticha, P., 2023. Low-Temperature Atmospheric Pressure Plasma Treatment in the Polymer and Textile Industry. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, **51**, 1671-1681.
<http://dx.doi.org/10.1109/TPS.2023.3235266>
- Ilya, K., Christian, D.P. and Fabrizio, D., 2020. Colour fading of denim with atmospheric pressure plasma jet using air. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, **63**, 79-84.
<http://dx.doi.org/10.3233/JAE-209110>
- Inbakumar, S., Morent, R., De Geyter, N., Desmet, T., Anukaliani, A., Dubruel, P., et al., 2010. Chemical and physical analysis of cotton fabrics plasma-treated with a low-pressure DC glow discharge. *Cellulose*, **17**, 417–426.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10570-009-9369-y>
- Ivedi, I., Yagci, K., Tagaç, E., 2021. Development Of Ecological Denim Bleaching Methods. *International Conference on Textile and Connected R&D Domains (TEXTEHX)*,81-87.
<http://dx.doi.org/10.35530/TT.202.07>
- Matthews, S.R., McCord, M.G. and Bourham, M.A., 2005. Poly (vinyl alcohol) desizing mechanism via atmospheric pressure plasma exposure. *Plasma Processes and Polymers*, **2**, 702–708.
<https://doi.org/10.1002/ppap.200500056>
- Peng, S.J., Gao, Z.Q., Sun, J., Yao, L. and Qiu, Y.P., 2009. Influence of argon/oxygen atmospheric dielectric barrier discharge treatment on desizing and scouring of poly (vinyl alcohol) on cotton fabrics. *Applied Surface Science*, **255**, 9458–9462.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.07.058>
- Rauscher, H., Perucca, M., and Buyle, G., 2010. Plasma technology for hyperfunctional surfaces – Food, biomedical, and textile applications. Wiley-VCH, 137.
- Vladimirtseva, E.L., Sharnina, L.V. and Blinicheva, I.B., 1995. Application of the low-temperature plasma in preparation processes of linens. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, **2**, 30–31.
- Wang, C.X. and Qiu, Y.P., 2007. Two-sided modification of wool fabrics by atmospheric pressure plasma jet: Influence of processing parameters on plasma penetration. *Surface and Coatings Technology*, **201**, 6273–6277.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.028>
- Wang, L., Xiang, Z.Q., Bai, Y.L. and Long, J.J., 2013. A plasma-aided process for grey cotton fabric pretreatment. *Journal of Cleaner Production*, **54**, 323–331.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.003>

İnternet Kaynakları

https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html, (10.09.2023)

$F_p R$ – Linear Skew Constacyclic Codes

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 23.07.2023

Kabul/Accepted: 06.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

$F_p R$ – Lineer Çarpık Sabit Devirli Kodlar

Tülay YILDIRIM 

Karabük University, Eskipazar Vocational School, Karabük, Turkey

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu makalede, $F_p R$ halkası üzerinde skew constacyclic kodlar olarak adlandırılan özel bir doğrusal kod sınıfını olan çalışıyoruz, burada $R = F_p + vF_p$, p tek asal sayıdır ve $v^2 = v$. Bu kodlar $F_p^m R^n$ halkasının bir alt kümesi olarak tanımlanır. R nin bir θ otomorfizması için, $R[x, \theta]$ skew polinom halkasının yapısal özelliklerini araştırıyoruz. Ayrıca, $F_p R$ halkası üzerinde skew constacyclic kodların üreteç polinomlarını ve Gray görüntülerini belirliyoruz.

Anahtar Kelimeler: Lineer kodlar; Skew polinom halkaları; Skew constacyclic kodlar; Skew devirli kodlar.

Abstract

In this paper, we study a special class of linear codes, called skew constacyclic codes, over the ring $F_p R$, where $R = F_p + vF_p$, p is an odd prime number and $v^2 = v$. These codes are defined as a subset of the ring $F_p^m R^n$. For an automorphism θ of R , we investigate the structural properties of skew polynomial ring $R[x, \theta]$. We also determine the generator polynomials and the Gray images of the skew constacyclic codes over the ring $F_p R$.

Keywords: Linear codes; Skew polynomial rings; Skew constacyclic codes; Skew cyclic codes.

1. Introduction

Codes over finite rings have attracted considerable interest for several decades. One of the significant class of linear codes is known as cyclic codes. Since cyclic codes have very rich algebraic structures, these codes have been examined by many researchers (Zhu et al. 2010, Siap et al. 2011, Dinh et al 2020).

Recently, Boucher et al. investigated skew cyclic codes over finite fields (Boucher et al 2007). These codes were obtained through non-commutative polynomial rings. They showed that skew cyclic codes have many advantages over well-known linear codes of the same dimension and length. Inspired by this study, there are numerous papers on skew cyclic codes over finite fields. For instance; Gursoy et al. considered skew cyclic codes over $F_q + vF_q$ (Gursoy et al. 2014). Siap et al. studied skew cyclic codes for arbitrary length and obtained optimal linear codes over finite fields (Siap et al. 2011).

Mixed alphabets were first introduced by Delsarte (Delsarte 1973). Later, many papers over mixed alphabet codes were studied (Aksoy and Caliskan 2021, Li et al. 2021, Dinh et al. 2020, Caliskan et al. 2023). The most striking among these studies is the skew cyclic codes over the mixed alphabets.

Benbelkacem et al. considered skew cyclic codes over $F_4 R$ (Benhelkacem et al. 2022). Li, Gao and Fu presented linear skew cyclic codes on $F_q R$ (Li et al. 2021). Besides, Abualrub and Aydin introduced skew cyclic codes over $F_2 + vF_2$ (Abualrub and Aydin 2012). Gao defined skew cyclic codes over $F_p + vF_p$ and showed that obtained results are equivalent to either cyclic codes or quasi-cyclic codes (Gao 2013). As a generalization of skew cyclic codes, skew constacyclic codes over various rings have been widely studied (Jitman and Ling 2012, Li et al. 2020, Melaknesson et al. 2019). Al-Ashker et al. studied skew constacyclic codes over $F_p + vF_p$ (Al-Ashker et al. 2021). Melaknesson et al. defined linear skew constacyclic codes over $Z_q(Z_q + uZ_q)$ (Melaknesson et al. 2019).

The aim of this paper is to present and study skew constacyclic codes over the ring $F_p R$, where p is an odd prime and $R = F_p + vF_p$ with $v^2 = v$. The ring $F_p R$ is a finite semi-local and not a chain ring. The paper is organized as follows: Section 2 starts with some basic properties of the ring R and give brief description of the linear codes over the ring R . Then, it continues by introducing the algebraic structure of skew polynomial rings as well as the basic results of skew constacyclic codes over the ring R . In section 3, linear codes are

generalized to the skew constacyclic codes and examine the algebraic structures of these codes. In section 4, we describe the generator polynomials of the linear skew constacyclic codes over the ring $F_p R$. In section 5, we determine the Gray images of skew constacyclic codes over the ring $F_p R$.

2. Preliminaries

Consider the ring $R = F_p + vF_p$, where $v^2 = v$ and p is a number of odd prime. The ring R has two maximal ideals which are $\langle v \rangle$ and $\langle 1 - v \rangle$ such that both $R/\langle v \rangle$ and $R/\langle 1 - v \rangle$ are isomorphic to F_p . These ideals are maximal ideals in the ring R . Thus, R is not a chain ring. By the Chinese Remainder Theorem, one gets $R = \langle v \rangle \oplus \langle 1 - v \rangle$ (Lac, 2008). So, each element of R can be state as

$$a + vb = vd + (1 - v)e, \quad (1)$$

where $a, b, d, e \in F_p$.

A code C of length n over R is a non-empty subset of R^n and also it is a linear code if it is a submodule of the R -module R^n . If $(c_0, c_1, \dots, c_{n-1}) \in C$, then its polynomial representation is defined as $\varrho(C) = \sum_{i=0}^{n-1} c_i x^i$. In the rest of the paper, we assume that all the codes are linear codes.

The Euclidean inner product on R is defined as

$$\langle x, y \rangle = \sum_{i=0}^{n-1} x_i y_i, \quad (2)$$

for $x = (x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$ and $y = (y_0, y_1, \dots, y_{n-1})$ in R^n .

The dual code of C , denoted by C^\perp , is also R -linear code and defined as

$$C^\perp = \{y \in R^n \mid \langle x, y \rangle = 0, \forall x \in C\}. \quad (3)$$

2.1 Skew polynomial rings over R

First, we recall the construction of the non-commutative ring $R[x, \theta]$ and some of its basic properties (Gao 2013). The skew polynomial set $R[x, \theta]$ is defined by

$$R[x, \theta] = \{f(x) = r_0 + r_1 x + r_2 x^2 + \dots + r_n x^n\}, \quad (4)$$

where $r_i \in F_p$ for all $i = 0, 1, \dots, n$ and the automorphism θ of R is defined as

$$\theta(vd + (1 - v)e) = (1 - v)d + ve, \quad (5)$$

where $d, e \in F_p$. Note that $\theta^2(r) = r$ for all $r \in R$, and θ is a ring homomorphism with order 2.

The skew polynomial ring $R[x, \theta]$ is the set of polynomials over the ring R in which the addition is the

usual addition of polynomials and multiplication is defined as

$$(ax^i)(bx^j) = a\theta^i(b)x^{i+j}. \quad (6)$$

Multiplication can be extended to all elements in $R[x, \theta]$ by the laws of distribution and association. If θ is not an identity automorphism on R , then the ring $R[x, \theta]$ is not a commutative ring. Thus, we have the following results:

Theorem 2.1. (Gao 2013). The center $Z([R, \theta])$ of $R[x, \theta]$ is $F_p[x^2]$, where 2 is the order of θ .

Corollary 2.2. (Gao 2013). Let $f(x) = x^n - 1$. Then $f(x) \in Z([R, \theta])$ if and only if n is even.

Let $g(x), f(x) \in [R, \theta]$, then $g(x)$ is called a right (resp. left) divisor of $f(x)$ if there exists $q(x) \in [R, \theta]$ such that $f(x) = q(x)g(x)$ (resp. $f(x) = g(x)q(x)$).

Lemma 2.3. (Gao 2013). Let $f(x), g(x) \in [R, \theta]$ such that the leading coefficient of $g(x)$ is a unit. Then, there exists unique $q(x), r(x) \in [R, \theta]$ such that $f(x) = q(x)g(x) + r(x)$, where $r(x) = 0$ or $\deg(r(x)) < \deg(g(x))$.

Definition 2.4. Let θ be an automorphism of R . A code C is an R -linear skew cyclic code (or θ -cyclic code) of length n if

- (i) C is an R -submodule of R^n ,
- (ii) C is closed under the T_θ -cyclic shift, i.e.,

$$T_\theta(c) = (\theta(c_{n-1}), \theta(c_0), \dots, \theta(c_{n-2})), \quad (7)$$

where $c = (c_0, c_1, \dots, c_{n-1}) \in C$.

Lemma 2.5. (Al-Ashker and Abu-Jazar 2016) Let $\lambda = \alpha + v\beta$ be an element in the ring R , then λ is a unit of R if and only if $\alpha \neq 0$ and $\alpha + \beta \neq 0$, where $\alpha, \beta \in F_p$.

2.2 Skew constacyclic codes over R

In this part, we firstly introduce definition of skew constacyclic codes and then continue with its basic results over the ring R . Since we follow (Al-Ashker and Abu-Jazar 2016), the proofs of the theories will be omitted. Throughout the study, we denote $\alpha + v\beta$ as λ for simplicity, where $\alpha, \beta \in F_p$.

Definition 2.6. A subset C of R^n is called skew constacyclic code, or (θ, λ) -constacyclic code of length n over R if

- (i) C is an R -submodule of R^n ,
- (ii) C is closed under the skew constacyclic shift, i.e.,

$$T_{\theta, \lambda}(c) = (\lambda\theta(c_{n-1}), \theta(c_0), \dots, \theta(c_{n-2})), \quad (8)$$

where λ is unit in R and $c = (c_0, c_1, \dots, c_{n-1}) \in C$.

In particular, if λ is 1 or -1, then C is a skew-cyclic code or skew negacyclic code over R , respectively.

In general, a code C of length n over R is skew constacyclic code if and only if $\varrho(C)$ is an ideal of $R[x]/\langle x^n - \lambda \rangle$. Thus, skew constacyclic code can be define as left ideals in $[R, \theta]/\langle x^n - \lambda \rangle$.

Theorem 2.7. (Al-Ashker and Abu-Jazar 2016). A code C of length n over R is skew constacyclic if and only if the skew polynomial representaton of C is a left ideal in $[R, \theta]/\langle x^n - \lambda \rangle$.

3. F_pR -Linear Skew Constacyclic Codes

In this section, we generalize our studies to the skew constacyclic codes over the ring F_pR .

Definition 3.1. Define

$$F_pR = \{(d, a + vb) \mid d \in F_p, (a + vb) \in R\}. \quad (9)$$

Let C be a skew cyclic code over F_pR and m (resp. n) is the set of F_p (resp. R) coordnate positons.

Throughout the paper, we assume that m and n are odd positive integers.

Any codeword $c \in C$ has the form

$$c = (d_0, d_1, \dots, d_{m-1}, e_0, e_1, \dots, e_{n-1}) \in F_p^m R^n. \quad (10)$$

For $e_i = (a_i + vb_i)$ for all $i = 0, 1, \dots, n - 1$.

The ring homomorphism map is defined as

$$\begin{aligned} \delta: R &\rightarrow F_p \\ a + vb &\mapsto a \end{aligned} \quad (11)$$

For any $r \in R$, a scalar multiplication $*$ defined by

$$r * (d, a + vb) = (\delta(r)a, r(a + vb)), \quad (12)$$

where $d \in F_p$ and $a + vb \in R$. It inherently extends to $F_p^m R^n$ as follows:

$$\begin{aligned} r * x &= (\delta(r)d_0, \delta(r)d_1, \dots, \delta(r)d_{m-1}, re_0, \\ &re_1, \dots, re_{n-1}), \end{aligned} \quad (13)$$

where $x = (d_0, d_1, \dots, d_{m-1}, e_0, e_1, \dots, e_{n-1}) \in F_p^m R^n$ for $m, n \in \mathbb{N}$.

A non-empty subset C of $F_p^m R^n$ is called F_pR -linear code if C is an R -submodule of $F_p^m R^n$.

Lemma 3.2. The set $F_p^m R^n$ is an R -module with respect to the addition and scalar multiplication.

Proof. Clear.

Definiton 3.3. The Euclidean inner product over the ring $F_p^m R^n$ is defined as

$$\langle x, y \rangle = v \sum_{i=0}^{m-1} x_i y_i + \sum_{j=0}^{n-1} x'_j y'_j, \quad (14)$$

where $x = (x_0, x_1, \dots, x_{m-1}, x'_0, x'_1, \dots, x'_{n-1})$ and $y = (y_0, y_1, \dots, y_{m-1}, y'_0, y'_1, \dots, y'_{n-1})$ in $F_p^m R^n$.

The dual code of C is also F_pR -linear and defined as

$$C^\perp = \{y \in F_p^m R^n \mid \langle x, y \rangle = 0, \forall x \in C\}. \quad (15)$$

Definition 3.4. Let ψ be an automorphism of the finite field F_p . For any two elements $ax^i, bx^j \in F[x, \psi]$, multiplication is defined as

$$(ax^i)(bx^j) = a\psi^i(b)x^{i+j}. \quad (16)$$

In polynomial representation, a linear code of length m over F_p is a skew constacyclic code if and only if it is a left $F_p[x, \psi]$ -submodule of $F_p[x, \psi]/\langle x^m - \delta(\lambda) \rangle$.

For shortly, $R_{m,n} := F_p[x, \psi]/\langle x^m - \delta(\lambda) \rangle \times R[x, \theta]/\langle x^n - \lambda \rangle$.

We can define the polynomial representation of each codeword of skew constacyclic codes as follows:

Definition.3.5. An element

$$(d_0, d_1, \dots, d_{m-1}, e_0, e_1, \dots, e_{n-1}) \in F_p^m R^n \quad (17)$$

can be defined with a module element consisting of two polynomials:

$$c(x) = (d(x), e(x)) \in R_{m,n}, \quad (18)$$

where $d(x) = d_0 + d_1x + \dots + d_{m-1}x^{m-1}$ and $e(x) = e_0 + e_1x + \dots + e_{n-1}x^{n-1}$.

Let $f(x) = f_0 + f_1x + \dots + f_sx^s \in [R, \theta]$ and $(d(x), e(x)) \in R_{m,n}$, then multiplication operator on F_pR is defined as

$$f(x) * (d(x), e(x)) = (\delta(f(x))d(x), f(x) * e(x)), \quad (19)$$

where $\delta(f(x)) = \delta(f_0) + \delta(f_1)x + \dots + \delta(f_s)x^s$. This multiplication is well-defined on $R_{m,n}$. Also, $\delta(f(x))d(x)$ and $f(x) * e(x)$ are defined in $F_p[x, \psi]/\langle x^m - \delta(\lambda) \rangle$ and $R[x, \theta]/\langle x^n - \lambda \rangle$, respectively.

Lemma 3.6. $R_{m,n}$ is a left $R[x, \theta]$ -module under the $*$ multiplication.

Proof. Clear.

Now, we are ready to introduce the skew constacyclic codes over the ring $F_p^m R^n$.

Definition 3.7. Let θ and ψ be automorphisms of R and F_p , respectively. A linear code C over $F_p^m R^n$ is called skew constacyclic code if

- (i) C is an $F_p R$ -submodule of $F_p^m R^n$,
- (ii) C is closed under the skew constacyclic shift, i.e.,

$$S_{\theta, \lambda}(c) = (\delta(\lambda)\psi(d_{m-1}), \psi(d_0), \dots, \psi(d_{m-2}), \lambda\theta(e_{n-1}), \theta(e_0), \dots, \theta(e_{n-2})) \in C$$
 (20)

where λ is unit in R and $c = (d_0, d_1, \dots, d_{m-1}, e_0, e_1, \dots, e_{n-1}) \in C$.

Lemma 3.8. Let C be a code over $F_p R$ with length $m+n$. C is skew constacyclic code if and only if C is a left $R[x, \theta]$ -submodule of $R_{m,n}$.

Proof. Let C be a skew constacyclic code over $F_p R$ and $c = (d_0, d_1, \dots, d_{m-1}, e_0, e_1, \dots, e_{n-1}) \in C$, such that $c(x) = (d(x), e(x))$ be a codeword of $R_{m,n}$. Then

$$x * c(x) = (\delta(\lambda)\psi(d_{m-1}) + \psi(d_0)x + \dots + \psi(d_{m-2})x^{m-1}, \lambda\theta(e_{n-1}) + \theta(e_0)x + \dots + \theta(e_{n-2})x^{n-1}) \in C$$
 (21)

Also, $x^2 * c(x) \in C$ and so on. Since C is a linear code, one gets $f(x) * c(x) \in C$, for any $f(x) \in R[x, \theta]$. Thus, C is a left $R[x, \theta]$ -submodule of $R_{m,n}$.

On the other hand, assume that C is a left $R[x, \theta]$ -submodule of $R_{m,n}$, then for any $c(x) \in C$, we have $x^i * c(x) \in C$, $i \in \mathbb{N}$. Hence, C is a skew constacyclic code.

Let C be a linear code over $F_p R$ with length $m+n$. Then C is called seperable if $C = C_m \times C_n$, while considering C_m and C_n as punctures codes of C by erasing the coordinates outside the m and n components, respectively. If $C = C_m \times C_n$ is seperable, then $C^\perp = C_m^\perp \times C_n^\perp$.

Theorem 3.9. Let $C = C_m \times C_n$ be a linear code over $F_p R$, where C_m and C_n are linear codes over F_p (with length m) and R (with length n), respectively. Then, C is a skew constacyclic code if and only if C_m is a $\delta(\lambda)$ -constacyclic code over F_p and C_n is a skew λ -constacyclic code over R .

Proof. Let $(d_0, d_1, \dots, d_{m-1}) \in C_m$ and $(e_0, e_1, \dots, e_{n-1}) \in C_n$. Assume that C is a skew constacyclic code, then we have

$$(\delta(\lambda)\psi(d_{m-1}), \psi(d_0), \dots, \psi(d_{m-2}), \lambda\theta(e_{n-1}), \theta(e_0), \dots, \theta(e_{n-2})) \in C$$
 (22)

Thus, $(\delta(\lambda)\psi(d_{m-1}), \psi(d_0), \dots, \psi(d_{m-2})) \in C_m$ and $(\lambda\theta(e_{n-1}), \theta(e_0), \dots, \theta(e_{n-2})) \in C_n$, as desired.

Conversely, by the hypothesis we have $(\delta(\lambda)\psi(d_{m-1}), \psi(d_0), \dots, \psi(d_{m-2})) \in C_m$ and $(\lambda\theta(e_{n-1}), \theta(e_0), \dots, \theta(e_{n-2})) \in C_n$. Since $C = C_m \times C_n$, the proof holds.

4. The Generator Set For $F_p R$ Skew Constacyclic Codes

Let C_1 and C_2 be two linear codes over F_p and defined as

$$C_1 = \left\{ a \in F_p^m \mid \begin{matrix} (1-v)b + va \in C_1 \\ \text{for some } b \in F_p^m \end{matrix} \right\}$$
 (23)

and

$$C_2 = \left\{ b \in F_p^m \mid \begin{matrix} (1-v)b + va \in C_1 \\ \text{for some } a \in F_p^m \end{matrix} \right\}$$
 (24)

So, C can be uniquely state as $C = vC_1 \oplus (1-v)C_2$ (Al-Ashker and Abu-Jazar 2016). Also, $F_p R$ is a non-zero left ideal in $R[x, \theta] / \langle x^n - \lambda \rangle$. In this section, we consider $f_i(x) (i = 1, 2)$ as a set of all non-zero skew polynomials with minimal degree in F_p .

Theorem 4.1. (Al-Ashker and Abu-Jazar 2016) Let C be a λ -constacyclic code over R of length n . If $C = \langle v f_1(x), (1-v) f_2(x) \rangle$ with $f_1(x) | (x^n - (\alpha + \beta))$ and $f_2(x) | (x^n - \alpha)$, then $C_1 = \langle f_1(x) \rangle$ and $C_2 = \langle f_2(x) \rangle$.

Theorem 4.2. Let C be a linear skew constacyclic code of length $m+n$ over $F_p R$. Then,

$$C = \langle (g(x), 0), (j(x), h(x)) \rangle,$$
 (25)

where $g(x) | (x^m - \delta(\lambda))$, $h(x) = v f_1(x) + (1-v) f_2(x)$ with $f_1(x) | (x^n - (\alpha + \beta))$ and $f_2(x) | (x^n - \alpha)$.

Proof. Let C be an $F_p R$ -linear skew constacyclic code of length $m+n$. Define

$$\omega: C \rightarrow R[x, \theta] / \langle x^n - \lambda \rangle$$

$$(f_1(x), f_2(x)) \mapsto f_2(x),$$
 (26)

where $f_1(x) \in F_p[x, \psi] / \langle x^m - \delta(\lambda) \rangle$ and $f_2(x) \in R[x, \theta] / \langle x^n - \lambda \rangle$. For any $r(x) \in R[x, \theta]$, one has $\omega(r(x) * (f_1(x), f_2(x))) = r(x) * \omega(f_1(x), f_2(x))$. So, ω is a left $R[x, \theta]$ -module homomorphism whose image is a left $R[x, \theta]$ -submodule of $R[x, \theta] / \langle x^n - \lambda \rangle$. By Lemma 3.8 and Theorem 4.1, we have $\omega(C) = \langle h(x) \rangle = \langle f_1(x) + (1-v) f_2(x) \rangle$ with $f_1(x) | (x^n - (\alpha + \beta))$ and $f_2(x) | (x^n - \alpha)$. Define a set I as

$$I = \{g(x) \in F_p[x, \psi] / \langle x^m - \delta(\lambda) \rangle \mid (g(x), 0) \in \ker(\omega)\}.$$
 (27)

Obviously, I is an ideal of $F_p[x, \psi] / \langle x^m - \delta(\lambda) \rangle$. Thus, I is a cyclic code in $F_p[x, \psi] / \langle x^m - \delta(\lambda) \rangle$ which implies that $I = \langle g(x) \rangle$, where $g(x)$ is a divisor of

$x^m - \delta(\lambda)$. For any element $(k(x), 0) \in \ker(\omega)$, one has $k(x) \in I = \langle g(x) \rangle$. So, there exists a polynomial $l(x) \in R[x, \theta]$ such that $k(x) = \delta(l(x))g(x)$. Thus, $(k(x), 0) = l(x) * (g(x), 0)$ and this implies that $\ker(\omega)$ is a submodule of C generated by an element of the form $(g(x), 0)$, such that $\ker(\omega) = \langle (g(x), 0) \rangle$, where $g(x) \in F_p[x, \psi]$ and $g(x)|(x^m - \delta(\lambda))$. By the first isomorphism theorem,

$$C/\ker(\omega) \cong \langle h(x) \rangle. \quad (28)$$

Let $(j(x), h(x)) \in C$ such that $\omega(j(x), h(x)) = h(x)$. Then, C can be generated as a left $R[x, \theta]$ -submodule of $R_{m,n}$ by two elements of the form

$((g(x), 0))$ and $(j(x), h(x))$. So, any element in C can be written as

$$r_1(x) * ((g(x), 0)) + r_2(x) * (j(x), h(x)), \quad (29)$$

where $r_1(x), r_2(x) \in R[x, \theta]$. Hence,

$$C = \langle (g(x), 0), (j(x), h(x)) \rangle, \quad (30)$$

where $g(x)|(x^m - \delta(\lambda)), h(x) = v f_1(x) + (1 - v) f_2(x)$ with $f_1(x)|(x^n - (\alpha + \beta))$ and $f_2(x)|(x^n - \alpha)$.

Lemma.4.3. If $C = \langle (g(x), 0), (j(x), h(x)) \rangle$ is a linear skew constacyclic code of length $m+n$ over $F_p R$, then $\deg(j(x)) < \deg(g(x))$.

Proof. Assume that $\deg(j(x)) \geq \deg(g(x))$ and $\deg(j(x) - g(x)) = s \in \mathbb{N}$. Let

$$D = \langle (g(x), 0), (j(x) - x^s g(x), h(x)) \rangle. \quad (31)$$

Then, one gets $D \subseteq C$. Also,

$$(j(x), h(x)) = (j(x) - x^s g(x), h(x)) + x^s * (g(x), 0).$$

Thus, $C \subseteq D$ and so $D = C$. This implies a contradiction. So, $\deg(j(x)) < \deg(g(x))$.

5. Gray Images of Skew Constacyclic Codes Over $F_p R$

The Gray map between $F_p R$ and F_p^3 is defined as

$$\zeta: F_p R \rightarrow F_p^3$$

$$\zeta((d, a + vb)) = (d, -b, 2a + b), \quad (32)$$

where $(d, a + vb) \in F_p R$. This map can be extended to the map $\zeta: F_p^m R^n \rightarrow F_p^{m+2n}$ such that

$$\zeta((d_0, d_1, \dots, d_{m-1}, a_0 + vb_0, a_1 + vb_1, \dots, a_{n-1} + vb_{n-1})) = (d_0, d_1, \dots, d_{m-1}, -b_0, -b_1, \dots, -b_{n-1}, 2a_0 + b_0, 2a_1 + b_1, \dots, 2a_{n-1} + b_{n-1}), \quad (33)$$

for all $(d_0, d_1, \dots, d_{m-1}) \in F_p^m$ and $(a_0 + vb_0, a_1 + vb_1, \dots, a_{n-1} + vb_{n-1}) \in R^n$.

If C is an $F_p R$ -linear codes, then $\zeta(C)$ is also F_p -linear.

The Hamming weight of a codeword c in $F_p^m R^n$ is the number of non-zero coordinates in c and denoted by $w_H(c)$. The Hamming distance between two codewords c_1 and c_2 in $F_p^m R^n$ is defined as $d_H(c_1, c_2) = w_H(c_1 - c_2)$ and Hamming distance for a code C is defined by $d_H(C) = \min\{d_H(c_1, c_2) \mid c_1 \neq c_2, \forall c_1, c_2 \in C\}$.

The Lee weight of $(d, a + vb) \in F_p R$ can be defined as

$$w_L((d, a + vb)) = w_H(d) + w_H(-b) + w_H(2a + b). \quad (34)$$

The Lee weight of a codeword is the rational sum of Lee weights of its components. The Lee distance between two codewords c_1 and c_2 in $F_p^m R^n$ is defined as

$$d_L(c_1, c_2) = w_L(c_1 - c_2). \quad (34)$$

Proposition 5.1. The Gray map ζ is an F_p -linear distance preserving map from $F_p^m R^n$ to F_p^{m+2n} .

Proof. Let $x = (d_0, d_1, \dots, d_{m-1}, e_0, e_1, \dots, e_{n-1})$ and $y = (d'_0, d'_1, \dots, d'_{m-1}, e'_0, e'_1, \dots, e'_{n-1})$ be two elements in $F_p^m R^n$, where $e_i = a_i + v b_i$ and $e'_i = a'_i + v b'_i$ for $i = 0, 1, \dots, n - 1$. By the definition,

$$\begin{aligned} \zeta(x + y) &= \zeta((d_0, d_1, \dots, d_{m-1}, e_0, e_1, \dots, e_{n-1}) + (d'_0, d'_1, \dots, d'_{m-1}, e'_0, e'_1, \dots, e'_{n-1})) \\ &= (d_0 + d'_0, d_1 + d'_1, \dots, d_{m-1} + d'_{m-1}, -b_0 - b'_0, -b_1 - b'_1, \dots, -b_{n-1} - b'_{n-1}, 2(a_0 + a'_0) + b_0 + b'_0, 2(a_1 + a'_1) + b_1 + b'_1, \dots, 2(a_{n-1} + a'_{n-1}) + b_{n-1} + b'_{n-1}) \\ &= (d_0, d_1, \dots, d_{m-1}, -b_0, -b_1, \dots, -b_{n-1}, 2(a_0 + b_0), 2(a_1 + b_1), \dots, 2(a_{n-1} + b_{n-1})) + (d'_0, d'_1, \dots, d'_{m-1}, -b'_0, -b'_1, \dots, -b'_{n-1}, 2(a'_0 + b'_0), 2(a'_1 + b'_1), \dots, 2(a'_{n-1} + b'_{n-1})) \\ &= \zeta(x) + \zeta(y). \end{aligned} \quad (35)$$

Also, for any element $s \in F_p$,

$$\begin{aligned} \zeta(sx) &= \zeta(sd_0, sd_1, \dots, sd_{m-1}, se_0, se_1, \dots, se_{n-1}) = (sd_0, sd_1, \dots, sd_{m-1}, -sb_0, -sb_1, \dots, -sb_{n-1}, s(2a_0 + b_0), s(2a_1 + b_1), \dots, s(2a_{n-1} + b_{n-1})) = s\zeta(x). \end{aligned} \quad (36)$$

Hence, ζ is an F_p -linear map. Moreover, we can show that ζ is an F_p -linear distance preserving map as follows:

$$\begin{aligned} d_L(x, y) &= w_L(x - y) = w_H(d - d') + w_H(\zeta(e - e')) \\ &= w_H(d - d') + w_H(\zeta(e) - \zeta(e')) = d_H(d, d') + d_H(\zeta(e), \zeta(e')) \end{aligned} \quad (37)$$

Corollary 5.2. If C is an $F_p R$ -linear code with parameters $[m+n, M, d_L]$, then $\zeta(C)$ is a q -ary linear code with parameters $[m+2n, \log_q M, d_L]$, where M denotes the number of codewords in C .

Proof. Clear.

Theorem 5.3. Let C be a linear code over $F_p R$. Then $\zeta(C^\perp) = \zeta(C)^\perp$.

Proof. Let $c_1 = (d_1, a_1 + vb_1) \in C$ and $c_2 = (d_2, a_2 + vb_2) \in C^\perp$. By the definition, one gets $d_1 d_2 = a_1 a_2 = a_1 b_2 + a_2 b_1 + b_1 b_2 = 0$. Thus,

$$\langle \zeta(c_1), \zeta(c_1) \rangle = \langle (d_1, -b_1, 2a_1 + b_1), (d_2, -b_2, 2a_2 + b_2) \rangle = d_1 d_2 + 4a_1 a_2 + 2(a_1 b_2 + a_2 b_1 + b_1 b_2) = 0. \quad (38)$$

Hence, $\zeta(c_2) \in C^\perp$ and this gives that $\zeta(C^\perp) \subseteq \zeta(C)^\perp$. Since $F_p R$ is a Frobenius ring,

$$|\zeta(C^\perp)| = \frac{p^{m+2n}}{|\zeta(C)|} = \frac{p^{m+2n}}{|C|} = |C^\perp|, \quad (39)$$

and the result follows.

If a code C is equal to its dual, then C is called self-dual code.

Corollary 5.4. Let C be a linear code over $F_p R$. If C is a self-dual code, so is $\zeta(C)$.

Proof. Clear.

Declaration of Ethical Standards

The author declares that they comply with all ethical standards.

Declaration of Competing Interest

The author has no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

Data Availability Statement

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

Acknowledgments

In this research, we are thankful to the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) ARDEB 1002-A Grant No 123F286 for the financial support. We sincerely thank the editors and the anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions which improved the paper.

6. Kaynaklar

Abualrub, T., Aydın, N., Seneviratne, P., 2012. On θ -cyclic codes over $F_2 + vF_2$. *Australas. J. Combin.*, **54**, 115-126.

Aksoy, R., Çalışkan, F., 2021. Self-dual codes over $F_2 \times (F_2 + vF_2)$. *Crypto. Commun.*, **13**, 129-141.

Al-Ashker, M. M., Abu-Jazar, A. Q. M. 2016. Skew constacyclic codes over $F_p + vF_p$. *Palestine Journal of Mathematics*, **5**, 96-103.

Benbelkacem, N., Ezerman, M. F., Abualrub, T., Aydın, N., Batoul, A., 2022. Skew Cyclic Codes over $F_4 R$. *J. Algebra its Appl.*, **21**, 2250065.

Boucher, D., Geiselmann, W., Ulmer, F., 2007. Skew cyclic codes. *Appl. Algebra Eng. Commun. Comput*, **18**, 379-389.

Çalışkan, F., Yıldırım, T., Aksoy, R., 2023. Non-Binary Quantum Codes from Cyclic Codes over $F_p \times (F_p + vF_p)$. *Int. J. Theor Phys*, **62**, 29.

Delsarte, P., 1973. An algebraic approach to the association schemes of coding theory. *Philips Research Reports*, **10**. Ann Arbor, MI, USA, Historical JRI.

Dinh, H.Q., Pathak, S., Bag, T., Upadhyay, K., Chinnakum, W., 2021. A study of $F_q R$ -cyclic codes and their applications in constructing quantum codes. *IEEE Access*, **8**, 190049-190063

Gao, J., 2013. Skew cyclic codes over $F_p + vF_p$. *J. Appl. Math. Informatics*, **31**, 337-342.

Gursoy, F., Siap, I., Yıldız, B., 2014. Construction of skew cyclic codes over $F_q + vF_q$. *Adv. Math. Commun*, **8**, 313-322.

Jitman, S., Ling, S., Udomkavanich, P., 2012. Skew constacyclic codes over finite chain rings. *Australas. Adv. Math. Commun*, **6**, 39-63.

Lac H. J., 2008. Chinese remainder theorem and its applications, Master Thesis, California State University, 41.

Li, J., Gao, J., Fu, F. W., 2021. $F_q R$ -Linear skew cyclic codes. *J. Algebra Mathematics and Computing*, **68**, 1719-1741.

Li, J., Gao, J., Fu, F. W., 2021. Bounds on covering radius of $F_2 R$ -linear codes. *IEEE Commun. Lett.*, **25**, 23-27.

Li, J., Gao, J., Fu, F. W., Ma, F., 2020. $F_q R$ -linear skew constacyclic codes and their application of constructing quantum codes. *Quantum Inf. Process*, **19**, 193.

Melakhessou, A., Aydın, N., Hebbache, Z., Guenda, K., 2019. $Z_q (Z_q + uZ_q)$ -linear skew constacyclic codes. *J. Algebra Comb. Discrete Appl.*, **7**, 85-101.

Siap, I., Abualrub, T., Aydın, N., Seneviratne, P., 2011. Skew cyclic codes of arbitrary length. *Int. J. Inform. Coding Theory*, **2**, 10-20.

Zhu, S., Wang, Y. Shi, M., 2010. Some results on cyclic codes over $F_2 + vF_2$. *IEEE Trans. Inform. Theory*, **56**, 1680-1684.

Seçici Kümelenendirilmiş Gezgin Satıcı Problemi ve Matematiksel Formülasyonları

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 29.09.2023

Kabul/Accepted: 08.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Selective Clustered Traveling Salesman Problem and Mathematical Formulations

Tusan DERYA , Esra DİNLER* , Barış KEÇECİ 

Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Kümelenendirilmiş gezgin satıcı problemi (KGSP), gezgin satıcı probleminin (GSP) bir uzantısıdır ve tüm düğümler kesişimleri boş küme olan kümelerle bölünerek her küme bir turda mutlaka bir kez ziyaret edilmelidir. Ayrıca uğranan her kümede bulunan tüm düğümler mutlaka ziyaret edilmelidir. Bu çalışmada, KGSP'nin genel bir uzantısı olan Seçici Kümelenendirilmiş GSP (SKGSP) tanımlanmaktadır. SKGSP'de amaç, belirli bir zaman kısıtı içerisinde en büyük toplam kazancı elde edecek şekilde kümelerin seçilerek ziyaret edilecek düğüm sırasının bulunmasıdır. Problemden, gezgin eğer bir kümeyi ziyaret edecek ise küme içindeki tüm düğümleri ziyaret etmelidir. Bu problem, küme seçimi ve seçilen kümelerde düğümler arasındaki en kısa yolun belirlenmesi karar problemlerini birlikte içerir. Çalışmada, SKGSP tanımı ve ilgili problem için yeni formülasyonlar önerilmektedir. Formülasyonların performansı, 52 test probleminden türetilmiş 416 problem üzerinde denenerek sonuçlara yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kümelenendirilmiş gezgin satıcı problemi; Oryantiring problemi; Kâr getirili gezgin satıcı problemi; Karma tamsayılı matematiksel modelleme

Abstract

The Clustered Traveling Salesman Problem (CTSP) is an extension of the Traveling Salesman Problem (GSP). All nodes must be divided into clusters that whose intersections are empty sets, and each cluster must be visited once in a tour. In addition, all nodes in each cluster must be visited. In this study, Selective Clustered TSP (SCTSP), which is a general extension of CTSP, is defined. The aim of SCTSP is to find the order of nodes to be visited by selecting clusters to obtain the largest total profit within a certain time limit. In the problem, if the traveler is to visit a cluster, it must visit all nodes in the cluster. This problem includes cluster selection and determination of the shortest path between nodes in selected clusters. In this study, the SCTSP is defined and new formulations are proposed for this problem. The performance of the formulations is tested on 416 problems derived from 52 test problems and the results are included.

Keywords: Clustered traveling salesman problem; Orienteering problem; Traveling salesman problem with profits; Mixed integer mathematical programming.

1. Giriş

Tüm müşterilere hizmet verilmesinin gerekmediği kâr getirili rotalama problemleri sınıfı, klasik rotalama problemlerinden farklıdır. Her müşteri ile ilişkili bir kâr değeri vardır ve ziyaret edilen müşterilerden elde edilen toplam kâr enbüyüklenirken, tüm kısıtları sağlayan doğru müşteri grubuna hizmet verilmelidir. Kâr getirili rotalama problemleri alanında, Kâr getirili

Gezgin Satıcı Problemi (KGGSP), tek bir gezginin bulunduğu problemlerdir. Problemden dikkate alınan kısıtlamalara ve amaç fonksiyonuna bağlı olarak, KGGSP'ler üç kategoriye ayrılır (Feillet vd. 2005): Oryantiring Problemi (OP) (Seçici Gezgin Satıcı Problemi-SGSP); Ödül Toplayan GSP (ÖGSP); ve Kârlı Tur Problemi (KTP).

OP'de amaç, toplam kârın enbüyüklenmesi ve belirli bir seyahat süresini aşmadan hangi müşteri alt kümesinin

hangi sırayla ziyaret edileceğinin belirlenmesidir (Derya vd. 2020, Golden vd. 1987, Verbeek vd. 2016). Problem ilk olarak Tsiligirides (1984) tarafından ortaya atılmıştır. OP hakkındaki kapsamlı ve detaylı çalışmalar Vansteenwegen vd. (2011) ile Gunawan vd. (2016) makalelerinde verilmiştir.

ÖGSP, bir gezginin ziyaret edilen her müşteri için kâr topladığı ve ziyaret edilmeyen her müşteri için bir ceza ödediği problemdir. Amaç, her müşteriyi en fazla bir kez ziyaret eden seyahat maliyetleri ve cezaların toplamını enbüyüklemek ve önceden belirlenmiş bir düzeyden daha az olmamak üzere toplam kâr elde etmektir (Pedro vd. 2013). Problem ilk olarak Balas (1989) tarafından Carnegie Mellon Üniversitesi'nde ele alınmıştır. Bu problem, bir çelik haddehanesinin günlük çizelgelemesi için modelleme çalışmasının sonucunda ortaya atılmıştır.

KTP ise toplam kâr ile seyahat maliyeti arasındaki farkı enbüyükleyen turu bulma problemdir. Problemin ilk

tanımı Dell'Amico vd. (1995) tarafından verilmiştir. Sonraki yıllarda Archetti vd. (2013) ile Jepsen vd. (2014) problem için farklı çözüm önerileri ile çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmanın ana problemi olan GSP'nin literatürde birçok farklı türü vardır. Bu problemlerden biri kümelenirilmiş GSP'dir (KGSP). KGSP'de, düğümlerin kümelere bölündüğü, tam ve yönlendirilmemiş serim bulunmaktadır ve amaç tüm düğümlerin ziyaret edilmesi ve her kümenin düğümlerinin ardışık olarak ziyaret edilmesi için en kısa Hamilton turunu bulmaktır. KGSP ilk olarak Chisman (1975) tarafından otomatize depolama problemi (automated warehousing problem) için önerilmiştir. Bu çalışmada problem tanımı verilmiş ve matematiksel modeli önerilmiştir. Bu problemin çeşitli pratik uygulamaları vardır. Örneğin, KGSP acil durum araç gönderme problemine (Weintraub vd. 1999), üretim planlama problemine (Lokin 1979), bilgisayar disk birleştirme, imalat, araç rotalama (Laporte ve Palekar 2002) ve marketler ile ticari işlemlerle ilgili problemlere uygulanmıştır (Ghaziri ve Osman 2003). KGSP, NP-zor sınıfındadır (Mestria 2018). López-Ibáñez vd. (2014) Tekrarlı Yerel Aramaya (Iterated Local Search-ILS) dayalı karma bir meta-sezgisel algoritma önermişlerdir. ILS'nin uygulandığı diğer çalışmalar, Juan vd. (2014) ve Mestria (2016) tarafından yapılmıştır. Yaklaşık, kesin, sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar gibi çeşitli eniyileme yöntemleri de incelenmiştir (Anily vd. 1999, Arkin vd. 1997, Bao ve Liu 2012, Ding vd. 2007, Gendreau vd. 1994, Gendreau vd. 1997, Guttmann-Beck vd. 2000, Jongens ve Volgenant 1985, Laporte vd. 1997, Mestria vd. 2013, Potvin ve Guertin 1996).

Literatürde üzerinde durulan bir başka problem türü ise Kümelenirilmiş Oryantiring Problemidir (KOP). Bu problem ilk olarak Angelelli vd. (2014) tarafından önerilmiştir. KOP'da müşteriler kümeler halinde gruplandırılır ve her kümeyle bir kâr değeri ilişkilendirilir. Ancak kümedeki tüm müşterilere hizmet verilirse ilgili kâr değeri toplanır. Yahiaoui vd. (2017) KOP'u ele alarak önce sırala-sonra kümelenir yaklaşımına dayalı bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Önerilen yaklaşım iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan ilkinde adaptif büyük komşu arama sezgiseli (Adaptive Large Neighborhood Search) kullanılmıştır. İkincisinde ise elde edilen büyük turun parçalanması prensibine dayanan dal-sınır algoritması tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Zhang vd. (2020), Kümelenirilmiş Kapsam (Clustered Coverage) OP (KKOP) olarak adlandırılan özel bir problem türü önermiştir ve bu KKGSP sınıfına ait genelleştirilmiş bir problemdir. KKOP, klasik OP'den iki yönüyle farklılaşır: birincisi, KKOP, ziyaret

edilen düğümlerle ilişkili kapsama alanlarının birleşiminden elde edilen toplam kâr enbüyükler. İkinci olarak, KKOP, düğüm kümeleriyle ilgilidir ve küme-bağımlı kısıtlamalar içermektedir. Archetti vd. (2018), Set Oryantiring Problemi (SOP) olarak adlandırılan başka bir OP türü önermiştir. SOP'da, her kümeyle bir kâr ilişkilendirilir ve kümede en az bir müşteri ziyaret edildiğinde küme ile ilişkili kâr elde edilir. Amaç, belirlenen süre içerisinde toplam kârın enbüyüklediği turun bulunmasıdır. SOP'u çözmek için Pěnička vd. (2019) tarafından Değişken Komşu Arama (Variable Neighborhood Search-VNS) algoritması kullanılmıştır. Çalışmada SOP için yeni bir tamsayılı doğrusal programlama formülasyonu önerilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre önerilen yaklaşımın daha iyi ve hızlı çözümler verdiği görülmüştür. SOP için meta-sezgisel algoritma önerilen bir diğer çalışma ise Carrabs (2021) tarafından yapılmıştır. Çalışmada SOP'u çözmek için üç yerel arama prosedürü uygulanarak eğilimli rassal anahtar genetik algoritma önerilmiştir. Çözüm sonuçlarının literatürde bulunan diğer algoritmalara göre hız açısından üstünlük sağladığı belirtilmiştir.

Bu çalışmada, SGSP ailesinin bir genellemesi olan Seçici Kümelenirilmiş Gezgin Satıcı Problemi (SKGSP) ele alınmaktadır. Bu problemde, müşteriler gruplara ayrılarak kümelenirilmiş ve kümelerin hepsi ziyaret edilmek zorunda değildir. Bir küme en fazla bir kez ziyaret edilebilir. Ancak ziyaret edilen bir kümede tüm müşterilere uğranması zorunludur. Her müşterinin belirli bir kazanç değeri vardır ve ziyaret edildiğinde elde edilir. Amaç, belirli bir zaman kısıtı içerisinde toplam kazancı enbüyüklemektir. Zaman sınırı nedeniyle, tüm kümeler turda ziyaret edilemez, ancak ziyaret edilen bir kümede tüm düğümler turda olmalıdır. SKGSP literatürde Angelelli vd. (2014) tarafından Kümelenirilmiş OP (KOP) olarak ele alınmıştır. Her kümede tek bir müşteri bulunması durumunda KOP, OP'ye dönüşür. Bu çalışmada SKGSP'nin karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) formülasyonları verilmiştir. SKGSP için farklı türde yardımcı değişkenler kullanarak üç farklı matematiksel formülasyon önerilmektedir. Bu formülasyonlar arasındaki temel fark, farklı yapılar da alt tur engelleme kısıtları oluşturulurken kullanılan yardımcı değişkenlerin yorumlanması ile meydana gelmektedir. Matematiksel formülasyonlar, kullanılan yardımcı değişkenlerin tanımları nedeniyle düğüm tabanlı (NB) ve akış tabanlı (FB) olarak sınıflandırılır.

Yukarıda açıklanan problem türleri arasında KOP ve SOP, SKGSP'ye en çok benzeyen iki problemdir. SKGSP,

KOP'dan iki yönüyle farklılaşır. İlk olarak, KOP'da bir müşteri birden fazla kümeye ait olabilirken SKGSP'de kümelerin kesişiminde eleman bulunmamaktadır. İkincisi, SKGSP'de her küme en fazla bir kez ziyaret edilebilir, ancak KOP'da bir küme tur boyunca bir kereden fazla ziyaret edilebilir. SOP ile SKGSP arasındaki farklılık ise şu şekilde açıklanabilir: SKGSP'de kazanç düğümleri ilişkilidir. Çözümde bir küme seçildiğinde, tüm düğümler ziyaret edilmelidir ve toplam kazanç, kümede ziyaret edilen düğümlerin kazançları toplamına eşittir. Bunun aksine, SOP'ta kâr kümeleri ilişkilidir ve kümeden en az bir müşteri ziyaret edildiğinde kümenin kârı toplanır. Birden fazla müşteri ziyaret etmek tur seyahat süresini artıracığından, çözümde en fazla bir müşteriyi ziyaret etmek daha kabul edilebilir olacaktır. Bu yönüyle, kümedeki tüm müşteriler ziyaret edilemediğinden SKGSP probleminden farklılık göstermektedir.

Bu çalışmadaki motivasyonumuz, pratik uygulamaların SKGSP'nin türevleri veya genellemeleri olarak analiz edilip formüle edilebilmesidir. Bu tür uygulamaların örnekleri, tüm müşterileri ziyaret etmek için yeterli zamanı olmayan GSP'de olduğu gibi kitle tipi ürünlerin dağıtımı ile ilgilidir. Problemden gezgin, her müşteriye yapılan satış miktarını bilmekte ve seyahati belirli bir zamanla sınırlı tutarken toplam satışları enbüyüklemek istemektedir (Tsiligirides 1984). Evlere yakıt dağıtım probleminde olduğu gibi, bir kamyon filosu günlük olarak çok sayıda müşteriye teslimat yapmak zorundadır. Müşterilerin yakıt stok seviyesi her zaman yeterli seviyede tutulmalıdır. Amaç, her gün ziyaret edilmesi gereken kümelenirilmiş müşterilerin bir alt kümesini etkin araç güzergahı elde edecek şekilde seçmektir (Golden vd. 1987). Başka bir uygulama, telekomünikasyon ağları oluştururken tek halkalı tasarım problemi (the single-ring design problem) dir (Thomadsen ve Stidsen 2003). Bunun yanında, bir bölgeyi ziyaret eden bir turist grubunun ilgilendikleri her bölgeyi ziyaret edemediği gezici turist rehberi veya turist gezisi tasarım problemi ise bir diğer uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır (Souffriau vd. 2008, Vansteenwegen ve Van Oudheusden 2007).

Problemin kümelenirilmiş türevinde (Angelelli vd. 2014), müşteriler farklı tedarik zincirlerine ait perakendecilerdir ve taşıma firmaları bu zincirler ile anlaşma yaptığında o zincire ait tüm perakendecilere hizmet vermek zorundadır. Başka bir örnek, ürünlerin markalara göre ayrıldığı durumdur. Taşıyıcı firma, kâr elde etmek için anlaşmalı olduğu markanın belirli bir miktar ürününe ihtiyaç duyan tüm perakendecilere hizmet vermek zorundadır. Ayrıca, müşterilerin bölgelerde kümelenmesi ve sadece bir bölgedeki tüm müşterilere hizmet verilmesi halinde kârın toplanması durumunda farklı bir durum

ortaya çıkmaktadır. Örneğin, atık toplama hizmetleri sunan şirketlerde belediyeler tarafından görevlendirilmesi durumunda karşımıza çıkar.

SKGSP'nin kitle ürünlerinin dağıtımı gibi birçok pratik uygulamada kullanılma olanağı bulunmaktadır. Hizmet sistemleri, turizm ve modern lojistikte planlama faaliyetlerinin tasarımı gibi alanlar bunlara örnek olarak verilebilir. Turist gezisi tasarımı ve kişiselleştirilmiş elektronik turist rehberlerinin planlanması, SKGSP'nin turizme nasıl uygulanabileceğine dair diğer örneklerdir. Servis sistemlerinde, satış temsilcisi planlama ve onarım/bakım gibi problemleri modellemek ve tasarlamak için de kullanılabilir.

Literatürdeki rotalama problemleri arasında, en iyi rotaların kümelenirme veya gruplandırma ile araştırıldığı tüm problemlerde maliyet/mesafe enküçükleme dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte, birçok gerçek yaşam probleminin rotalama için yeterli kaynağı veya zamanı yoktur. Başka bir deyişle, tüm düğümleri veya kümeleri ziyaret etmek mümkün değildir. Bu nedenle, belirli bir kritere göre mevcut düğümler veya kümeler arasında seçim yapmak gerekir. Bu çalışmada ortaya konan problem, literatürdeki küme tabanlı rotalama problemlerinin aksine, kârın belirli bir zaman/bütçe kısıtlaması altında enbüyüklediği türde bir problemdir. Bu problemin gerçek yaşam uygulamalarına bir başka örnek ise, evde bakım hizmetleri, sipariş kabulü ve zamanlamasıdır. Bu tür problemlerde, ürün/hizmet ailesini ve işleri temsil etmek için düğümleri temsil eden kümeler göz önünde bulundurularak, belirli bir çalışma süresinde kârı enbüyükleyecek şekilde ürün ailelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Literatürde, yukarıda bahsettiğimiz gerçek yaşam problemlerini temsil eden uygun bir rotalama problem tanımı yoktur. Bu nedenle hem düğüm kümelerini dikkate alan hem de kârı enbüyüklemeyi hedefleyen yeni bir problem ortaya çıkarma ihtiyacı doğmuştur. SKGSP'yi ele alma motivasyonumuz, yukarıda açıklanan nedenlerden kaynaklanmaktadır.

Mevcut literatür araştırması ışığında, bu çalışmanın ana katkıları:

- Literatürdeki küme tabanlı rotalama problemlerinin aksine, kazancın belirli bir zaman/bütçe kısıtlaması altında enbüyüklediği SKGSP önerilmiştir.
- Probleme ait üç yeni matematiksel formülasyon önerilmiştir.
- Matematiksel formülasyonlar, altı saatlik süre sınırı içerisinde düğüm sayısı 200 ve küme sayısı 41'e kadar olan örnek problemler için eniyi çözümü elde edebilmiştir.

Çalışmanın ilerleyen kısımları şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de SKGSP'nin matematiksel tanımı verilmektedir. Bölüm 3'te, SKGSP için önerilen MILP formülasyonları sunulmaktadır. Bölüm 4'te, MILP formülasyonları üzerinde gerçekleştirilen hesaplamalı deneyleri ve elde edilen sonuçlar tartışılmaktadır. Bölüm 5'te genel değerlendirme ve gelecek çalışmalara yer verilmektedir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

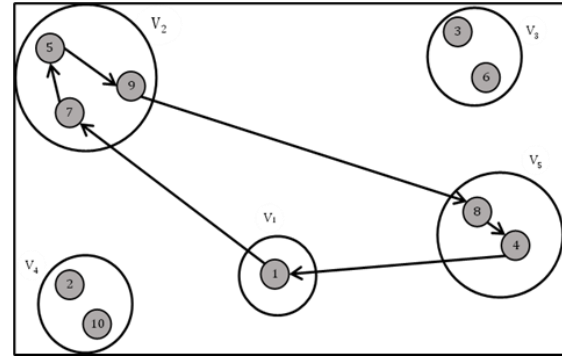
2. Problemin Tanımı

SKGSP yönlü bir $G = (V, A)$ grafiği kullanılarak tanımlanabilir; burada $V = \{1, 2, \dots, n\}$ düğümler ve $A = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$ ayrıtlar kümesidir. Düğümler kümesi, $V = V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_k$ ve $V_p \cap V_l = \emptyset, \forall p, l, p \neq l$ olacak şekilde kesişimleri boş küme olan k alt kümeye (salkım) ayrılır. Her $j \in V \setminus V_1$ düğümü ile ilişkili bir $s_j > 0$ kazanç değeri ve her bir $(i, j) \in A$ ayrıtına karşı gelen bir $t_{ij} > 0$ seyahat süresi vardır. Düğüm 1, başlangıç/bitiş noktası olarak işlev görür. $V_1 = \{1\}$ kümesinin tek elemanıdır ve kazanç değeri yoktur. Belirli bir T_{max} zaman sınırında, tüm kümeler ziyaret edilemeyebilir. Bir küme en fazla bir kez ziyaret edilebilir ve bir kümeye giriş yapıldığında küme içerisindeki bütün düğümlere uğranmalıdır. Bu problemde amaç, toplam kazancı enbüyükleyecek şekilde seçilen küme (ler) deki tüm düğümleri ziyaret eden bir turun belirlenmesidir. Şekil 1'de, yönlü bir serim üzerinde 10 düğüm ve 5 küme bulunan örnek bir SKGSP turu verilmektedir ve bu turda yalnızca 3 küme ziyaret edilmektedir.

3. SKGSP için Önerilen Matematiksel Formülasyonlar

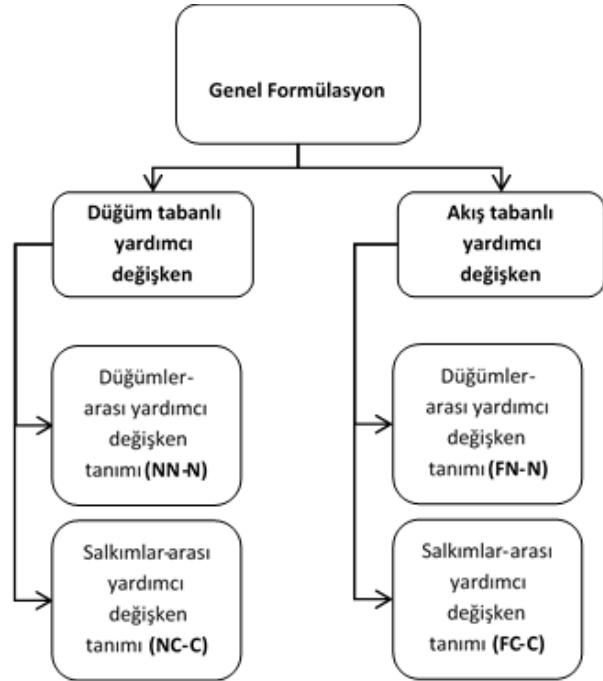
Çalışmanın bu bölümünde önce SKGSP için genel bir formülasyon verilmektedir, ardından farklı yardımcı değişken tanımlamaları ile ek kısıtların eklendiği üç yeni formülasyon önerilmiştir. Genel formülasyonda, düğümler bir turdaki sıralarına göre ziyaret edilir. Alt turları engelleyici ve sınırlayıcı kısıtların (süre, bütçe, maliyet limiti vb.) aşılmasını önlemek için yardımcı değişkenler tanımlanmıştır. Formülasyonlar yardımcı karar değişkenlerinin tanımına göre sınıflandırılmıştır. Bu değişkenler serimin düğümlerine göre ise NB (düğüm-tabanlı), ayrıtlarına göre ise FB (akış-tabanlı) olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, bu tanımlama düğümler arasında yapılmış ise yardımcı değişkenin Düğümden-Düğüme (N_N) tanımına sahip olduğu kabul edilir ve benzer şekilde, kümeler arasında yapılmış ise Kümeden-Küme (C_C) tanımına sahip olduğu kabul edilir. Örneğin, bir formülasyonda kullanılan bir NB yardımcı değişkeni, düğümler arasında veya kümeler arasında tanımlanabilir. Benzer şekilde, bir formülasyonda kullanılan bir FB

yardımcı değişkeni, düğümler arasında veya kümeler arasında tanımlanabilir. Şekil 2'de, bu çalışmada önerilen farklı formülasyonlar ve bunlara karşılık gelen kısaltmalar verilmektedir.



Şekil 1. Örnek bir SKGSP turu

Önerilen tüm formülasyonlarda $O(n^2)$ sayıda 0-1 tamsayı karar değişkenleri ve kısıt bulunmaktadır. Formülasyonlardaki tüm kısıtlar ve amaç fonksiyonu doğrusaldır. Formülasyonlarda kullanılan parametreler ve tanım kümeleri ilerleyen bölümde verilmektedir.



Şekil 2. Matematiksel Formülasyon Hiyerarşisi

3.1. Genel Formülasyon

Bu bölümde, çalışmada önerilen formülasyonlara ilişkin genel tanımlamalar ve kısıtlar verilmiştir.

Simgeler:

n : düğüm sayısı.

i, j : düğüm indisleri $i, j = 1, 2, \dots, n$.

k : salkım sayısı.

p, l : salkım indisleri $p, l = 1, 2, \dots, k$.

Kümeler:

$V = \{1, 2, \dots, n\}$: düğümler kümesi.

V_1 : depoyu içeren başlangıç salkımı.

$A = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$: ayrıtlar kümesi.

V_p : p . salkımda yer alan düğümler kümesi.

V kümesi, kesişimleri boş küme ve eleman sayısı sıfırdan farklı olan ve her biri bir düğüm kümesini temsil eden $V_1, V_2, V_3, \dots, V_k$, alt kümelerinden oluşmaktadır.

Parametreler:

s_j : j düğümünden elde edilen kazanç (skor, getiri, kâr vb.) değeri.

t_{ij} : i ve j düğümleri arasındaki seyahat süresi.

T_{max} : izin verilen en büyük seyahat süresi.

n_p : p . salkımın eleman sayısı.

Karar değişkenleri:

x_{ij} : i . düğümünden j . düğüme geçiş varsa 1, diğer durumlarda 0

Yukarıda verilen tanımlamalarla, SKGSP için genel formülasyon aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$Enb \ x_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n s_j x_{ij} \quad (1)$$

Kısıtlar altında

$$\sum_{j=2}^n x_{1j} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n x_{ij} \leq 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n x_{ij} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V \setminus V_p} x_{ij} \leq 1, \quad p = 2, \dots, k \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V \setminus V_p} \sum_{j \in V_p} x_{ij} \leq 1, \quad p = 2, \dots, k \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V_p} x_{ij} = \sum_{i \in V_p} \sum_{j \notin V_p} (n_p - 1) x_{ji}, \quad n_p \geq 2, \quad p = 2, \dots, k \quad (8)$$

$$\sum_{i \notin V_p} \sum_{j \in V_p} x_{ij} - \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V_p} x_{ji} = 0, \quad p = 2, \dots, k \quad (9)$$

$$\sum_{j \notin V_p} x_{ij} + \sum_{j \in V_p} x_{ji} \leq 1, \quad \forall i \in V_p, \quad n_p \geq 2, \quad p = 2, \dots, k \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n t_{ij} x_{ij} \leq T_{max} \quad (11)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \neq j, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n \quad (12)$$

ve

Alt tur engelleme + sınırlayıcı kısıtlar

Amaç fonksiyonu (1) toplam kazancın enbüyüklenmesidir.

Kısıt (2) turun 1. düğümden başlamasını sağlayan kısıttır.

Kısıt (3) turun 1. düğümden bitmesini sağlayan kısıttır. Kısıt

(4) ve (5) her düğümün en fazla bir kez ziyaret edilmesini

sağlayan kısıtlardır. Kısıt (6) ve (7) her salkımın en fazla bir

kez ziyaret edilmesini sağlayan kısıtlardır. Kısıt (8), (9) ve

(10) birlikte (düğüm sayısı 2 ve daha fazla olan salkımlar

için) salkım içi turda sürekliliği sağlayan kısıtlardır. Bu üçlü

kısıt grubu formülasyonun sıkılaşması ve daha hızlı çözüm alabilmek amacıyla geliştirilerek eklenmiştir. Ayrıca GSP'nin literatürde yer alan genelleştirilmiş türevlerinin çözümü için önerilen matematiksel formülasyonlarda bu kısıtlar bulunmamaktadır. Bu kısıtlar olmadan da genel formülasyon kullanılabilir. Kısıt (11), toplam seyahat süresinin T_{max} zaman sınırını aşmamasını sağlar. Kısıt (12) karar değişkeni için işaret kısıtıdır.

SKGSP'nin formülasyonları, alt tur engelleme ve sınırlayıcı kısıtlar açısından birbirinden farklı olacaktır.

3.2. Çalışmada Önerilen Matematiksel Formülasyonlar /

Çalışmanın bu kısmında, yeni yardımcı değişkenler tanımlanarak SKGSP için 4 farklı (NN-N, NC-C, FN-N ve FC-C) formülasyon önerilmektedir. Bu modellerden FN-N isimli formülasyon Derya ve ark. (2023) çalışmasında önerilen matematiksel modeldir. Bölüm 3.1'de karar değişkenlerine ek olarak tanımlanan yardımcı değişkenler ile bu 4 formülasyon aşağıda verilmektedir.

Düğüm Sıralama Tabanlı Matematiksel Formülasyon

NN-N Formülasyon: Düğüm tabanlı formülasyonda yardımcı değişkenin düğümler arasında tanımlanması.

u_i : Başlangıç noktasından (depodan) sonra i . düğüme uğrama (ziyaret etme) sırası

v_i : i . düğümün yer aldığı salkım içerisinde i . düğüme uğrama (ziyaret etme) sırası

Yukarıdaki tanımlar ile SKGSP'nin NN-N formülasyonu aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu (1)

Kısıtlar (2)– (12)

ve

$$u_i - u_j + n x_{ij} + (n - 2) x_{ji} \leq n - 1, \quad i \neq j, \quad i = 2, \dots, n, \quad j = 2, \dots, n \quad (13)$$

$$u_i \geq x_{i1} + 2 \sum_{\substack{j=2 \\ i \neq j}}^n x_{ji}, \quad i = 2, \dots, n \quad (14)$$

$$u_i \leq (n - 1) x_{i1} + (n - 2) \sum_{\substack{j=2 \\ i \neq j}}^n x_{ij} - (n - 3) x_{1i}, \quad i = 2, \dots, n \quad (15)$$

$$v_i - v_j + n_p x_{ij} + (n_p - 2) x_{ji} \leq (n_p - 1), \quad i \neq j, \quad \forall i, j \in V_p, \quad p = 2, \dots, k \quad (16)$$

$$v_i \geq \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n x_{ji} + \sum_{\substack{l \in V_p \\ l \neq i}} \sum_{j \in V_p} x_{jl}, \quad \forall i \in V_p, \quad p = 2, \dots, k \quad (17)$$

$$v_i \leq n_p \sum_{j \in V_p} x_{ij} + (n_p - 1) \sum_{j \in V_p} x_{ij}, \quad \forall i \in V_p, \quad p = 2, \dots, k \quad (18)$$

$$u_i \geq 0, \quad i = 2, \dots, n \quad (19)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 2, \dots, n \quad (20)$$

NN-N formülasyonunda Kısıt (13) turda düğümler arasında alt-turların oluşmasını engellerken, Kısıt (16) salkım içinde alt-turların oluşmasını engellemektedir. Kısıt (14) ve (15) u_i için, Kısıt (17) ve (18) ise v_i için alt ve üst sınırları belirlemektedir. Kısıt (19) ve (20) ise yardımcı karar değişkenleri için işaret kısıtlamalarıdır.

Salkım Sıralama Tabanlı Matematiksel Formülasyon

NC-C Formülasyon: Düğüm tabanlı formülasyonda yardımcı değişkenin salkımlar arasında tanımlanması.

u_p : Başlangıç salkımından (depodan) sonra p . salkıma uğrama (ziyaret etme) sırası

v_i : i . düğümün yer aldığı salkım içerisinde i . düğüme uğrama (ziyaret etme) sırası

Yukarıdaki tanımlar ile SKGSP'nin NC-C formülasyonu aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu (1)

Kısıtlar (2)–(12)

ve

$$u_p - u_l + k \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V_l} x_{ij} + (k - 2) \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V_l} x_{ji} \leq k - 1, p \neq l, p, l = 2, \dots, k \quad (21)$$

$$u_p \geq \sum_{j \in V_p} x_{1j} + 2 \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V(V_p \cup V_1)} x_{ji}, p = 2, \dots, k \quad (22)$$

$$u_p \leq (k - 1) \sum_{i \in V_p} x_{i1} + (k - 2) \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V(V_p \cup V_1)} x_{ij} - (k - 3) \sum_{j \in V_p} x_{1j}, p = 2, \dots, k \quad (23)$$

$$v_i - v_j + n_p x_{ij} + (n_p - 2) x_{ji} \leq (n_p - 1), i \neq j, \forall i, j \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (24)$$

$$v_i \geq \sum_{j=1}^n x_{ji} + \sum_{l \in V_p} \sum_{j \notin V_p} x_{jl}, \forall i \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (25)$$

$$v_i \leq n_p \sum_{j \notin V_p} x_{ij} + (n_p - 1) \sum_{j \in V_p} x_{ij}, \forall i \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (26)$$

$$u_p \geq 0, p = 2, \dots, k \quad (27)$$

$$v_i \geq 0, i = 2, \dots, n \quad (28)$$

NC-C formülasyonunda Kısıt (21) turda düğümler arasında alt-turların oluşmasını engellerken, Kısıt (24) salkım içinde alt-turların oluşmasını engellemektedir. Kısıt (22) ve (23) u_i için, Kısıt (25) ve (26) ise v_i için alt ve üst sınırları belirlemektedir. Kısıt (27) ve (28) ise yardımcı karar değişkenleri için işaret kısıtlamalarıdır.

Düğümler Arası Ayrıt Sıralama Tabanlı Matematiksel Formülasyon

FN-N Formülasyon: Akış tabanlı formülasyonda yardımcı değişkenin düğümler arasında tanımlanması.

f_{ij} : i . düğümünden j . düğüme geçiş olması durumunda, (i, j) ayrıtının depodan itibaren sırası

g_{ij} : i . ve j . düğümlerinin yer aldığı salkım içerisinde, (i, j) ayrıtının salkım içindeki sırası

Yukarıdaki tanımlar ile SKGSP'nin FN-N formülasyonu aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu (1)

Kısıtlar (2)– (12)

ve

$$f_{1j} = x_{1j}, j = 2, \dots, n \quad (29)$$

$$\sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V \setminus V_p} f_{ij} - \sum_{j \in V \setminus V_p} \sum_{i \in V_p} f_{ji} = \sum_{j \in V \setminus V_p} \sum_{i \in V_p} x_{ji}, p = 2, \dots, k \quad (30)$$

$$f_{ij} \leq k x_{ij}, \forall i \in V_p, \forall j \in V \setminus V_p, p = 1, \dots, k \quad (31)$$

$$\sum_{j \in V_p} g_{ij} - \sum_{j \in V_p} g_{ji} + n_p \sum_{j \in V \setminus V_p} x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = 0, \quad (32)$$

$$\forall i \in V_p, n_p \geq 2, p = 2, \dots, k \quad (32)$$

$$g_{ij} \leq (n_p - 1) x_{ij}, \forall i, j \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (33)$$

$$f_{ij} \geq 0, \forall i \in V_p, \forall j \in V \setminus V_p, p = 1, \dots, k \quad (34)$$

$$g_{ij} \geq 0, i \neq j, \forall i, j \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (35)$$

FN-N formülasyonunda Kısıt (29) turdaki ilk ayrıtın 1. düğümünden başlamasını sağlamaktadır. Kısıt (30), alt turları engelleyen ve ayrıt sırasının kümülatif olarak artmasını sağlayan kısıttır. Kısıt (31) f_{ij} için üst sınır belirleyen kısıttır. Kısıt (31) sayesinde, eğer (i, j) ayrıtı turda yer almıyorsa, karşı gelen değişken değerinin sıfır ($f_{ij}=0$) olacağını garanti eden sınırlayıcı kısıttır. Kısıt (32) ve (33) salkım içerisinde alt tur engelleme ve g_{ij} için üst sınır kısıtlarıdır. Kısıt (34) ve (35) yardımcı değişkenler için işaret kısıtlamalarıdır (Derya ve ark., 2023).

Salkımlar Arası Ayrıt Sıralama Tabanlı Matematiksel Formülasyon

FC-C Formülasyon: Akış tabanlı formülasyonda yardımcı değişkenin salkımlar arasında tanımlanması.

f_{pl} : p . salkımdan l . salkıma geçiş olması durumunda, p ve l salkımlarını bağlayan ayrıtın depodan itibaren sırası

g_{ij} : i . ve j . düğümlerinin yer aldığı salkım içerisinde, (i, j) ayrıtının salkım içindeki sırası

Yukarıdaki tanımlar ile SKGSP'nin FC-C formülasyonu aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu (1)

Kısıtlar (2)– (12)

ve

$$f_{1p} = \sum_{j \in V_p} x_{1j}, p = 2, \dots, k \quad (36)$$

$$\sum_{p=1}^k f_{pl} - \sum_{l=1}^k f_{lp} = \sum_{i \in V \setminus V_p} \sum_{j \in V_p} x_{ij}, p = 2, \dots, k \quad (37)$$

$$f_{pl} \leq k \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V_l} x_{ij}, p \neq l, p = 1, \dots, k, l = 1, \dots, k \quad (38)$$

$$\sum_{j \in V_p} g_{ij} - \sum_{j \in V_p} g_{ji} + n_p \sum_{j \in V \setminus V_p} x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = 0, \quad (39)$$

$$\forall i \in V_p, n_p \geq 2, p = 2, \dots, k \quad (39)$$

$$g_{ij} \leq (n_p - 1) x_{ij}, \forall i, j \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (40)$$

$$f_{pl} \geq 0, p \neq l, p = 1, \dots, k, l = 1, \dots, k \quad (41)$$

$$g_{ij} \geq 0, i \neq j, \forall i, j \in V_p, p = 2, \dots, k \quad (42)$$

FC-C formülasyonunda Kısıt (36) turdaki ilk ayrıtın 1. düğümünden başlamasını sağlamaktadır. Kısıt (37), alt turları engelleyen ve ayrıt sırasının kümülatif olarak artmasını

sağlayan kısıttır. Kısıt (38) f_{pl} için üst sınır belirleyen kısıttır. Kısıt (38) sayesinde, eğer (i, j) ayrıtı turda yer almıyorsa, karşı gelen değişken değerinin sıfır ($f_{pl}=0$) olacağını garanti eden sınırlayıcı kısıttır. Kısıt (39) ve (40) salkım içerisinde alt tur engelleme ve g_{ij} için üst sınır kısıtlarıdır. Kısıt (41) ve (42) yardımcı değişkenler için işaret kısıtlamalarıdır.

Tüm düğüm tabanlı (NB) formülasyonlarda (NN-N ve NC-C) Miller-Tucker-Zemlin (MTZ) (Miller vd. 1960) ile ilgili alt-tur engelleme kısıt yapısı kullanılmıştır. Akış tabanlı (FB) formülasyonlarda ise (FN-N ve FC-C) Gavish-Graves (GG) (Gavish ve Graves 1978) ile ilgili alt-tur engelleme kısıtları kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada SKGSP için geliştirilen matematiksel formülasyonlarda yer alan alt tur engelleme ve sınırlayıcı kısıtlar hem probleme özgü uyarlanmıştır hem de formülasyonları sıkılaştırmak amacıyla bu probleme özel olarak önerilmiştir.

Her formülasyon için n (düğüm sayısı) ve k (küme sayısı)'nin birer fonksiyonu olarak sürekli/ikili değişkenlerin ve kısıtları sayısı Büyük-O (Big-O) gösterimi ile Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Formülasyonların Boyutu

Formülasyon	Sürekli	İkili	Kısıt Sayısı
	Değişken Sayısı	Değişken Sayısı	
FC-C	$O(k^2)$	$O(n^2)$	$O(k^2)$
NC-C	$O(k)$	$O(n^2)$	$O(k^2)$
FN-N	$O(n^2)$	$O(n^2)$	$O(n^2)$
NN-N	$O(n)$	$O(n^2)$	$O(n^2)$

4. Deneysel Çalışmalar / Experimental Studies

Bu bölümde deneysel çalışmalara ait sonuçlar verilmektedir. Matematiksel formülasyonlar varsayılan parametrelerle CPLEX çözücüsü (versiyon 21.10) ile çözülmüştür. Deneysel çalışmalar için Intel Core i7-9700 3.00 GHz işlemci ve 8 GB RAM ile donatılmış bir bilgisayar kullanılmıştır. Her problemin çözümü için işlemcinin sekiz çekirdeği birlikte paralel olarak kullanılmıştır.

Aşağıdaki alt bölümlerde SKGSP için test problemlerinin nasıl oluşturulduğu açıklanmakta ve elde edilen sonuçlar tartışılmaktadır.

4.1. Test Problemleri

Bu çalışmada Fischetti, Salazar González ve Toth (1997) tarafından önerilen Genelleştirilmiş GSP (GGSP) veri seti kullanılmıştır ve Archetti ve diğ. (2018)'de açıklandığı şekliyle oluşturulmuştur. GGSP veri setini tek depolu SKGSP ile değiştirmek için, her veri setindeki ilk düğüm, orijinal GGSP kümesinden kaldırılmış ve onun yerine yeni bir depo kümesi (V_1) eklenmiştir. Her problem için

seyahat süresi sınırı $Tmax$, GGSP problemlerinde KGSP çözümlere hesaplanmıştır. Bu $Tmax$, $\omega =1$ 'e karşılık gelmektedir. ω oranları farklı $Tmax$ değerleri elde etmek için 0 ile 1 aralığında değiştirilmiştir. Veri setlerinde, her düğüm için iki farklı kazanç (p_1, p_2) dikkate alınmıştır. p_1 'de her j düğümünün birim kazanç değeri 1'dir. p_2 'de ise, her j düğümünün kazancı, $1+(7141j) \bmod(100)$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Veri seti 14 ile 400 düğüm arasında değişen farklı boyutlarda 52 problemden oluşmaktadır. Her problem için iki farklı kazanç değeri (p_1, p_2) ve dört farklı ω değeri (0.4, 0.6, 0.8, 1.0) kullanılarak toplamda 416 adet test problemi elde edilmiştir.

4.2. Karşılaştırmalı Sonuçlar

Bu çalışmada dört farklı formülasyonun karşılaştırması farklı performans kriterlerine göre gerçekleştirilmiştir. Bu dört formülasyondan FN-N modeli Derya ve ark. (2023)'nin çalışmasında yer alan formülasyondur. Matematiksel formülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasında dört performans kriteri dikkate alınmıştır. Bunlardan ilki ortalama eniyi üst sınır değeridir. Eniyi üst sınır değeri, matematiksel formülasyonun doğrusal gevşetilmiş çözümünden elde edilen amaç fonksiyonu değeridir. Enbüyükleme problemlerinde bu değer küçük olması formülasyonun sıkı olduğunu göstermektedir. Her problem için bu değerler elde edilmiş ve ortalaması alınarak her formülasyon için bu performans kriter değeri belirlenmiştir. İkincisi, ortalama çözüm süresidir. Her problemin çözüm süresinin ortalaması alınarak her formülasyon için bu performans kriteri hesaplanmıştır. Üçüncü kriter toplam eniyi çözüm sayıdır. Bu kriterden elde edilen değerler, her bir formülasyon ile 416 problem içinden eniyi çözüme ulaşılanların toplam sayıdır. Son kriter olan ortalama eniyi tamsayılı çözüm değeri ise, 6 saat (21600 sn.) süre sınırı içerisinde her formülasyon ile elde edilen eniyi tamsayılı çözümlerin amaç fonksiyonu değerlerinin ortalamasını vermektedir. Enbüyükleme problemlerinde bu değer büyük olması formülasyonun performansının iyi olduğunu göstermektedir. Bu performans kriterlerine ilişkin sonuçlar Şekil 3'te verilmektedir. Şekil 3, incelendiğinde FC-C formülasyonunun tüm performans kriterlerinde diğer formülasyonlara göre üstün olduğu gözlenmektedir. Tüm performans kriterlerinde bu formülasyonu, NC-C izlemektedir. Ayrıca, yardımcı değişkenin salkımlar arası tanımlandığı formülasyonların diğerlerine göre üstünlük sağladığı görülmektedir. Literatürde yer alan Derya ve ark. (2023)'nin çalışmasında önerilen model ile karşılaştırma yapıldığında; FN-N formülasyonu, ortalama eniyi üst sınır değeri kriterine, ortalama çözüm süresi kriterine ve toplam eniyi çözüm

sayısı kriterine göre 3. sırada, ortalama eniyi tamsayılı çözüm kriterine göre ise sonuncu sırada yer almıştır. Bu dört formülasyondan eniyi performans gösteren model bu çalışmada önerilen FC-C olmuştur.

Şekil 4 ve Şekil 5'te farklı ω değerlerinde göre çözüm sürelerinin ve eniyi çözüme ulaşılan problem sayılarının karşılaştırılması verilmiştir. Şekillerde T40, T60, T80 ve T100 ile sırasıyla $\omega=0.4$, $\omega=0.6$, $\omega=0.8$ ve $\omega=1.0$ olduğu ifade edilmektedir. Çözüm süresi açısından bakıldığında T_{max} değeri arttıkça çözüm süresinin tüm formülasyonlarda azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir: Ele alınan problem yapısında, salkımların seçimi ve sıralanması şeklinde iki karar bulunmaktadır. T_{max} süresi arttıkça salkımların seçimi için seçenek sayısı azalmakta ve $\omega=1.0$ olduğunda bu durum tamamen ortadan kalkmaktadır. Benzer şekilde, eniyi çözüme ulaşılan problem sayısı açısından bakıldığında T_{max} değeri arttıkça bu değer arttığı yani daha fazla sayıda eniyi çözüme ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 4 ve 5 incelendiğinde hem çözüm süresinde hem de eniyi çözüme ulaşılan problem sayısında farklı ω değerlerine göre FC-C modeli, Derya ve ark. (2023)'ün çalışmasında önerilen FN-N modeline göre üstünlük göstermiştir.

Çizelge 2'de ise formülasyonların farklı ω değerlerine göre ortalama %GAP değerleri verilmiştir. Buradaki %GAP değeri, $\%GAP = (UST - \#) / \# * 100$ formülü ile hesaplanmıştır. Bu değer küçük olması ilgili formülasyonun daha iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir. Formülde yer alan UST, 21600 sn. süre sınırı içerisinde elde edilen eniyi doğrusal gevşetilmiş çözüm değerini ve # ise bulunan eniyi tamsayılı çözüm değerini göstermektedir. Çizelge 2'deki sonuçlara göre ω değeri arttıkça tüm formülasyonlarda ortalama %GAP değerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca formülasyonlar arasında FC-C modelinin en küçük ortalama %GAP değerine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Derya ve ark. (2023)'ün çalışmasında önerilen FN-N ise genel ortalamaya göre üçüncü sırada yer almıştır. Bu sonuçlar yukarıda verilen sonuçları destekleyici niteliktedir.

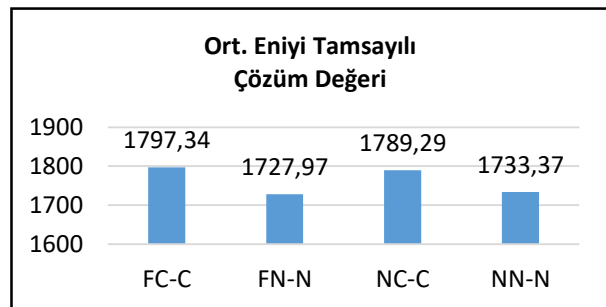
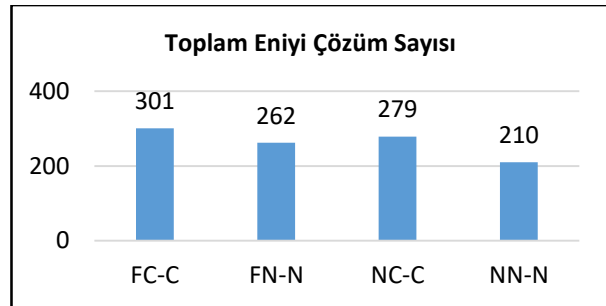
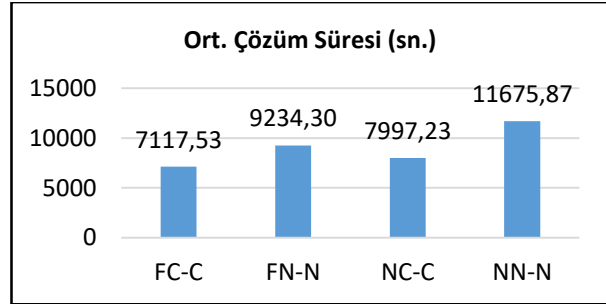
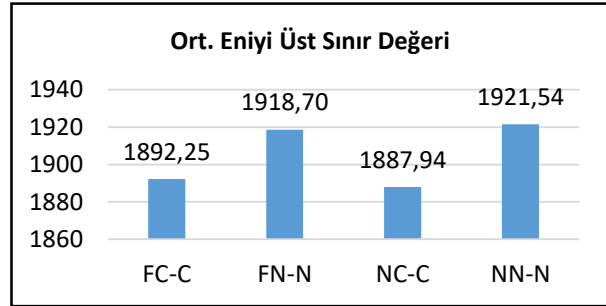
Çizelge 2. Tüm Formülasyon ve Farklı ω Değerlerine Göre Ortalama %GAP Değerleri

	T40	T60	T80	T100	Genel Ort.
FC-C	8,79	4,94	1,85	0,40	4,00
FN-N	16,95	11,81	4,54	1,17	8,62
NC-C	7,94	5,44	3,08	0,89	4,33
NN-N	17,17	10,46	6,22	2,06	8,98
Genel Ort.	12,71	8,16	3,92	1,13	6,48

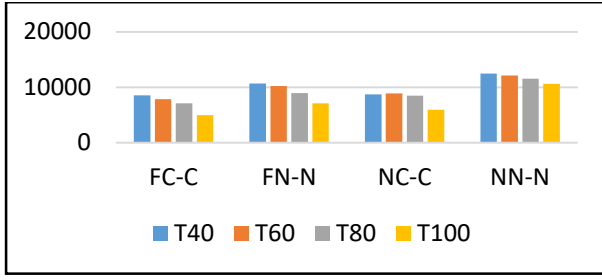
Son olarak $\omega=1.0$ için, tüm her bir test probleminin her bir formülasyon ile çözümünden elde edilen, eniyi tamsayılı

çözümün amaç fonksiyonu değeri ve %GAP değeri Çizelge 3'te verilmiştir.

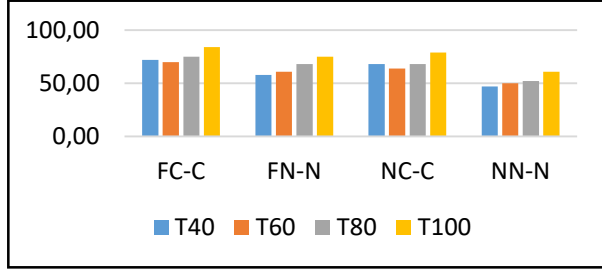
Çizelge 3'te bulunan bilgiler ayrıca formülasyonun doğruluğunun ispatlanmasında destekleyici niteliktedir. Şöyle ki; SKGSP'deki T_{max} süre sınırına problemde yer alan tüm salkım ve düğümlere uğrayacak şekilde yeterince büyük bir değer verildiğinde ($\omega=1.0$ olduğunda) KGSP'ye dönüşmektedir. KGSP'nin eniyi çözümünde tüm salkım ve salkım içerisindeki tüm düğümlerin ziyaret edilme zorunluluğu bulunmaktadır.



Şekil 3. Performans Ölçütlerine Göre Formülasyonların Karşılaştırılması (FN-N formülasyonu Derya ve ark. (2023) çalışmasında yer alan modeldir.)



Şekil 4. Farklı ω Değerlerine Göre Çözüm Sürelerinin Karşılaştırılması



Şekil 5. Farklı ω Değerlerine Göre Eniyi Çözüm Sayılarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada ele alınan problemin KGSP'den farkı, deponun ayrı bir başlangıç salkımı içerisinde yer almasıdır. Dolayısıyla $\omega=1.0$ olduğunda elde edilen çözümlerde n-1 düğümün ziyaret edilmesi gerekmektedir. Çizelge 3'te ayrıntılı olarak verilen sonuçların tümü $\omega=1.0$ için alınan çözümlerdir. %GAP değerinin sıfır olduğu çözümler incelendiğinde $p1$ amaç fonksiyonu yapısına sahip problemlerde amaç fonksiyonu değerinin düğüm sayısından 1 eksik olduğu görülmektedir. Bu da modellerin doğru sonuçlar verdiğini desteklemektedir. Çizelge 4-6'da ise sırasıyla $\omega=0.8$, $\omega=0.6$ ve $\omega=0.4$ için bulunan sonuçların tümü ve %GAP değerleri verilmiştir.

Çizelge 7'de 10att48 ve 16eil76 problemlerinin çözümleri verilmiştir. Bu çözümler farklı ω değerlerine ve farklı amaç fonksiyonu yapılarına (P1/P2) göre gösterilmiştir. İlk sütunda problemin adı, ikinci sütunda problemdeki düğüm sayısı, üçüncü sütunda problemdeki salkım sayısı, dördüncü sütunda ω değerleri, beşinci sütunda amaç fonksiyonu yapısı, altıncı sütunda ise problemde verilen T_{max} sınırı bilgileri yer almaktadır. İzleyen sütunlarda ise problemin çözümü sonucunda elde edilen bilgiler yer almaktadır. Yedinci ve sekizinci sütunda sırasıyla problemin eniyi amaç fonksiyonu değeri ve çözüm süresi, dokuzuncu sütunda turda uğranılan salkım sayısı, onuncu sütunda tur süresi ve son sütunda ise tur boyunca uğranılan düğümlerin listesi yer almaktadır.

Tüm sonuçlar incelendiğinde bu çalışmada ele alınan dört formülasyon içerisinde akış tabanlı (FB) modeller düğüm tabanlı modellere (NB) göre üstünlük sağlamıştır. Bunun yanında yardımcı değişkenlerin salkımlar arası

tanımlandığı modeller, düğümler arası tanımlanan modellere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu dört formülasyon içerisinde akış tabanlı ve yardımcı değişkenin salkımlar arası tanımlandığı model olan FC-C formülasyonu diğerlerine göre üstünlük sağlamıştır.

5. Sonuç

Bu çalışmada SKGSP problemi için üç yeni formülasyon önerisi yapılmıştır. Problemde bir seyahat süresi sınırı bulunmaktadır ve her müşterinin bir kazanç değeri vardır. Amaç, müşterilerden toplanan toplam kazancı enbüyüklemektir. Formülasyonların sonuçlarına göre tüm örneklerin %72'si FC-C ile %67'si NC-C ile %63'ü FN-N ile ve %51'i NN-N ile en iyi çözüme ulaşılmıştır. Bu oranlara göre tüm formülasyonların örneklerin yarısından fazlasında en iyi çözüme ulaşılmıştır. Ayrıca tüm formülasyonlar eniyi çözüme ortalama %6 yaklaşık çözüm bulabilmiştir. Matematiksel formülasyonlar ile 200 düğüm 41 salkımla problemlerin eniyi çözümü elde edilmiştir. Bunun yanında FC-C modeli literatürde yer alan FN-N modeline göre tüm performans kriterlerinde üstünlük sağlamıştır. Gerçek hayat problemlerinin çözümünde sezgisel teknikler kullanılarak yaklaşık sonuçlar yerine kesin çözüm elde edebildiğimiz matematiksel formülasyonları kullanmanın önemi büyüktür. Yukarıda belirttiğimiz bu oranlar bu çalışmada önerilen matematiksel formülasyonların etkili olduğunu göstermektedir.

SKGSP'nin kitlesel ürünlerin dağıtımından turizme ve modern lojistiğe kadar çeşitli alanlarda olası pratik uygulamaları bulunmaktadır. Dolayısıyla bu probleme yönelik önerilen formülasyonlar hem dağıtım sektörüne hem de müşterilere fayda sağlayacak (firmaların maliyetlerinin ve müşterilerin hizmet satın alma maliyetlerinin azalması) niteliktedir.

Bu konuyla ilgili gelecekteki çalışmalarda, ek kısıtlamalar ve sınırlamalarla diğer gerçekçi SKGSP varyantları ele alınabilir. Bunlara örnek olarak Zaman Pencereli SKGSP, çok depolu (multi-depot), heterojen ve kapasiteli çok turlu (multi-trip) SKGSP verilebilir. Bu varyantlar ile problem, turizm ve modern lojistik alanlarında karşılaşılabilecek farklı gerçek hayat problemlerine kolaylıkla uyarlanabilir. Ayrıca SKGSP'yi çözmek için matematiksel formülasyonların yanında meta-sezgisel yaklaşımlar geliştirilebilir.

Çizelge 3. $\omega = 1.0$ için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar (FN-N formülasyonu Derya ve ark. (2023) çalışmasında yer alan modeldir.)

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C		
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	
10att48_P1	47	0,00	47	0,00	47	0,00	47	0,00	20kroD100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	97	2,06
10att48_P2	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	20kroD100_P2	5008	0,00	4962	0,93	5008	0,00	4962	0,93
10gr48_P1	47	0,00	47	0,00	47	0,00	47	0,00	20kroE100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	98	1,02
10gr48_P2	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	20kroE100_P2	5008	0,00	4938	1,42	5008	0,00	4887	2,48
10hk48_P1	47	0,00	47	0,00	47	0,00	47	0,00	20rat99_P1	98	0,00	98	0,00	98	0,00	98	0,00
10hk48_P2	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	2422	0,00	20rat99_P2	5007	0,00	5007	0,00	5007	0,00	5007	0,00
11berlin52_P1	51	0,00	51	0,00	51	0,00	51	0,00	20rd100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	99	0,00
11berlin52_P2	2608	0,00	2608	0,00	2608	0,00	2608	0,00	20rd100_P2	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00
11eil51_P1	50	0,00	50	0,00	50	0,00	50	0,00	21eil101_P1	100	0,00	100	0,00	100	0,00	100	0,00
11eil51_P2	2575	0,00	2575	0,00	2575	0,00	2575	0,00	21eil101_P2	5050	0,00	5050	0,00	5050	0,00	5050	0,00
12brazil58_P1	57	0,00	57	0,00	57	0,00	57	0,00	21lin105_P1	104	0,00	104	0,00	104	0,00	104	0,00
12brazil58_P2	2967	0,00	2967	0,00	2967	0,00	2967	0,00	21lin105_P2	5228	0,00	5228	0,00	5228	0,00	5157	1,38
14st70_P1	69	0,00	69	0,00	69	0,00	69	0,00	22pr107_P1	104	1,92	101	4,95	101	4,95	101	4,95
14st70_P2	3513	0,00	3513	0,00	3513	0,00	3513	0,00	22pr107_P2	5268	1,80	5102	5,12	5101	5,14	4826	11,13
16eil76_P1	75	0,00	75	0,00	75	0,00	75	0,00	24gr120_P1	119	0,00	119	0,00	119	0,00	118	0,85
16eil76_P2	3800	0,00	3800	0,00	3800	0,00	3800	0,00	24gr120_P2	6038	0,00	6038	0,00	6038	0,00	6006	0,53
16pr76_P1	75	0,00	75	0,00	75	0,00	75	0,00	25pr124_P1	121	1,65	121	1,65	123	0,00	114	7,89
16pr76_P2	3800	0,00	3800	0,00	3800	0,00	3800	0,00	25pr124_P2	6232	0,00	6050	3,01	6173	0,96	6050	3,01
20gr96_P1	95	0,00	95	0,00	95	0,00	95	0,00	26bier127_P1	126	0,00	126	0,00	125	0,80	125	0,80
20gr96_P2	4850	0,00	4850	0,00	4850	0,00	4850	0,00	26bier127_P2	6333	0,00	6333	0,00	6333	0,00	6314	0,30
20kroA100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	99	0,00	26ch130_P1	129	0,00	129	0,00	129	0,00	129	0,00
20kroA100_P2	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	26ch130_P2	6503	0,00	6503	0,00	6503	0,00	6418	1,32
20kroB100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	96	3,13	28gr137_P1	136	0,00	136	0,00	135	0,74	133	2,26
20kroB100_P2	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	4937	1,44	28gr137_P2	6868	0,00	6795	1,07	6795	1,07	6700	2,51
20kroC100_P1	99	0,00	99	0,00	99	0,00	99	0,00	28pr136_P1	134	0,75	135	0,00	134	0,75	129	4,65
20kroC100_P2	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	5008	0,00	28pr136_P2	6841	0,13	6841	0,13	6841	0,13	6781	1,02

Çizelge 3 (devam). $\omega=1.0$ için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C	
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap
29pr144_P1	141	1,42	141	1,42	141	1,42	120	19,17	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00
29pr144_P2	7137	1,47	7137	1,47	7137	1,47	6255	15,78	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00
30ch150_P1	149	0,00	149	0,00	149	0,00	149	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00
30ch150_P2	7533	0,00	7427	1,43	7533	0,00	7450	1,11	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00	848	0,00
30kroA150_P1	149	0,00	147	1,36	149	0,00	147	1,36	15	0,00	15	0,00	15	0,00	15	0,00	15	0,00	15	0,00
30kroA150_P2	7487	0,61	7487	0,61	7533	0,00	7471	0,83	750	0,00	750	0,00	750	0,00	750	0,00	750	0,00	750	0,00
30kroB150_P1	149	0,00	148	0,68	148	0,68	143	4,20	20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00
30kroB150_P2	7533	0,00	7445	1,18	7503	0,40	7280	3,48	1050	0,00	1050	0,00	1050	0,00	1050	0,00	1050	0,00	1050	0,00
31pr152_P1	147	2,72	137	10,22	145	4,14	136	11,03	23	0,00	23	0,00	23	0,00	23	0,00	23	0,00	23	0,00
31pr152_P2	7611	0,62	7486	2,30	5800	32,03	5800	32,03	1182	0,00	1182	0,00	1182	0,00	1182	0,00	1182	0,00	1182	0,00
32u159_P1	157	0,64	157	0,64	157	0,64	146	8,22	21	0,00	21	0,00	21	0,00	21	0,00	21	0,00	21	0,00
32u159_P2	8011	0,32	8011	0,32	8011	0,32	7803	3,00	1053	0,00	1053	0,00	1053	0,00	1053	0,00	1053	0,00	1053	0,00
35si175_P1	174	0,00	173	0,58	173	0,58	172	1,16	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00
35si175_P2	8809	0,27	8796	0,42	8744	1,02	8660	2,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00
36brg180_P1	178	0,56	178	0,56	178	0,56	178	0,56	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00	28	0,00
36brg180_P2	8514	7,21	9035	1,03	9035	1,03	9035	1,03	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00	1422	0,00
39rat195_P1	194	0,00	194	0,00	194	0,00	194	0,00	25	0,00	25	0,00	25	0,00	25	0,00	25	0,00	25	0,00
39rat195_P2	9863	0,00	9863	0,00	9863	0,00	9863	0,00	1275	0,00	1275	0,00	1275	0,00	1275	0,00	1275	0,00	1275	0,00
3burma14_P1	13	0,00	13	0,00	13	0,00	13	0,00	33	0,00	33	0,00	33	0,00	33	0,00	33	0,00	33	0,00
3burma14_P2	677	0,00	677	0,00	677	0,00	677	0,00	1687	0,00	1687	0,00	1687	0,00	1687	0,00	1687	0,00	1687	0,00
40d198_P1	195	1,03	171	15,20	171	15,20	166	18,67	35	0,00	35	0,00	35	0,00	35	0,00	35	0,00	35	0,00
40d198_P2	8628	15,87	8677	15,21	8628	15,87	8628	15,87	1800	0,00	1800	0,00	1800	0,00	1800	0,00	1800	0,00	1800	0,00
40kroa200_P1	198	0,51	198	0,51	198	0,51	190	4,74	38	0,00	38	0,00	38	0,00	38	0,00	38	0,00	38	0,00
40kroa200_P2	9970	0,88	8386	19,94	9922	1,37	9552	5,30	1977	0,00	1977	0,00	1977	0,00	1977	0,00	1977	0,00	1977	0,00
40kroB200_P1	199	0,00	196	1,53	199	0,00	196	1,53	41	0,00	41	0,00	41	0,00	41	0,00	41	0,00	41	0,00
40kroB200_P2	9953	1,05	7922	26,96	10021	0,37	10021	0,37	2123	0,00	2123	0,00	2123	0,00	2123	0,00	2123	0,00	2123	0,00

Çizelge 4. $\omega=0.8$ için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar (FN-N formülasyonu Derya ve ark. (2023) çalışmasında yer alan modeldir.)

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C	
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap
10att48_P1	40.00	0.00	40.00	0.00	40.00	0.00	40.00	0.00	20kroD100_P1	82.00	0.00	82.00	0.00	82.00	0.00	82.00	0.00	81.00	0.05	
10att48_P2	2029.00	0.00	2029.00	0.00	2029.00	0.00	2029.00	0.00	20kroD100_P2	4185.00	0.01	4087.00	0.10	4185.00	0.00	4185.00	0.00	4063.00	0.10	
10gr48_P1	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	20kroE100_P1	85.00	0.00	85.00	0.00	85.00	0.00	85.00	0.00	84.00	0.02	
10gr48_P2	2043.00	0.00	2043.00	0.00	2043.00	0.00	2043.00	0.00	20kroE100_P2	4455.00	0.00	4455.00	0.00	4455.00	0.00	4455.00	0.00	4285.00	0.05	
10hk48_P1	41.00	0.00	41.00	0.00	41.00	0.00	41.00	0.00	20rat99_P1	87.00	0.00	87.00	0.00	87.00	0.01	87.00	0.01	85.00	0.05	
10hk48_P2	2145.00	0.00	2145.00	0.00	2145.00	0.00	2145.00	0.00	20rat99_P2	4524.00	0.00	4504.00	0.02	4430.00	0.04	4524.00	0.04	4524.00	0.03	
11berlin52_P1	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	20rd100_P1	86.00	0.00	86.00	0.00	86.00	0.00	86.00	0.00	86.00	0.00	
11berlin52_P2	2274.00	0.00	2274.00	0.00	2274.00	0.00	2274.00	0.00	20rd100_P2	4401.00	0.00	4401.00	0.00	4401.00	0.00	4401.00	0.00	4401.00	0.00	
11eil51_P1	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	21eil101_P1	87.00	0.00	87.00	0.00	87.00	0.00	87.00	0.00	87.00	0.00	
11eil51_P2	2114.00	0.00	2114.00	0.00	2114.00	0.00	2114.00	0.00	21eil101_P2	4538.00	0.00	4538.00	0.00	4538.00	0.00	4538.00	0.00	4538.00	0.01	
12brazil58_P1	53.00	0.00	53.00	0.00	53.00	0.00	53.00	0.00	21lin105_P1	88.00	0.00	87.00	0.03	87.00	0.03	87.00	0.03	87.00	0.05	
12brazil58_P2	2725.00	0.00	2725.00	0.00	2725.00	0.00	2725.00	0.00	21lin105_P2	4425.00	0.04	4425.00	0.06	4425.00	0.05	4300.00	0.10	4300.00	0.10	
14st70_P1	60.00	0.00	60.00	0.00	60.00	0.00	60.00	0.00	22pr107_P1	74.00	0.26	72.00	0.38	69.00	0.54	59.00	0.80	59.00	0.80	
14st70_P2	3010.00	0.00	3010.00	0.00	3010.00	0.00	3010.00	0.00	22pr107_P2	3574.00	0.27	3802.00	0.35	3646.00	0.47	2980.00	0.80	2980.00	0.80	
16eil76_P1	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	24gr120_P1	103.00	0.00	103.00	0.00	103.00	0.00	103.00	0.00	103.00	0.02	
16eil76_P2	3309.00	0.00	3309.00	0.00	3309.00	0.01	3309.00	0.01	24gr120_P2	5353.00	0.01	5164.00	0.09	5333.00	0.01	5165.00	0.06	5165.00	0.06	
16pr76_P1	68.00	0.00	68.00	0.00	68.00	0.01	68.00	0.01	25pr124_P1	105.00	0.04	105.00	0.03	105.00	0.00	102.00	0.14	102.00	0.14	
16pr76_P2	3477.00	0.00	3477.00	0.00	3477.00	0.01	3477.00	0.01	25pr124_P2	5309.00	0.08	5150.00	0.12	5356.00	0.04	5257.00	0.13	5257.00	0.13	
20gr96_P1	88.00	0.00	88.00	0.00	88.00	0.00	88.00	0.00	26bier127_P1	121.00	0.00	121.00	0.00	121.00	0.00	121.00	0.00	121.00	0.00	
20gr96_P2	4454.00	0.00	4454.00	0.00	4454.00	0.00	4454.00	0.00	26bier127_P2	6093.00	0.00	6093.00	0.00	6093.00	0.00	5961.00	0.03	5961.00	0.03	
20kroA100_P1	81.00	0.00	81.00	0.00	81.00	0.00	81.00	0.00	26ch130_P1	112.00	0.00	112.00	0.00	112.00	0.00	112.00	0.00	112.00	0.00	
20kroA100_P2	4102.00	0.00	4102.00	0.00	4102.00	0.02	4087.00	0.04	26ch130_P2	5718.00	0.00	5502.00	0.07	5663.00	0.02	5614.00	0.04	5614.00	0.04	
20kroB100_P1	82.00	0.00	82.00	0.00	82.00	0.04	82.00	0.04	28gr137_P1	125.00	0.00	125.00	0.00	125.00	0.02	123.00	0.03	123.00	0.03	
20kroB100_P2	4009.00	0.11	4061.00	0.10	4094.00	0.07	3846.00	0.17	28gr137_P2	6239.00	0.00	6239.00	0.01	6239.00	0.02	6170.00	0.04	6170.00	0.04	
20kroC100_P1	83.00	0.00	83.00	0.00	83.00	0.00	83.00	0.00	28pr136_P1	114.00	0.03	110.00	0.09	111.00	0.09	110.00	0.11	110.00	0.11	
20kroC100_P2	4150.00	0.00	4150.00	0.01	4150.00	0.03	4055.00	0.07	28pr136_P2	6113.00	0.04	6043.00	0.06	6113.00	0.04	5745.00	0.12	5745.00	0.12	

Çizelge 4 (devam). $\omega=0.8$ için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C		
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	
29pr144_P1	122.00	0.06	120.00	0.07	118.00	0.08	112.00	0.21	4br17_P1	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00
29pr144_P2	6133.00	0.06	5873.00	0.15	6133.00	0.07	5628.00	0.22	4br17_P2	777.00	0.00	777.00	0.00	777.00	0.00	777.00	0.00	777.00	0.00
30ch150_P1	122.00	0.00	121.00	0.04	120.00	0.04	119.00	0.06	4gr17_P1	12.00	0.00	12.00	0.00	12.00	0.00	12.00	0.00	12.00	0.00
30ch150_P2	6317.00	0.03	5439.00	0.23	6342.00	0.02	5997.00	0.10	4gr17_P2	696.00	0.00	696.00	0.00	696.00	0.00	696.00	0.00	696.00	0.00
30kroA150_P1	124.00	0.00	124.00	0.01	124.00	0.00	123.00	0.03	4ulysses16_P1	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00
30kroA150_P2	6418.00	0.03	5905.00	0.15	6418.00	0.01	6383.00	0.04	4ulysses16_P2	698.00	0.00	698.00	0.00	698.00	0.00	698.00	0.00	698.00	0.00
30kroB150_P1	129.00	0.00	129.00	0.00	129.00	0.00	126.00	0.05	5gr21_P1	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00
30kroB150_P2	6547.00	0.03	6547.00	0.05	6547.00	0.01	6131.00	0.11	5gr21_P2	941.00	0.00	941.00	0.00	941.00	0.00	941.00	0.00	941.00	0.00
31pr152_P1	115.00	0.17	108.00	0.30	115.00	0.24	115.00	0.31	5gr24_P1	15.00	0.00	15.00	0.00	15.00	0.00	15.00	0.00	15.00	0.00
31pr152_P2	5800.00	0.25	5387.00	0.37	5800.00	0.29	4978.00	0.54	5gr24_P2	831.00	0.00	831.00	0.00	831.00	0.00	831.00	0.00	831.00	0.00
32u159_P1	135.00	0.02	132.00	0.07	137.00	0.02	135.00	0.04	5ulysses22_P1	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00
32u159_P2	6956.00	0.03	5860.00	0.25	7019.00	0.03	6351.00	0.16	5ulysses22_P2	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.00
35si175_P1	141.00	0.01	139.00	0.04	140.00	0.02	136.00	0.05	6bayg29_P1	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00
35si175_P2	7277.00	0.06	6935.00	0.12	7381.00	0.02	7170.00	0.06	6bayg29_P2	1074.00	0.00	1074.00	0.00	1074.00	0.00	1074.00	0.00	1074.00	0.00
36brg180_P1	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	6bays29_P1	23.00	0.00	23.00	0.00	23.00	0.00	23.00	0.00	23.00	0.00
36brg180_P2	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	6bays29_P2	1127.00	0.00	1127.00	0.00	1127.00	0.00	1127.00	0.00	1127.00	0.00
39rat195_P1	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	6fri26_P1	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00
39rat195_P2	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	6fri26_P2	933.00	0.00	933.00	0.00	933.00	0.00	933.00	0.00	933.00	0.00
3burma14_P1	12.00	0.00	12.00	0.00	12.00	0.00	12.00	0.00	7ftv33_P1	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00
3burma14_P2	671.00	0.00	671.00	0.00	671.00	0.00	671.00	0.00	7ftv33_P2	1399.00	0.00	1399.00	0.00	1399.00	0.00	1399.00	0.00	1399.00	0.00
40d198_P1	171.00	0.09	170.00	0.12	171.00	0.14	171.00	0.15	8ftv36_P1	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00	28.00	0.00
40d198_P2	8628.00	0.11	6938.00	0.40	6361.00	0.56	5557.00	0.80	8ftv36_P2	1475.00	0.00	1475.00	0.00	1475.00	0.00	1475.00	0.00	1475.00	0.00
40kroa200_P1	170.00	0.00	168.00	0.04	169.00	0.03	166.00	0.05	8ftv38_P1	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00
40kroa200_P2	8526.00	0.03	7961.00	0.13	8609.00	0.02	7873.00	0.14	8ftv38_P2	1713.00	0.00	1713.00	0.00	1713.00	0.00	1713.00	0.00	1713.00	0.00
40krob200_P1	168.00	0.02	147.00	0.19	162.00	0.06	165.00	0.05	9dantzig42_P1	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.06
40krob200_P2	8851.00	0.02	6185.00	0.49	8851.00	0.01	8653.00	0.05	9dantzig42_P2	1757.00	0.00	1757.00	0.00	1757.00	0.00	1757.00	0.00	1757.00	0.06

Çizelge 5. $\omega=0.6$ için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar (FN-N formülasyonu Derya ve ark. (2023) çalışmasında yer alan modeldir.)

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C	
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap
10att48_P1	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	33.00	0.00	63.00	0.08
10att49_P2	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	1666.00	0.00	2974.00	0.19
10gr48_P1	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	59.00	0.15
10gr48_P2	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	1586.00	0.00	3387.00	0.08
10hk48_P1	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	60.00	0.15
10hk48_P2	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	1577.00	0.00	3317.00	0.09
11berlin52_P1	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	38.00	0.00	66.00	0.00
11berlin52_P2	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	1913.00	0.00	3497.00	0.02
11eil51_P1	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	70.00	0.00
11eil51_P2	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	1656.00	0.00	3673.00	0.00
12brazil58_P1	48.00	0.00	48.00	0.00	45.00	0.11	45.00	0.11	45.00	0.11	45.00	0.11	45.00	0.11	45.00	0.11	45.00	0.11	67.00	0.16
12brazil58_P2	2426.00	0.00	2426.00	0.00	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2274.00	0.12	2989.00	0.35
14st70_P1	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	46.00	0.00	53.00	0.72
14st70_P2	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2370.00	0.00	2697.00	0.76
16eil76_P1	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	48.00	0.00	78.00	0.05
16eil76_P2	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	2670.00	0.00	3812.00	0.15
16pr76_P1	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	57.00	0.00	82.00	0.15
16pr76_P2	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	2916.00	0.00	3455.00	0.45
20gr96_P1	69.00	0.00	69.00	0.00	67.00	0.04	67.00	0.04	67.00	0.04	67.00	0.04	67.00	0.04	67.00	0.04	67.00	0.04	104.00	0.07
20gr96_P2	3525.00	0.00	3442.00	0.07	3442.00	0.04	3442.00	0.04	3442.00	0.04	3442.00	0.04	3442.00	0.04	3442.00	0.04	3442.00	0.04	5145.00	0.06
20kroA100_P1	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	61.00	0.00	86.00	0.00
20kroA100_P2	2992.00	0.04	2992.00	0.03	2976.00	0.10	2976.00	0.10	2976.00	0.10	2976.00	0.10	2976.00	0.10	2976.00	0.10	2976.00	0.10	4478.00	0.04
20kroB100_P1	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	64.00	0.00	87.00	0.18
20kroB100_P2	3047.00	0.20	3047.00	0.14	2982.00	0.22	2982.00	0.22	2982.00	0.22	2982.00	0.22	2982.00	0.22	2982.00	0.22	2982.00	0.22	4358.00	0.22
20kroC100_P1	65.00	0.00	65.00	0.00	62.00	0.06	62.00	0.06	62.00	0.06	62.00	0.06	62.00	0.06	62.00	0.06	62.00	0.06	75.00	0.31
20kroC100_P2	3192.00	0.00	3192.00	0.00	3034.00	0.14	3034.00	0.14	3034.00	0.14	3034.00	0.14	3034.00	0.14	3034.00	0.14	3034.00	0.14	4294.00	0.27

Çizelge 5 (devam). $\omega=0.6$ için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C			
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap		
29pr144_P1	90.00	0.13	89.00	0.16	89.00	0.12	80.00	0.50	89.00	0.12	80.00	0.50	89.00	0.12	80.00	0.50	10.00	0.00	10.00	0.00
29pr144_P2	4542.00	0.18	3489.00	0.62	4328.00	0.24	3939.00	0.54	4328.00	0.24	3939.00	0.54	4328.00	0.24	3939.00	0.54	569.00	0.00	569.00	0.00
30ch150_P1	95.00	0.00	87.00	0.15	91.00	0.05	88.00	0.11	91.00	0.05	88.00	0.11	91.00	0.05	88.00	0.11	12.00	0.00	12.00	0.00
30ch150_P2	5062.00	0.00	4932.00	0.08	5062.00	0.00	5062.00	0.04	5062.00	0.00	5062.00	0.04	5062.00	0.00	5062.00	0.04	696.00	0.00	696.00	0.00
30kroA150_P1	95.00	0.00	89.00	0.16	95.00	0.00	95.00	0.02	95.00	0.00	95.00	0.02	95.00	0.00	95.00	0.02	11.00	0.00	11.00	0.00
30kroA150_P2	4660.00	0.14	3475.00	0.59	4740.00	0.09	4394.00	0.19	4740.00	0.09	4394.00	0.19	4740.00	0.09	4394.00	0.19	601.00	0.00	601.00	0.00
30kroB150_P1	96.00	0.07	42.00	1.64	98.00	0.04	91.00	0.13	98.00	0.04	91.00	0.13	98.00	0.04	91.00	0.13	14.00	0.00	14.00	0.00
30kroB150_P2	4969.00	0.13	4771.00	0.20	5009.00	0.06	4515.00	0.21	5009.00	0.06	4515.00	0.21	5009.00	0.06	4515.00	0.21	784.00	0.00	784.00	0.00
31pr152_P1	70.00	0.60	64.00	0.83	72.00	0.64	81.00	0.59	72.00	0.64	81.00	0.59	72.00	0.64	81.00	0.59	11.00	0.00	11.00	0.00
31pr152_P2	4705.00	0.21	4175.00	0.42	4732.00	0.28	4235.00	0.55	4732.00	0.28	4235.00	0.55	4732.00	0.28	4235.00	0.55	608.00	0.00	608.00	0.00
32u159_P1	106.00	0.05	99.00	0.15	89.00	0.26	96.00	0.18	89.00	0.26	96.00	0.18	89.00	0.26	96.00	0.18	17.00	0.00	17.00	0.00
32u159_P2	5479.00	0.08	4156.00	0.46	5479.00	0.07	4812.00	0.22	5479.00	0.07	4812.00	0.22	5479.00	0.07	4812.00	0.22	914.00	0.00	914.00	0.00
35si175_P1	105.00	0.04	103.00	0.06	103.00	0.05	104.00	0.05	103.00	0.05	104.00	0.05	103.00	0.05	104.00	0.05	18.00	0.00	18.00	0.00
35si175_P2	5472.00	0.12	4899.00	0.29	5707.00	0.02	5295.00	0.12	5707.00	0.02	5295.00	0.12	5707.00	0.02	5295.00	0.12	960.00	0.00	960.00	0.00
36brg180_P1	178.00	0.00	178.00	0.00	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	178.00	0.01	18.00	0.00	18.00	0.00
36brg180_P2	9035.00	0.00	9035.00	0.00	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	9035.00	0.01	860.00	0.00	860.00	0.00
39rat195_P1	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	15.00	0.00	15.00	0.00
39rat195_P2	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	750.00	0.00	750.00	0.00
3burma14_P1	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00
3burma14_P2	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	509.00	0.00	1028.00	0.00	1028.00	0.00
40d198_P1	112.00	0.41	115.00	0.37	128.00	0.27	110.00	0.52	128.00	0.27	110.00	0.52	128.00	0.27	110.00	0.52	21.00	0.00	21.00	0.00
40d198_P2	6738.00	0.21	4452.00	0.84	7120.00	0.16	5636.00	0.52	7120.00	0.16	5636.00	0.52	7120.00	0.16	5636.00	0.52	1109.00	0.00	1109.00	0.00
40kroa200_P1	128.00	0.09	122.00	0.16	127.00	0.08	121.00	0.13	127.00	0.08	121.00	0.13	127.00	0.08	121.00	0.13	24.00	0.00	24.00	0.00
40kroa200_P2	6449.00	0.11	5816.00	0.28	6651.00	0.06	5347.00	0.33	6651.00	0.06	5347.00	0.33	6651.00	0.06	5347.00	0.33	1326.00	0.00	1326.00	0.00
40krob200_P1	120.00	0.15	110.00	0.28	100.00	0.35	119.00	0.13	100.00	0.35	119.00	0.13	100.00	0.35	119.00	0.13	30.00	0.00	30.00	0.00
40krob200_P2	6259.00	0.20	5488.00	0.51	6789.00	0.08	6259.00	0.19	6789.00	0.08	6259.00	0.19	6789.00	0.08	6259.00	0.19	1594.00	0.00	1594.00	0.00

Çizelge 6. $\omega=0.4$ için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar (FN-N formülasyonu Derya ve ark. (2023) çalışmasında yer alan modeldir.)

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C	
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap
10att48_P1	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00
10att49_P2	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.02	1001.00	0.00	1001.00	0.00	1001.00	0.00	2231.00	0.00	2231.00	0.00
10gr48_P1	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	21.00	0.00	45.00	0.00	43.00	0.07
10gr48_P2	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1213.00	0.00	1959.00	0.21	1932.00	0.32
10hk48_P1	19.00	0.00	19.00	0.00	19.00	0.00	19.00	0.00	19.00	0.00	19.00	0.00	19.00	0.00	42.00	0.00	37.00	0.22
10hk48_P2	986.00	0.00	986.00	0.00	986.00	0.00	986.00	0.00	986.00	0.00	986.00	0.00	986.00	0.00	2210.00	0.06	2210.00	0.09
11berlin52_P1	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	30.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.14
11berlin52_P2	1447.00	0.00	1447.00	0.00	1447.00	0.00	1447.00	0.00	1447.00	0.00	1447.00	0.00	1447.00	0.00	2367.00	0.11	2367.00	0.13
11eil51_P1	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	49.00	0.00	49.00	0.00
11eil51_P2	1064.00	0.00	1064.00	0.00	1064.00	0.00	1064.00	0.00	1064.00	0.00	1064.00	0.00	1064.00	0.00	2488.00	0.00	2488.00	0.00
12brazil58_P1	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.19	34.00	0.00	34.00	0.00	34.00	0.00	47.00	0.11	40.00	0.38
12brazil58_P2	1697.00	0.00	1697.00	0.00	1697.00	0.00	1697.00	0.50	1697.00	0.00	1697.00	0.00	1697.00	0.00	2151.00	0.44	2047.00	0.44
14st70_P1	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	31.00	0.00	41.00	0.34	41.00	0.49
14st70_P2	1490.00	0.00	1490.00	0.00	1490.00	0.00	1490.00	0.00	1490.00	0.00	1490.00	0.00	1490.00	0.00	2123.00	0.39	2123.00	0.50
16eil76_P1	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	32.00	0.00	53.00	0.11	50.00	0.12
16eil76_P2	1892.00	0.00	1892.00	0.00	1892.00	0.00	1892.00	0.03	1892.00	0.00	1892.00	0.00	1892.00	0.00	2519.00	0.30	2815.00	0.04
16pr76_P1	36.00	0.00	36.00	0.00	36.00	0.00	36.00	0.18	36.00	0.00	36.00	0.00	36.00	0.00	60.00	0.07	59.00	0.14
16pr76_P2	1787.00	0.00	1750.00	0.22	1750.00	0.17	1750.00	0.24	1750.00	0.14	1750.00	0.14	1750.00	0.14	2011.00	0.82	2676.00	0.37
20gr96_P1	44.00	0.00	44.00	0.00	44.00	0.00	44.00	0.02	44.00	0.00	44.00	0.00	44.00	0.00	85.00	0.05	80.00	0.10
20gr96_P2	2314.00	0.00	2314.00	0.06	2314.00	0.00	2314.00	0.05	2314.00	0.00	2314.00	0.00	2314.00	0.00	3752.00	0.25	4022.00	0.10
20kroA100_P1	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	42.00	0.00	55.00	0.11	57.00	0.00
20kroA100_P2	1989.00	0.00	1788.00	0.22	1989.00	0.00	1725.00	0.30	1989.00	0.00	1725.00	0.00	1989.00	0.00	2970.00	0.17	3170.00	0.04
20kroB100_P1	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00	58.00	0.12	56.00	0.27
20kroB100_P2	2229.00	0.07	2193.00	0.18	2229.00	0.00	2158.00	0.20	2229.00	0.00	2158.00	0.20	2229.00	0.00	2727.00	0.40	2866.00	0.29
20kroC100_P1	40.00	0.00	40.00	0.00	40.00	0.00	40.00	0.38	40.00	0.00	40.00	0.00	40.00	0.00	48.00	0.31	47.00	0.40
20kroC100_P2	2048.00	0.00	1700.00	0.40	2048.00	0.04	1671.00	0.42	2048.00	0.04	1671.00	0.31	2048.00	0.04	2736.00	0.40	2543.00	0.48

Çizelge 6 (devam). $\omega=0.4$ için Tüm Formülasyonlara ait Sonuçlar

Problem	FC-C		FN-N		NC-C		NN-N		NC-C		NN-N		NC-C		FN-N		FC-C		
	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	Eniyi	%Gap	
29pr144_P1	56.00	0.34	58.00	0.22	58.00	0.19	43.00	1.12	4br17_P1	7.00	0.00	7.00	0.00	7.00	0.00	7.00	0.00	7.00	0.00
29pr144_P2	2690.00	0.53	2590.00	0.57	2632.00	0.44	2510.00	0.92	4br17_P2	372.00	0.00	372.00	0.00	372.00	0.00	372.00	0.00	372.00	0.00
30ch150_P1	65.00	0.00	56.00	0.25	65.00	0.00	55.00	0.24	4gr17_P1	9.00	0.00	9.00	0.00	9.00	0.00	9.00	0.00	9.00	0.00
30ch150_P2	3493.00	0.01	3453.00	0.09	3114.00	0.18	3133.00	0.22	4gr17_P2	476.00	0.00	476.00	0.00	476.00	0.00	476.00	0.00	476.00	0.00
30kroA150_P1	59.00	0.15	49.00	0.45	62.00	0.00	60.00	0.10	4ulysses16_P1	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00
30kroA150_P2	2972.00	0.25	2898.00	0.33	2830.00	0.27	2874.00	0.25	4ulysses16_P2	343.00	0.00	343.00	0.00	343.00	0.00	343.00	0.00	343.00	0.00
30kroB150_P1	60.00	0.17	49.00	0.55	58.00	0.19	56.00	0.29	5gr21_P1	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00
30kroB150_P2	2760.00	0.49	2307.00	0.79	2692.00	0.38	3216.00	0.19	5gr21_P2	552.00	0.00	552.00	0.00	552.00	0.00	552.00	0.00	552.00	0.00
31pr152_P1	48.00	0.63	44.00	0.82	44.00	0.91	42.00	1.21	5gr24_P1	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00
31pr152_P2	1951.00	1.31	1862.00	1.37	2408.00	0.82	2129.00	1.25	5gr24_P2	347.00	0.00	347.00	0.00	347.00	0.00	347.00	0.00	347.00	0.00
32u159_P1	60.00	0.37	61.00	0.34	64.00	0.22	56.00	0.46	5ulysses22_P1	11.00	0.00	11.00	0.00	11.00	0.00	11.00	0.00	11.00	0.00
32u159_P2	3403.00	0.33	2085.00	1.21	3209.00	0.30	2665.00	0.63	5ulysses22_P2	602.00	0.00	602.00	0.00	602.00	0.00	602.00	0.00	602.00	0.00
35si175_P1	71.00	0.03	67.00	0.10	71.00	0.03	68.00	0.09	6bayg29_P1	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00
35si175_P2	3573.00	0.23	3355.00	0.38	3733.00	0.07	3572.00	0.14	6bayg29_P2	514.00	0.00	514.00	0.00	514.00	0.00	514.00	0.00	514.00	0.00
36brg180_P1	178.00	0.00	178.00	0.00	178.00	0.01	178.00	0.01	6bays29_P1	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00
36brg180_P2	9035.00	0.00	9035.00	0.00	9035.00	0.01	9035.00	0.01	6bays29_P2	446.00	0.00	446.00	0.00	446.00	0.00	446.00	0.00	446.00	0.00
39rat195_P1	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	194.00	0.00	6fri26_P1	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00
39rat195_P2	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	9863.00	0.00	6fri26_P2	408.00	0.00	408.00	0.00	408.00	0.00	408.00	0.00	408.00	0.00
3burma14_P1	4.00	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00	7ftv33_P1	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00
3burma14_P2	162.00	0.00	162.00	0.00	162.00	0.00	162.00	0.00	7ftv33_P2	881.00	0.00	881.00	0.00	881.00	0.00	881.00	0.00	881.00	0.00
40d198_P1	69.00	0.51	60.00	0.80	73.00	0.47	62.00	0.77	8ftv36_P1	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00	16.00	0.00
40d198_P2	3373.00	0.66	3514.00	0.65	3272.00	0.71	3004.00	0.90	8ftv36_P2	807.00	0.00	807.00	0.00	807.00	0.00	807.00	0.00	807.00	0.00
40kroa200_P1	85.00	0.15	75.00	0.35	87.00	0.06	87.00	0.09	8ftv38_P1	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00	18.00	0.00
40kroa200_P2	4082.00	0.27	3957.00	0.37	4212.00	0.17	3649.00	0.40	8ftv38_P2	982.00	0.00	982.00	0.00	982.00	0.00	982.00	0.00	982.00	0.00
40kroB200_P1	83.00	0.19	43.00	1.33	85.00	0.07	72.00	0.31	9dantzig42_P1	17.00	0.00	17.00	0.00	17.00	0.00	17.00	0.00	17.00	0.06
40kroB200_P2	4391.00	0.20	3747.00	0.53	4705.00	0.06	3595.00	0.48	9dantzig42_P2	943.00	0.00	943.00	0.00	943.00	0.00	943.00	0.00	943.00	0.00

Çizelge 7. 10att48 ve 16eil76 problemlerinin farklı ω değerlerine göre çözümleri

Problem	n	k	ω	P1/P2	T_{max}	Eniyi Amaç F. Değeri	Çözüm Süresi (sn.)	Salkım	Tur Süresi	Tur
10att48	48	11	T40	P1	4606	21	81	2	4534	1 36 7 28 6 37 19 27 17 43 30 20 47 13 25 14 23 11 12 40 3 22 1
10att48	48	11	T40	P2	4606	1001	7588	2	4534	1 36 7 28 6 37 19 27 17 43 30 20 47 13 25 14 23 11 12 40 3 22 1
10att48	48	11	T60	P1	6909	33	21	4	6745	1 89 15 33 46 38 31 44 18 7 36 28 6 37 19 27 17 43 30 20 47 13 25 14 23 11 12 40 22 3 34 41 16 1
10att48	48	11	T60	P2	6909	1666	99	4	6848	1 89 15 33 46 38 31 44 18 7 36 28 6 37 19 27 17 43 30 20 47 13 25 14 23 11 12 40 22 3 34 41 16 1
10att48	48	11	T80	P1	9212	40	40	6	9191	1 89 38 15 33 46 31 44 18 28 6 37 19 27 17 43 30 20 47 13 25 14 23 11 12 40 22 3 34 41 16 1 5 42 29 34 41 16 1
10att48	48	11	T80	P2	9212	2029	224	6	9157	1 16 41 34 29 42 5 48 32 39 21 47 13 25 14 23 3 22 40 11 12 20 36 30 43 17 27 19 37 6 28 7 18 44 31 38 46 33 15 9 8 1
10att48	48	11	T100	P1	11516	47	123	10	11516	1 89 15 33 46 38 31 44 18 7 28 6 37 19 27 17 43 30 36 20 47 11 12 40 22 3 23 14 25 13 21 39 32 24 10 45 35 4 26 2 42 48 5 29 34 41 16 1
10att48	48	11	T100	P2	11516	2422	182	10	11516	1 89 15 33 46 38 31 44 18 7 28 6 37 19 27 17 43 30 36 20 47 11 12 40 22 3 23 14 25 13 21 39 32 24 10 45 35 4 26 2 42 48 5 29 34 41 16 1
16eil76	76	17	T40	P1	234	32	417	5	228	1 43 22 62 73 33 63 16 49 24 18 50 3 44 32 9 39 40 12 26 17 51 6 68 75 76 67 46 34 4 45 30 2 1
16eil76	76	17	T40	P2	234	1892	989	5	230	1 63 33 73 62 22 43 41 56 23 24 49 16 40 39 12 26 17 51 6 68 75 76 67 46 34 4 45 30 2 1
16eil76	76	17	T60	P1	352	48	1265	8	351	1 23 56 41 43 63 33 73 62 22 61 28 74 48 21 47 36 69 71 60 70 20 37 5 29 15 57 27 52 13 54 19 14 53 35 7 8 46 34 67 76 75 4 45 30 2 68 6 51 1
16eil76	76	17	T60	P2	352	2670	5360	8	351	1 23 56 41 43 62 73 33 63 16 49 24 18 50 44 3 32 9 39 40 17 26 12 72 58 31 10 38 53 14 35 7 8 46 34 67 76 75 4 45 30 2 68 6 51 1
16eil76	76	17	T80	P1	469	64	78	12	468	1 23 56 41 42 64 61 28 74 48 47 21 69 36 71 60 70 20 37 5 29 15 57 27 52 13 54 19 14 53 7 35 8 46 34 67 76 75 4 45 30 2 68 6 51 17 26 12 40 39 9 32 3 44 50 18 24 49 16 63 33 73 62 22 43 1
16eil76	76	17	T80	P2	469	3309	2299	11	467	1 28 61 21 69 36 47 48 74 2 30 45 4 75 68 6 51 76 67 34 46 52 13 54 19 8 35 7 53 14 11 66 65 38 31 10 58 72 39 40 12 26 17 3 44 32 9 50 18 24 49 16 63 33 73 62 22 43 41 56 23 1
16eil76	76	17	T100	P1	587	75	286	16	587	1 43 22 62 73 33 63 16 49 24 23 56 41 42 64 61 28 74 21 48 47 36 69 71 60 70 20 37 5 29 15 57 27 52 13 54 19 8 35 7 53 14 59 11 66 65 38 10 58 72 31 25 55 18 50 3 44 32 9 39 40 12 26 17 51 6 68 75 76 67 46 34 4 45 30 2 1
16eil76	76	17	T100	P2	587	3800	770	16	587	1 20 45 4 34 46 67 76 75 68 6 51 17 26 12 40 39 9 32 44 3 50 18 55 25 31 72 58 10 38 65 66 11 59 14 53 7 35 8 19 54 13 52 27 57 15 29 5 37 20 70 60 71 36 69 21 47 48 74 28 61 64 42 41 56 23 24 49 16 63 33 73 62 22 43 1

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar1: Metodoloji, fikir sahibi, araştırma

Yazar2: Kaynaklar, yazma, biçimsel analiz, görselleştirme

Yazar3: Deneysel, kaynaklar, yazma, biçimsel analiz, görselleştirme

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

Veri kümeleri istek üzerine mevcuttur. Bu makalenin sonuçlarını destekleyen ham veriler, yazarlar tarafından herhangi bir çekince olmaksızın sunulacaktır.

6. Kaynaklar

- Angelelli, E., Archetti, C., and Vindigni, M., 2014. The clustered orienteering problem. *European Journal of Operational Research*, **238(2)**, 404-414.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.006>
- Anily, S., Bramel, J., and Hertz, A., 1999. A 53-approximation algorithm for the clustered traveling salesman tour and path problems. *Operations Research Letters*, **24(1-2)**, 29-35.
[https://doi.org/10.1016/S0167-6377\(98\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6377(98)00046-7)
- Archetti, C., Bianchessi, N., and Speranza, M. G., 2013. Optimal solutions for routing problems with profits. *Discrete Applied Mathematics*, **161(4)**, 547-557.
<https://doi.org/10.1016/j.dam.2011.12.021>
- Archetti, C., Carrabs, F., and Cerulli, R., 2018. The set orienteering problem. *European Journal of Operational Research*, **267(1)**, 264-272.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.009>
- Arkin, E. M., Hassin, R., and Klein, L., 1997. Restricted delivery problems on a network. *Networks: An International Journal*, **29(4)**, 205-216.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0037\(199707\)29:4<205::AID-NET3>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0037(199707)29:4<205::AID-NET3>3.0.CO;2-J)
- Balas, E., 1989. The prize collecting traveling salesman problem. *Networks*, **19(6)**, 621-636.
<https://doi.org/10.1002/net.3230190602>
- Bao, X., and Liu, Z., 2012. An improved approximation algorithm for the clustered traveling salesman problem. *Information Processing Letters*, **112(23)**, 908-910.
<https://doi.org/10.1016/j.ipl.2012.08.020>
- Carrabs, F., 2021. A biased random-key genetic algorithm for the set orienteering problem. *European Journal of Operational Research*, **292(3)**, 830-854.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.11.043>
- Chisman, J. A., 1975. The clustered traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*, **2(2)**, 115-119.
[https://doi.org/10.1016/0305-0548\(75\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0305-0548(75)90015-5)
- Dell'Amico, M., Maffioli, F., and Värbrand, P., 1995. On prize collecting tours and the asymmetric travelling salesman problem. *International Transactions in Operational Research*, **2(3)**, 297-308.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.1995.tb00023.x>
- Derya, T., Dinler, E., and Keçeci, B., 2020. Selective generalized travelling salesman problem. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, **26(1)**, 80-118.
<https://doi.org/10.1080/13873954.2019.1705496>
- Derya, T., Keçeci, B., and Dinler, E., 2023. Selective clustered traveling salesman problem. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, **10(1)**, 2235266.
<https://doi.org/10.1080/23302674.2023.2235266>
- Ding, C., Cheng, Y., and He, M., 2007. Two-level genetic algorithm for clustered traveling salesman problem with application in large-scale TSPs. *Tsinghua Science & Technology*, **12(4)**, 459-465.
[https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(07\)70068-8](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(07)70068-8)
- Feillet, D., Dejax, P., and Gendreau, M., 2005. Traveling salesman problems with profits. *Transportation science*, **39(2)**, 188-205.
<https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0079>
- Fischetti, M., Salazar González, J. J., and Toth, P., 1997. A branch-and-cut algorithm for the symmetric generalized traveling salesman problem. *Operations Research*, **45(3)**, 378-394.
<https://doi.org/10.1287/opre.45.3.378>
- Gavish, B., and Graves, S. C., 1978. The travelling salesman problem and related problems. Working Paper GR-078-78, Operations Research Center, Massachusetts Institute of Technology.
- Gendreau, M., Laporte, G., and Hertz, A., 1997. An approximation algorithm for the traveling salesman problem with backhauls. *Operations Research*, **45(4)**, 639-641.
<https://doi.org/10.1287/opre.45.4.639>

- Gendreau, M., Laporte, G., and Potvin, J. Y., 1994. Heuristics for the clustered traveling salesman problem (No. CRT-94-54).
- Ghaziri, H., and Osman, I. H., 2003. A neural network algorithm for the traveling salesman problem with backhauls. *Computers & Industrial Engineering*, **44(2)**, 267-281.
[https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00179-1](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00179-1)
- Golden, B. L., Levy, L., and Vohra, R., 1987. The orienteering problem. *Naval research logistics*, **34(3)**, 307-318.
[https://doi.org/10.1002/1520-6750\(198706\)34:3<307::AID-NAV3220340302>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1520-6750(198706)34:3<307::AID-NAV3220340302>3.0.CO;2-D)
- Gunawan, A., Lau, H. C., and Vansteenwegen, P., 2016. Orienteering problem: A survey of recent variants, solution approaches and applications. *European Journal of Operational Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.059>
- Guttmann-Beck, N., Hassin, R., Khuller, S., and Raghavachari, B., 2000. Approximation algorithms with bounded performance guarantees for the clustered traveling salesman problem. *Algorithmica*, **23(4)**, 422-437.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.059>
- Jepsen, M. K., Petersen, B., Spoorendonk, S., and Pisinger, D., 2014. A branch-and-cut algorithm for the capacitated profitable tour problem. *Discrete Optimization*, **14**, 78-96.
<https://doi.org/10.1016/j.disopt.2014.08.001>
- Jongens, K., and Volgenant, T., 1985. The symmetric clustered traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, **19(1)**, 68-75.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(85\)90309-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(85)90309-1)
- Juan, A. A., Lourenço, H. R., Mateo, M., Luo, R., and Castella, Q., 2014. Using iterated local search for solving the flow-shop problem: parallelization, parametrization, and randomization issues. *International Transactions in Operational Research*, **21(1)**, 103-126.
<https://doi.org/10.1111/itor.12028>
- Laporte, G., ve Palekar, U., 2002. Some applications of the clustered travelling salesman problem. *Journal of the Operational Research Society*, **53(9)**, 972-976.
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601420>
- Laporte, G., Potvin, J. Y., and Quilleret, F., 1997. A tabu search heuristic using genetic diversification for the clustered traveling salesman problem. *Journal of Heuristics*, **2(3)**, 187-200.
<https://doi.org/10.1007/BF00127356>
- Lokin, F. C. J., 1979. Procedures for travelling salesman problems with additional constraints. *European Journal of Operational Research*, **3(2)**, 135-141.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(79\)90099-7](https://doi.org/10.1016/0377-2217(79)90099-7)
- López-Ibáñez, M., Mascia, F., Marmion, M. É., and Stützle, T., 2014, July. A template for designing single-solution hybrid metaheuristics. In *Proceedings of the Companion Publication of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation* (pp. 1423-1426).
<https://doi.org/10.1145/2598394.2609846>
- Mestria, M., Ochi, L. S., and de Lima Martins, S., 2013. GRASP with path relinking for the symmetric euclidean clustered traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*, **40(12)**, 3218-3229.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.10.001>
- Mestria, M., 2016. A hybrid heuristic algorithm for the clustered traveling salesman problem. *Pesquisa Operacional*, **36(1)**, 113-132.
<https://doi.org/10.1590/0101-7438.2016.036.01.0113>
- Mestria, M., 2018. New hybrid heuristic algorithm for the clustered traveling salesman problem. *Computers & Industrial Engineering*, **116**, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.018>
- Miller, C. E., Tucker, A. W., and Zemlin, R. A., 1960. Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM*, **7(4)**, 326-329.
<https://doi.org/10.1145/321043.321046>
- Pedro, O., Saldanha, R., and Camargo, R., 2013. A tabu search approach for the prize collecting traveling salesman problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, **41**, 261-268.
<https://doi.org/10.1016/j.endm.2013.05.101>
- Pěnička, R., Faigl, J., ve Saska, M., 2019. Variable neighborhood search for the set orienteering problem and its application to other orienteering problem variants. *European Journal of Operational Research*, **276(3)**, 816-825.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.047>

- Potvin, J. Y., and Guertin, F., 1996. The clustered traveling salesman problem: A genetic approach. *In Meta-Heuristics* (pp. 619-631). Springer, Boston, MA.
https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1361-8_37
- Souffriau, W., Vansteenwegen, P., Vertommen, J., Berghe, G. V., and Oudheusden, D. V., 2008. A personalized tourist trip design algorithm for mobile tourist guides. *Applied Artificial Intelligence*, **22(10)**, 964-985.
<https://doi.org/10.1080/08839510802379626>
- Thomadsen, T., and Stidsen, T. K., 2003. The quadratic selective travelling salesman problem. *Informatics and Mathematical Modelling Technical Report 2003-17*, Technical University of Denmark.
- Tsiligrirides, T., 1984. Heuristic methods applied to orienteering. *Journal of the Operational Research Society*, **35(9)**, 797-809.
<https://doi.org/10.1057/jors.1984.162>
- Vansteenwegen, P., Souffriau, W., and Van Oudheusden, D., 2011. The orienteering problem: A survey. *European Journal of Operational Research*, **209(1)**, 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.03.045>
- Vansteenwegen, P., and Van Oudheusden, D., 2007. The mobile tourist guide: an OR opportunity. *OR insight*, **20(3)**, 21-27.
<https://doi.org/10.1057/ori.2007.17>
- Verbeeck, C., Aghezzaf, E. H., and Vansteenwegen, P., 2016. Solving the stochastic time-dependent orienteering problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, **255**, 699-718.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.05.031>
- Weintraub, A., Aboud, J., Fernandez, C., Laporte, G., and Ramirez, E., 1999. An emergency vehicle dispatching system for an electric utility in Chile. *Journal of the Operational Research Society*, **50(7)**, 690-696.
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600746>
- Yahiaoui, A. E., Moukrim, A., and Serairi, M., 2017. Hybrid heuristic for the clustered orienteering problem. *In Computational Logistics: 8th International Conference, ICCL 2017, Southampton, UK, October 18-20, 2017, Proceedings 8* (pp. 19-33). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-68496-3_2
- Zhang, W., Wang, K., Wang, S., and Laporte, G., 2020. Clustered coverage orienteering problem of unmanned surface vehicles for water sampling. *Naval Research Logistics*, **67(5)**, 353-367.
<https://doi.org/10.1002/nav.21906>

Toplu Beslenme Yerlerinde Optimal Menü Planlaması: Matematiksel Model Yaklaşımı

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 01.10.2023

Kabul/Accepted: 06.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Optimal Menu Planning in Mass Feeding Places: A Mathematical Model Approach

Gökhan ALTIN¹, Ahmet Bahadır ŞİMŞEK^{2*}

¹Gümüşhane Üniversitesi, Sağlık, Kültür ve Spor Daire Başkanlığı, Gümüşhane, Türkiye

²Gümüşhane Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Sağlık Yönetimi Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

**Bu çalışma Dr. Öğretim Üyesi Ahmet Bahadır ŞİMŞEK danışmanlığında Gökhan ALTIN tarafından Haziran 2023 tarihinde tamamlanan "Bir yükseköğretim kurumunda sağlıklı menü planlama" başlıklı ve 812396 tez no'lu yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu çalışma, toplu beslenme ortamlarında (örneğin, eğitim kurumları ve sağlık tesisleri) menü planlamasını iyileştirmeyi amaçlayan bir matematiksel model geliştirmeyi hedeflemektedir. Çalışma, bir yükseköğretim kurumunun öğrencileri ve personeli için öğle yemeği menülerini ele almaktadır. Geliştirilen model, maliyet odaklı, beğeni odaklı veya bu iki faktörü dengeleyen politikalara uygun menüler oluşturabilme yeteneği sunar. Ayrıca, menü çeşitliliğini artırmak ve mevsimsel kısıtlamaları dikkate almak için hafıza özelliklerini içerir. Bu çalışmanın katkıları, çok sayıda kuruma uyarlanabilen bir model sunma, menü planlama literatürüne yeni kısıtlar ekleyerek teorik bilgiyi pratik uygulamaya dönüştürme, maliyet ve lezzet odaklı politikaları bir araya getirebilen bir matematiksel model sunma, ve öznel değerlendirmenin objektif bir şekilde yapılabileceği bir araç sunma yönündedir. Bu çalışma toplu beslenme alanında karar vericilere yardımcı olacak bir menü planlama modeli sunarak daha sağlıklı ve dengeli beslenmeyi teşvik etmeyi ve toplum sağlığını iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Toplu beslenme; Menü planlama; Matematiksel programlama; Maliyet ve beğeni dengesi; Sağlıklı beslenme.

Abstract

This study aims to develop a mathematical model that aims to improve menu planning in mass feeding environments (e.g., educational institutions and healthcare facilities). The study considers lunch menus for students and staff of a higher education institution. The developed model offers the ability to create menus in accordance with the policies that are cost-, taste-oriented, or balancing these two factors. It also includes memory properties to increase menu diversity and take into account seasonal constraints. The contributions of this study are to provide a model that can be adapted to many organizations, to translate theoretical knowledge into practical application by adding new constraints to the menu planning literature, to provide a mathematical model that can combine cost- and taste-oriented policies, and to provide a tool for objective subjective evaluation. This study aims to promote healthier and balanced diets and improve public health by providing a menu planning model to assist decision makers in the field of public nutrition.

Keywords: Mass nutrition; Menu planning; Mathematical programming; Cost and taste balance; Healthy nourishment.

1. Giriş

Dengeli beslenme, vücudun ihtiyaç duyduğu protein, karbonhidrat, yağ, vitamin, mineral gibi temel besin öğelerinin doğru oranlarda alınmasını aynı zamanda işlenmiş gıdalardan, trans yağlardan, aşırı tuz ve şekerden kaçınılması kapsar (Price, 2005). Günlük hayatın yoğunluğu ve stresi dengesiz beslenmeyi tetiklemektedir (Leow et al., 2021). Bireylerin dengeli beslenmelerini sürdürülebilir kılmak için okul, üniversite, hastane, iş yerleri gibi ortak yaşam alanlarında toplu beslenme etkili bir çözüm olarak kullanılmaktadır (Sezgin & Özkaya, 2014). Toplu beslenme; ölçek ekonomisinden yararlandığı için maliyet, birçok kişiye aynı anda yiyecek sunabildiği için kolaylık, yiyecek arama ve hazırlık sürecini ortadan kaldırdığı için verimlilik, yiyeceklerin hijyenik

koşullarda hazırlanması, saklanması ve sunulması nedeniyle gıda güvenliği, porsiyonların besin değerlerinin kontrol edilebildiği için dengeli beslenme gibi avantajları nedeniyle caziptir. Avantajlarının yanında bütçe ve işçiliğe bağlı olarak besin kalitesinin düşük olabilmesi, fiziki olanakların paylaşılmasından kaynaklanan bulaşıcı hastalık riski, yemek seçme özgürlüğünün olmaması, kişisel tercihlerin dikkate alınmaması, besin alerjisi veya özel diyet ihtiyaçlarının karşılanamaması gibi dezavantajlar barındırdığı bir gerçektir. Bireysel beslenmeye göre güçlü avantajları karşısında yönetilebilir dezavantajları toplu beslenmeyi toplu yaşam alanlarında etkin bir beslenme yöntemi olarak tercih edilmesini ve toplum sağlığını düzenlemeye yönelik bir enstrüman olarak kullanılmasını motive etmektedir.

Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı tarafından yürütülen Sağlıklı Beslenme ve Hareketli Hayat Programı Eylem Planının “B. Sağlıklı beslenme çevreleri oluşturulması, Tüm kamu ve özel kurumlarda (Eğitim kurumları, iş yerleri vb.) sağlıklı beslenmenin geliştirilmesi” başlığı politika yapıcılarının toplu beslenme aracılığı ile sağlıklı toplum inşa etme çabasını temsil eder (Türkiye Halk Sağlığı Kurumu, 2013). Eylem planı kapsamında yayınlanan “Toplu Beslenme Sistemleri (Toplu Tüketim Yerleri) İçin Ulusal Menü Planlama ve Uygulama Rehberi” (Buradan sonra Rehber olarak adlandırılmaktadır.) kuruluşların toplu beslenme yönetim sürecine rehberlik etmektedir (T.C. Sağlık Bakanlığı Halk Sağlığı Genel Müdürlüğü, 2020). Rehber uygulayıcılara satın alma ve depolama sürecinden üretim, atık yönetimi ve gıda güvenliğinin sağlanmasına kadar toplu beslenmenin tüm süreçlerindeki uygulama esaslarını belirtmektedir. Aynı zamanda okul, işyeri, cezaevi, huzurevi, hastane gibi çeşitli kurumlarda verilecek toplu beslenme hizmetine ilişkin porsiyon başına besin değerleri, yemeklerin aylık asgari/azami sıklıkları gibi operasyonel detaylarını ve dört haftalık menü planlama örneği sunmaktadır.

Toplu beslenme menü planının hazırlanmasında kurum, hizmet sağlayıcı ve yararlanıcı olmak üzere üç ana paydaş aktif rol oynamaktadır. Kurumun politikaları doğrultusunda yararlanıcıların ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde planlanan menüler hizmet sağlayıcı tarafından servis edilir. Paydaşlar arasındaki ilişkiler şöyle izah edilebilir. Hizmet sağlayıcı açısından menüdeki yemeklerin düşük maliyetli ve kolay yapılabilir olması önemli iken yararlanıcı açısından yemeklerin kaliteli ve düşük maliyetli olması ön plandadır. Kurum açısından ise menülerin yararlanıcının günlük besin ihtiyacını karşılanmasının yanı sıra beğenilmesi ve düşük maliyetli olması kritiktir. Ancak beğenilen kaliteli yemeklerin çoğunlukla yüksek maliyetli olması ve sebze ağırlıklı sağlıklı yemeklerin tercih edilmiyor olması paydaşlar arasında çıkar çatışmasına neden olmaktadır. Rehber paydaşlar arasındaki çıkar çatışmasının dengelenerek menü planının nasıl oluşturulabileceğine yönelik sistematik yaklaşım sunmamaktadır. Menü planı hazırlama süreci analitik yöntemlerle karar vericiyi destekleyen yöneylem araştırması kapsamında toplu beslenme menü planlama problemi olarak tanımlanarak bu eksiklik giderilebilir.

Toplu beslenme menü planlama problemi belli bir planlama döneminde hangi gün hangi yemeklerin servis edileceği kararını besin değerleri, uyum, maliyet gibi çeşitli yan kısıtların dahil edilerek belirlenmesini kapsamaktadır (Kallel et al., 2022). Problemin paydaşları tatmin edecek şekilde optimal olarak çözülebilmesi

sağlıklı ve dengeli beslenmenin sağlanması ve toplum sağlığının korunması açısından büyük bir önem taşımaktadır. Menülerin planlanmasından sorumlu olan karar vericilerin bahsedilen çıkarları dengeleyen optimal bir menü planını bilgisayar desteği olmadan kısa sürede hazırlamaları mümkün değildir. Bu çalışmada Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığının yayınladığı uygulama rehberi çerçevesinde belirlenen besin değerine sahip menülerin maliyet ve beğeni odaklı politikalar benimsenerek bilgisayar yardımıyla hazırlanabilirliği araştırılmaktadır.

Çalışma kapsamında bir yükseköğretim kurumunun öğrencileri ve personeli için sunduğu öğle yemeğinin aylık menü planı ele alınmaktadır. Kurumun ihale şartnamesi çerçevesinde tanımlanan problemin çözümü için çok amaçlı karma tam sayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen modelin yenilikçi özellikleri şöyle sıralanabilir. i) Model maliyet odaklı, beğeni odaklı veya maliyet ve beğeni arasında denge gözeterek menüler oluşturabilmektedir. Bu özellik karar vericinin farklı zaman dilimlerinde farklı politikalar benimseyerek paydaşların çıkarlarını dengelemesine izin vermektedir. Örneğin öğrencilerin yoğun olarak yemekhane hizmetlerinden yararlandığı ve beğenilen yemeklerin planlanmasının öğrencilerin motivasyonları üzerinde olumlu etki yaratacağı sınav dönemlerinde beğeni odaklı bir menünün hazırlanması veya eğitim-öğretimin ilk haftası veya sınavları takip eden haftalar gibi öğrencilerin yemekhane hizmetinden nispeten az yararlandığı dönemlerde maliyet odaklı menü hazırlanması gibi. ii) Modelin bir diğer yeniliği hafıza özelliğine sahip olmasıdır. Yemek çeşitliliğini sağlamak ve sabit bir menü oluşmasını engellemek amacıyla model yemeklerin geçmiş dönemlerde menülerde yer alma sayısını dikkate almakta ve ilgili planlama döneminde menüde yer almamış yemekleri planlayabilmektedir. iii) Bir başka özellik ise mevsimin menü planı üzerine etkisini dikkate alabilmesidir. Şartname listesinde olmasına rağmen ilgili mevsimde temin edilmesi veya hazırlanması mümkün olmayan yemekler pasif hale getirilebilmektedir. Bu özellik aylık menü planı yayınlandıktan sonra güncelleme yapma gereksinimini ve/veya ilan edilen menü ile servis edilen menünün farklı olmasından kaynaklanan sorunların önüne geçebilmesini sağlar.

Çalışmanın literatüre ve pratik uygulamaya katkıları şöyle sıralanabilir. i) Gerçek bir menü planlama problemi ele alınarak teorik bilginin pratiğe dönüştürülmesine katkı sağlamaktadır. Önerilen model parametre değişikliği ile toplu beslenmenin uygulandığı farklı kurumların karar ortamlarına kolaylıkla adapte edilebilme potansiyeline sahiptir. ii) Toplu beslenme menü planlama çalışmalarına

ilham verici vaka analizi örneği niteliğindedir. Matematiksel modelde dikkate alınan yeni kısıtlar menü planlama literatürünü zenginleştirmektedir. iii) Karar vericinin maliyet ve beğeni odaklı politikalar benimsemesine olanak tanıyan matematiksel model önermektedir. Bilindiği kadarıyla bu özellik literatürde ilk defa bu çalışmada sunulmaktadır. iv) Öznel değerlendirmenin ön planda olduğu menü planlama problemini yönetim bilimi araçları kullanılarak çözülmesini sağlayarak karar vericilerin objektif bir şekilde amaca uygun optimal menülerin hazırladığından emin olunmasını sağlar.

Çalışmanın devamı şöyle organize edilmiştir. Bölüm 2'de ilgili çalışmalara yer verilmektedir. Problemin tanımı ve formülasyonu Bölüm 3'te sunulmuştur. Bölüm 4 önerilen modelin testi ve duyarlılık analizi bulgularına yer vermektedir. Sonuç ve öneriler Bölüm 5'te bahsedilmektedir.

2. İlgili Çalışmalar

Menü planlama ile ilgili literatür iki daldan ilerlemektedir (Kallel et al., 2022). Birincisi sağlık ve beslenme alanında bireylerin hastalık gibi özel durumlarına özgü diyet planlama olarak adlandırılan versiyonudur. İkincisi ise toplu beslenme çerçevesinde belirli bir planlama periyodunda çeşitli kısıtları dikkate alarak menülerin hazırlanmasını kapsayan menü planlama problemidir. Çalışma kapsamında problemin temel dinamiklerinin ve diğer araştırmacıların yaklaşımlarını ortaya koyabilmek adına her iki daldan güncel çalışmalara yer verilmektedir.

Diyet planlama kapsamındaki bazı çalışmalar şöyle özetlenebilir. Tee ve Sufahani (2022) meme kanseri hastaları için 7 günlük vejetaryen menü geliştirmeye çalışmışlardır. Ele alınan problem tam sayılı matematiksel programlama yöntemiyle modellenmiş ve AMPL çözücüsüyle çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar meme kanseri hastaları için vejetaryen menülerin matematiksel modelleme yaklaşımıyla doğru ve pratik bir şekilde hazırlanabileceğini göstermiştir. Jamaludin ve Sufahani (2022) felçli hastalar için Malezya besin alım önerilerini dikkate alarak minimum maliyetle yeterli beslenmeyi sağlayacak menü planlama problemini ele almıştır. Araştırmanın özellikle Malezyalıların felçli hastaları için besin ve menü sorununun çözümünde katkı sağlayabileceği gibi, sağlıklı bir yaşam tarzını uygulamaları için de bir rehber olabileceği vurgulanmıştır. Hui vd (2021) yüksek tansiyon hastaları için beslenme gereksinimlerinin karşılanmasının yanı sıra menü maliyetini minimize edecek menü planını karma tam sayılı matematiksel modelleme yaklaşımıyla oluşturmaya çalışmışlardır. 10

çeşit gıda grubunda toplam 413 çeşit yemek arasından optimal menülerin belirlenebilmesi yüksek tansiyon hastalarının beslenme sorunu için en uygun ve etkili çözüm sağlayabileceğini göstermiştir. Ichraf vd (2020) hemodiyalize giren hastalar için menü planlamasını daha önce uygulanabilirliği kanıtlanmış bir dinamik hedef programlama modelini geliştirerek sağlamaya çalışmışlardır. Geliştirilen model karar vericilerin tercihlerini menü planlamasına yansıtmasına izin vermektedir. Ai Lee vd (2020) meme kanseri hastaları için tüm besin gereksinimlerini minimum maliyetle karşılayan doğru ve sağlıklı bir menü planını karma tam sayılı matematiksel model ile oluşturmaya çalışmışlardır. Sapri vd. (2019) diyabetik hastalar için günlük besin gereksinimlerini minimum maliyetle karşılayan bir yemek menüsü planını karma tam sayılı matematiksel model ile sağlamayı amaçlamıştır. Model iki gün boyunca standart günlük beslenme gereksinimlerini karşılayan ve yemek tekrarını engelleyen menü planını belirlemeyi amaçlamaktadır. Handayani vd. (2021) kilo vermek için alınan kaloriden daha fazlasının yakılması gerektiği esnasından hareketle günlük diyet menüsünü basit bir doğrusal programlama modeli ile dinamik olarak belirlenmesini araştırmıştır. Diyet planlama kapsamındaki çalışmalar incelendiğinde araştırmacıların analitik yöntemlerin etkinliğini ön plana çıkardıkları ve çeşitli hasta grupları için gereksinimleri karşılayan minimum maliyetli menüleri oluşturmaya çalıştıkları görülmektedir.

Toplu beslenme çerçevesinde menü planlama problemini ele alan çalışmalardan bazıları ise şunlardır. Spak ve Colmenero (2021) bir üniversite kafeteryası için öğrenci tercihlerini dikkate alarak yeterli besin öğelerini içeren en düşük maliyetle menü planlaması yapabilen karma tam sayılı model geliştirmişlerdir. Üç aşamada yürütülen çalışmanın ilk aşamasında öğrencilerin yemekler üzerindeki tercihleri belirlenmiştir. İkinci aşamasında menü planlaması tam sayılı doğrusal programlama modeli ile gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise doğrusal programlama yöntemi kullanarak gıda tasarımı sağlayan bir algoritma geliştirilmiştir. Guala ve Marengo (2020) bir hastanenin toplu beslenme menü planlama problemine karma tam sayılı model ile çözüm aramıştır. Planlamaya öğle ve akşam öğünleri her öğünde 4 kap yemek dahil edilmiştir. Önerilen model sağlıklı beslenme, çeşitlilik ve yerel gastronomi gereksinimlerini karşılarken toplam maliyeti minimize etmeye çalışmaktadır. Sonuçlar el yordamıyla hazırlanmış mevcut planlara kıyasla maliyetlerde %21 ile %25 arasında iyileşme ve tam olarak sağlanamayan dengeli beslenmeyi garanti etmektedir. Eren vd. (2018) hastanelerde personel, diyabet, mide ve karaciğer hastaları için bir aylık menü planını bulanık

hedef programlama yaklaşımıyla oluşturulmuştur. Önerilen model ILOG 12.6.2 sürümü ile çözülmüş ve oluşturulan menülerin zamandan tasarruf edilmesini sağladığı vurgulanmıştır. Kaçmaz vd. (2018) hastanede özel hastalar için hedef programlama yöntemiyle bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada özel hastalığı olup olmama durumuna göre günde 3 öğün menü planlaması oluşturulmuştur.

Pichugina (2020) standart bir menü planlama problemi ile diyet problemini birleştirerek minimum maliyetli ve menü bileşenleriyle ilgili kısıtlamalar içeren günlük bir beslenme menüsü planı oluşturan karma tam sayılı model önermektedir. Çalışmada önerilen modelin ev ve toplu beslenme amacıyla sağlıklı ve faydalı beslenme planlarının oluşturulmasında uygulanabileceği vurgulanmaktadır. Hamzah vd. (2011) düşük bütçeli hane halkının minimum maliyetli beslenebilmesi için üç öğün menü planlama problemini karma tam sayılı model kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Önerilen modelin aylık gıda bütçesini tahmin etmede ve diğer gelir gruplarının menü planlama probleminde kullanılabileceği vurgulanmıştır. Toplu beslenme menü planlama problemine odaklanan çalışmalarda diyet problemine benzer şekilde maliyet minimizasyonuna odaklanıldığı ve toplu beslenmenin getirdiği diğer yan kısıtların dikkate alındığı görülmektedir. Oruç (2014) bulanık hedef programlama yöntemiyle 19-30 yaş arası işçiler için, set seçimsiz 3 veya 4 kaplı öğlen yemeği menü planlaması gerçekleştirmiştir. Körpeli vd. (2012) hedef programlama ile Kırıkkale Üniversitesi yemekhanesinde set seçimsiz 3 çeşit öğlen menü planlamasına dair çalışma yapmışlardır. Çalışmada, insan vücudunun ihtiyaç duyduğu enerji, protein, kalsiyum, demir ile A, B1, B2, B3 ve C vitaminleri ile maliyet değerleri dikkate alınmıştır. Ediz ve Yağdıran (2009) tam sayılı hedef programlama tekniği ile 19 – 30 yaş arası işçiler için set-seçimsiz, 3 kaplı, öğle yemeği menüsü geliştirmişlerdir. Menülerin enerji ihtiyacını karşılamasını ve düşük maliyetli olmasını amaçlanmıştır.

Literatürde menü planlama problemine farklı açılardan yaklaşan çalışmalara da rastlamak mümkündür. Baykasoğlu vd. (2016) bir üniversite kafeteryası için çok sayıda kısıtı dikkate alarak menü planlaması yapılmasına imkân veren karar destek sistemi geliştirmiştir. Seljak (2009) menü planlama probleminin çözümü için sezgisel algoritma geliştirmiştir. Geliştirilen sezgisel algoritma insan tarafından hazırlanan 21 günlük menü planı ile karşılaştırmış ve bariz üstünlük sağladığını tespit etmiştir.

Menü planlamayla ilgili çalışmalar bir bütün olarak ele alındığında analitik yöntemlerle ile hazırlanan menülerin maliyet etkin ve gerekli besin değerlerin sağlanması

noktasında el yordamıyla hazırlanan menülere göre üstün olduğu görülmektedir. Toplu beslenme menü planlama problemlerinde ise hazırlanan menülerin optimal menülerin zamandan tasarruf edilerek hazırlanması ön plana çıkmaktadır. Ancak incelenen çalışmalarda yararlanıcıların tercihleri dikkate alındığı görülse de planlamanın diğer paydaşlarının çıkarları gözletilmemiştir. Özellikle menü planlayıcısına farklı politikalar benimseyerek menüler hazırlanmasına olanak tanıyan bir yaklaşımın eksikliği gözlenmektedir. Bu çalışma literatürdeki bu eksikliği giderebilecek özelliklere sahip birçok amaçlı karma tam sayılı model sunmaktadır.

3. Problemin Tanımlanması ve Formülasyonu

Bu çalışmada bir yükseköğretim kurumunda sunulan öğle yemeği menü planlama problemi ele alınmaktadır. Problemin çözümünde kurum, yemek firması ve yararlanıcı olmak üzere üç paydaşın çelişen çıkarları dengelenmeye çalışılmaktadır. Paydaşlar arasındaki ilişkiler şöyle açıklanabilir. Kurum yemek hizmetini ihale usulü ile dış kaynaklardan sağlamaktadır. İhale şartlarını kabul eden firmalar arasından en düşük teklif veren firma ihaleyi kazanmaktadır. Dolayısıyla yemek firması ekonomik çıkarları doğrultusunda ihale yükümlülüklerini yerine getirirken maliyeti düşürme eğilimindedir. Yararlanıcılar ise çıkarları doğrultusunda menüde beğenilen yemeklerin planlanmasını istemekte ve bunun için mümkün olduğunca düşük ücret ödemek arzusundadır. Ancak beğenilen yemeklerin yüksek maliyetli olması nedeniyle yararlanıcı ve yemek firmasının çıkarları çelişmektedir. Kurumun önceliği yararlanıcıların dengeli ve yeterli beslenmesi olmakla beraber diğer paydaşlarla arasında uzlaşmayı sağlamaya çalışır. Kurum uzlaşmayı sağlayabilmek için iki enstrümana sahiptir. i) İhale şartnamesini düzenleyebilme kabiliyeti. ii) Aylık menü planını kurum personeline hazırlatabilme kabiliyeti. Her iki enstrümanı beraber kullanarak düşük maliyetli beğenilmeyen menüler ile yüksek maliyetli beğenilen menüler arasında denge kurabilmektedir. Ancak 219 çeşit yemek seçeneği arasından paydaşları tatmin edecek optimal aylık menünün el yordamıyla hazırlanması mümkün değildir. Bu çalışmada hem yararlanıcı hem de yemek firmasının çıkarlarını dengeleyebilecek ayrıca kurumun gereksinimlerini karşılayacak aylık menülerin hazırlanması ve farklı senaryolarda menüdeki değişimin analiz edilebilmesine olanak tanıyan matematiksel model önerilmektedir. Menü planlama karar probleminin operasyonel detayları şöyledir. Menü planlayıcısı hafta içi beş gün ve dört haftadan oluşan bir aylık planlama döneminin her günü için dört kap (grup) set-seçimsiz menü belirlemesi gerekmektedir. Menü planı oluşturulurken sadece şartnamede belirlenen yemek

çeşitlerinin kullanılması ve her grup için belirlenen sıklığın mutlaka sağlanması gerekmektedir (Çizelge 1). Mevsimsel olarak temin edilmesi veya hazırlanması mümkün olmayan yemekler şartnamede bulunmasına rağmen menü planında yer almamalıdır. Aylık olarak hazırlanan menünün her ay tekrarlanmaması için yemeklerin önceki dönemlerde menüde yer alma sayıları takip edilir ve mümkün olduğunca az tercih edilmiş yemeklere menüde yer verilir. Günlük menülerin sahip olması gereken besin (enerji, protein, yağ, karbonhidrat) değeri aralıkları

rehberde hafif aktivite düzeyinde 19-24 yaş kadın ve erkek bireyler için önerilen değerler esas alınarak belirlenmiştir (Çizelge 2). Menü planını yararlanıcıların ihtiyacı olan hedef değerlerden minimum sapma göstermesi gerekir.

Çizelge 1. Menülerin besin limitleri

	Enerji (kcal)	Protein (g)	Yağ (g)	Karbonhidrat (g)
Alt Değer	720	25,2	16,0	81
Üst Değer	880	44	34,2	132

Çizelge 2. Gruplar bazında yemeklerin tekrarlanma sıklığı ve çeşit sayısı

Grup Kodu	Ana Grup İsmi	Alt Grup	İkincil Alt Grup	Tekrarlanma Sıklığı	Çeşit Sayısı
1-0-0	Çorbalar			Her gün	34
2-1-1	Ana Yemek	Et Yemekleri	Beyaz Et	Haftada 1 defa	21
2-1-2	Ana Yemek	Et Yemekleri	Kırmızı Et	Haftada 2 defa	23
2-2-0	Ana Yemek	Köfteler		Haftada 1 defa	16
2-3-0	Ana Yemek	Etlı Dolmalar		Ayda 1 defa	7
2-4-0	Ana Yemek	Etlı Sebze Yemekleri		Ayda 1 defa	15
2-5-0	Ana Yemek	Etlı Kurubaklagiller		Ayda 1 defa	6
2-6-0	Ana Yemek	Zeytinyağlı Yemekler		Ayda 1 defa	9
3-1-0	Pilav	Pilav		Haftada 3 defa	11
3-2-0	Pilav	Makarna		Haftada 1 defa	7
3-3-0	Pilav	Börekler		Haftada 1 defa	14
4-1-0	Meyve	Salata, Turşu		Haftada 2 defa	14
4-2-0	Meyve	Tatlılar, Kekler		Haftada 1 defa	18
4-3-0	Meyve	Meyve Nektarı, Komposto, Hoşaf		Haftada 1 defa	8
4-4-0	Meyve	Meyve		Haftada 1 defa	16

Yemek maliyetleri çeşitli illerin (Antalya, Erzurum, Gaziantep, İzmir, Kayseri, Gümüşhane) ticaret borsası birim fiyat bültenlerinden (Aralık 2020) ortalama hesaplanarak belirlenmiştir (Çizelge 3).

Yemeklerin beğenilme puanları hesaplanırken düzenli olarak yemekhaneden yararlanan 70 adet yararlanıcının görüşüne başvurulmuştur. Çalışmada yemekhane yararlanıcılarının yemekleri beğeni düzeylerinin belirlenmesi için uygulanan anketin etik kurul izni Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu'nun 2021/8 sayı ve 29/12/2021 tarihli toplantısında görüşülmüş ve kabul edilmiştir. Yararlanıcılardan şartnamede yer alan her yemeği 1-10 ölçeğinde (Büyük değer yüksek beğeni temsil eder.) değerlendirmeleri istenmiştir. Her bir yemeğin beğenilme değeri 70 anketin ortalaması şeklinde belirlenmiştir. Yemeklerin beğeni değerleri ve maliyet değerleri farklı birimlerle ifade edilmektedir. Problem kapsamında menülerin beğeni ve maliyet değerlerinin değiş tokuşunu mümkün kılabilmek için aynı birim cinsinden ifade edilmesi gerekir. Bu nedenle yemekler her grup kendi içinde beğeni ve maliyet değerleri 1-10 ölçeğinde puana dönüştürülmüştür. Çizelge 4'te değerden puana dönüşüm örneği çorba grubu maliyetleri üzerinden gösterilmektedir. Menüler hazırlanırken seçeneklerin birbiriyle uyumu, içerik benzerliği dikkate alınarak yararlanıcı ve yemek firmasının çıkarları dengelenmeye çalışılır.

Çizelge 3. Yemek maliyet hesabı örneği

Yayla Çorbası Pişmiş servis gramajı: 200 gram/porsiyon

Malzeme	Pişmemiş Miktar	Birim Fiyat	Yemeğin Maliyeti
Pirinç	10,00 Gr	12,81 TL	0,128 TL
Un	8,00 Gr	3,68 TL	0,029 TL
Yoğurt	4,00 Gr	5,35 TL	0,021 TL
Yumurta	1/8 adet	0,82 TL	0,103 TL
Kuru Nane	0,50 Gr	32,00 TL	0,016 TL
Tuz	1,00 Gr	2,75 TL	0,003 TL
Sıvı Yağ (Ayçiçek)	8,00 Gr	12,35 TL	0,099 TL
Toplam Maliyet			0,40 TL

Çizelge 4. Değer puan dönüşüm örneği: çorba grubu

En Yüksek Maliyet	3,370
En Düşük Maliyet	0,400
Puan Aralığı Değeri ((En Yüksek-En Düşük)/10)	0,297
Maliyet TL	Maliyet Puanı
[0,400-0,697)	10
[0,697-0,994)	9
[0,994-1,291)	8
[1,291-1,588)	7
[1,588-1,885)	6
[1,885-2,182)	5
[2,182-2,479)	4
[2,479-2,776)	3
[2,776-3,073)	2
[3,073-3,370]	1

3.1 Matematiksel formülasyon

Tanımlanan problem çok amaçlı karma tam sayılı matematiksel model olarak formüle edilmiştir. Model ile ilgili tanımlamalar Çizelge 5'te, formülasyonu ise Çizelge 6'da gösterilmiştir. Matematiksel modelin amaç fonksiyonu üç amacı (Denklem (1-3)) kapsamaktadır. z_1 menülerde her yemek grubunda en fazla seçilen seçeneğin sayısını minimize ederek mümkün olduğunca her gün farklı yemeğin seçilmesini sağlar. z_2 menülerin besin alt ve üst sınırlarından sapmaları minimize ederek mümkün olduğunca hedeflenen besin değerinin yakalanmasını sağlar. z_3 menülerin beğeni ve maliyet politikası arasındaki dengesini amaçlar. Politika parametresine (ω) bağlı olarak beğeni odaklı veya maliyet odaklı menülerin oluşturulmasına izin verir. Amaçların öncelik sıralaması $z_1 > z_2 > z_3$ şeklindedir.

Çizelge 5. Matematiksel model ile ilgili tanımlamalar

İndisler ve Kümeler	
$w \in W$	Haftalar, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_{ W }\}$
$g \in G$	Günler, $G = \{g_1, g_2, \dots, g_{ G }\}$
$n \in N$	İçerik, $N = \{n_1, n_2, \dots, n_{ N }\}$
$f \in F$	Yemekler, $F = \{f_1, f_2, \dots, f_{ F }\}$
$m \in M$	Ana Yemek Grupları, $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{ M }\}$
$m' \in M^m$	m' 'in altındaki yemek grupları, $M^m = \{m'_1, m'_2, \dots, m'_{ M^m }\}$
$m'' \in M^{m'}$	m'' 'in altındaki yemek grupları, $M^{m'} = \{m''_1, m''_2, \dots, m''_{ M^{m'} }\}$
$l \in L$	Limitler, $L = \{\underline{l}, \bar{l}\}$
$b \in B$	Benzerlik Kodları, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{ B }\}$
Parametreler	
$\rho_f^m, \rho_f^{m'}, \rho_f^{m''}$	Yemek f 'in ait olduğu gruplar
ρ_f^c	Yemek f 'nin maliyeti
ρ_f^{cs}	Yemek f 'nin maliyet puanı
ρ_f^{ls}	Yemek f 'nin beğeni puanı
ρ_f^n	Yemek f 'nin içerik n 'deki değeri
ρ_f^a	Yemek f 'nin planlamaya dahil olup olmaması
ρ_f^p	Yemek f 'nin önceki planlamada sayısı
ρ_f^b	Yemek f 'nin benzerlik kodu
$L_{l,n}$	Menünün içerik n 'deki l limiti
ω	Menü maliyet beğeni dengesi politika parametresi, $\omega \in [0,1]$
Karar Değişkenleri	
$x_{w,g,m,f}$	Hafta w 'nin g gününde m ana yemek grubundan yemek f seçilmişse 1, aksi halde 0.
τ_f	Planlama döneminde yemek f 'nin menüdeki sayısı
τ_m	Planlama döneminde m ana yemek grubunda en fazla tekrar eden yemeğin sayısı
$\beta_{w,g}$	Hafta w 'nin g günündeki menünün ortalama beğeni puanı
$\gamma_{w,g}$	Hafta w 'nin g günündeki menünün ortalama maliyet puanı
$\vartheta_{w,g,l,n}$	Hafta w 'nin g günündeki menünün n içeriğinde l limitinden sapma miktarı

Çizelge 6. Matematiksel modelin formülasyonu

Amaç Fonksiyonu;	
min z_1	$\sum_{m \in M} \tau_m \quad (1)$
min z_2	$\sum_{w \in W} \sum_{g \in G} \sum_{l \in L} \sum_{n \in N} \frac{\vartheta_{w,g,l,n}}{L_{l,n}} \quad (2)$
max z_3	$\omega * \sum_{w \in W} \sum_{g \in G} \beta_{w,g} + (1 - \omega) * \sum_{w \in W} \sum_{g \in G} \gamma_{w,g} \quad (3)$
Kısıtlar;	
	$\sum_{g \in G} x_{w,g,m,f} \leq 1 \quad \forall w \in W, m \in M, f \in F \quad (4)$
	$\sum_{f \in F} \sum_{m \in M: \rho_f^m = m} x_{w,g,m,f} * \rho_f^n + \vartheta_{w,g,l,n} \geq L_{l,n} \quad \forall w \in W, g \in G, n \in N \quad (5)$
	$\sum_{f \in F} \sum_{m \in M: \rho_f^m = m} x_{w,g,m,f} * \rho_f^n + \vartheta_{w,g,\bar{l},n} \leq L_{\bar{l},n} \quad \forall w \in W, g \in G, n \in N \quad (6)$
	$\sum_{f \in F: \rho_f^m = m} x_{w,g,m,f} = 1 \quad \forall w \in W, g \in G, m \in M \quad (7)$
	$\sum_{f \in F: \rho_f^m = m, \rho_f^a = 0} x_{w,g,m,f} = 0 \quad \forall w \in W, g \in G, m \in M \quad (8)$
	$\frac{\sum_{f \in F} \sum_{m \in M} x_{w,g,m,f} * \rho_f^{ls}}{\rho_f^m} = \beta_{w,g} \quad \forall w \in W, g \in G \quad (9)$
	$\frac{\sum_{f \in F} \sum_{m \in M} x_{w,g,m,f} * \rho_f^{cs}}{\rho_f^m} = \gamma_{w,g} \quad \forall w \in W, g \in G \quad (10)$
	$\sum_{w \in W} \sum_{g \in G} x_{w,g,\rho_f^m,f} = \tau_f \quad \forall f \in F \quad (11)$
	$\tau_f + \rho_f^p \leq \tau_m \quad \forall m \in M, f \in F: \rho_f^m = m \quad (12)$
	$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m = 2, \rho_f^{m'} = 1, \rho_f^{m''} = 1} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 1 \quad \forall w \in W \quad (13)$
	$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m = 2, \rho_f^{m'} = 1, \rho_f^{m''} = 2} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 2 \quad \forall w \in W \quad (14)$
	$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m = 2, \rho_f^{m'} = 2} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 1 \quad \forall w \in W \quad (15)$
	$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m = 2, \rho_f^{m'} = 3} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 1 \quad (16)$
	$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m = 2, \rho_f^{m'} = 4} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 1 \quad (17)$
	$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m = 2, \rho_f^{m'} = 5} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 1 \quad (18)$
	$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m = 2, \rho_f^{m'} = 6} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 1 \quad (19)$
	$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m = 3, \rho_f^{m'} = 1} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 3 \quad \forall w \in W \quad (20)$

Çizelge 6. (devamı) Matematiksel modelin formülasyonu

$$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=3, \rho_f^{m'}=2} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 1 \quad \forall w \in W \quad (21)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=3, \rho_f^{m'}=3} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 1 \quad \forall w \in W \quad (22)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=4, \rho_f^{m'}=1} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 2 \quad \forall w \in W \quad (23)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=4, \rho_f^{m'}=2} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 1 \quad \forall w \in W \quad (24)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=4, \rho_f^{m'}=3} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 1 \quad \forall w \in W \quad (25)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=4, \rho_f^{m'}=4} x_{w,g,\rho_f^m,f} = 1 \quad \forall w \in W \quad (26)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=2, \rho_f^{m'}=5} x_{w,g,\rho_f^m,f} \leq \sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=3, \rho_f^{m'}=1} x_{w,g,\rho_f^m,f} \quad \forall w \in W, g \in G \quad (27)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=2, \rho_f^{m'}=3} x_{w,g,\rho_f^m,f} + \sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=3, \rho_f^{m'}=1} x_{w,g,\rho_f^m,f} \leq 1 \quad \forall w \in W, g \in G \quad (28)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=2, \rho_f^{m'}=6} x_{w,g,\rho_f^m,f} + \sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=4, \rho_f^{m'}=1} x_{w,g,\rho_f^m,f} \leq 1 \quad \forall w \in W, g \in G \quad (29)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=2, \rho_f^{m'}=4} x_{w,g,\rho_f^m,f} + \sum_{g \in G} \sum_{f \in F: \rho_f^m=4, \rho_f^{m'}=1} x_{w,g,\rho_f^m,f} \leq 1 \quad \forall w \in W, g \in G \quad (30)$$

$$\sum_{f \in F: \rho_f^m=3, \rho_f^{m'}=1, \rho_f^b=b} x_{w,g,\rho_f^m,f} + \sum_{f \in F: \rho_f^m=3, \rho_f^{m'}=1, \rho_f^b=b} x_{w,g+1,\rho_f^m,f} \leq 1 \quad \forall w \in W, g \in G \setminus \{g_{|G}\}, b \in B \quad (31)$$

$$x_{w,g,1,f_1} + \sum_{f \in F: \rho_f^m=3, \rho_f^{m'}=1, \rho_f^b=1} x_{w,g,\rho_f^m,f} + x_{w,g,4,f_{179}} \leq 1 \quad \forall w \in W, g \in G \quad (32)$$

$$x_{w,g,1,f_{26}} + x_{w,g,2,f_{117}} \leq 1 \quad \forall w \in W, g \in G \quad (33)$$

$$x_{w,g,1,f_{26}} + x_{w,g,2,f_{118}} \leq 1 \quad \forall w \in W, g \in G \quad (34)$$

Matematiksel model 31 adet kısıta (Denklem (4-34)) sahiptir. Kısıt 4 bir yemeğin haftada en fazla bir kez menüde yer verilmesini sağlar. Kısıt 5 ve 6 sırasıyla günlük menülerin besin değeri alt ve üst limitlerinden ne kadar saptığını hesaplar. Kısıt 7 menülerde her ana yemek grubundan sadece bir seçeneğin seçilmesini sağlar. Kısıt 8 planlama dönemine dahil olmayan yemeklerin seçilmesini engeller. Kısıt 9 ve 10 sırasıyla günlük menülerin ortalama beğeni ve maliyet puanını hesaplar. Kısıt 11 planlama döneminde her yemeğin kaç defa seçildiğini hesaplar. Kısıt 12 menülerde her yemek grubu için en fazla seçilen yemeğin sayısını hesaplar.

Kısıt 13-26 yemeklerin menülerde yer alma sıklığıyla ilgili kısıtlardır. Kısıt 13 haftalık menü planlamasında beyaz et grubundaki (2-1-1) yemeklerden haftada bir defa seçilmesini sağlar. Kısıt 14 haftalık menü planlamasında kırmızı et grubundaki (2-1-2) yemeklerden haftada iki defa

seçilmesini sağlar. Kısıt 15 haftalık menü planlamasında köfte grubundaki (2-2-0) yemeklerden haftada bir defa seçilmesini sağlar. Kısıt 16 aylık menü planlamasında etli dolmalar grubundaki (2-3-0) yemeklerden ayda bir defa seçilmesini sağlar. Kısıt 17 aylık menü planlamasında etli sebze yemekleri grubundaki (2-4-0) yemeklerden ayda bir defa seçilmesini sağlar. Kısıt 18 aylık menü planlamasında etli kurubaklagil yemekleri grubundaki (2-5-0) yemeklerden ayda bir defa seçilmesini sağlar. Kısıt 19 aylık menü planlamasında zeytinyağlı yemekleri grubundaki (2-6-0) yemeklerden ayda bir defa seçilmesini sağlar. Kısıt 20 haftalık menü planlamasında pilav grubundaki (3-1-0) yemeklerden haftada üç defa seçilmesini sağlar. Kısıt 21 haftalık menü planlamasında makarna grubundaki (3-2-0) yemeklerden haftada bir defa seçilmesini sağlar. Kısıt 22 haftalık menü planlamasında börek grubundaki (3-3-0) yemeklerden haftada bir defa seçilmesini sağlar. Kısıt 23 haftalık menü planlamasında salata-turşu grubundaki (4-

1-0) yemeklerden haftada iki defa seçilmesini sağlar. Kısıt 24 haftalık menü planlamasında tatlı-kek grubundaki (4-2-0) yemeklerden haftada bir defa seçilmesini sağlar. Kısıt 25 haftalık menü planlamasında meyve suyu-komposto-hoşaf grubundaki (4-3-0) yemeklerden haftada bir defa seçilmesini sağlar. Kısıt 26 haftalık menü planlamasında yaş meyve grubundaki (4-4-0) yemeklerden haftada bir defa seçilmesini sağlar.

Kısıt 27-34 yemeklerden birbiriyle uyumu, içerik benzerliği ile ilgili kısıtlardır. Kısıt 27 günlük menüde etli kurubaklagil grubundan (2-5-0) bir yemeğin seçilmesi durumunda pilav grubundan (3-1-0) bir yemeğin mutlaka seçilmesini sağlar. Kısıt 28 etli dolma grubundan (2-3-0) bir yemek ile pilav grubundan (3-1-0) bir yemeğin aynı günlük menüde yer almasını engeller. Kısıt 29 zeytinyağlı grubundan (2-6-0) bir yemek ile salata grubundan (4-1-0) bir yemeğin aynı günlük menüde yer almasını engeller. Kısıt 30 etli sebze yemekleri grubundan (2-4-0) bir yemek ile salata grubundan (4-1-0) bir yemeğin aynı günlük menüde yer almasını engeller. Kısıt 31 pilav grubundaki benzer içeriğe sahip yemeklerin birbirini takip eden günlük menülerde yer almasını engeller. Kısıt 32-34 farklı gruplarda benzer içeriğe sahip belirli yemeklerin aynı günlük menüde yer almasını engeller. Kısıt 32 yayla çorbası (f_1), prinçli pilavlar grubundaki yemeklerin ve sütlacın aynı günlük menüde yer almasını engeller. Kısıt 33 gendime çorbası (f_{26}) ve kuru fasulye (f_{117}) yemeklerin aynı günlük menüde yer almasını engeller. Kısıt 34 gendime çorbası (f_{26}) ve nohut (f_{118}) yemeklerin aynı günlük menüde yer almasını engeller.

4. Bulgular

Bu bölümde önerilen matematiksel modelin davranışı ve sonuçların politika parametresine duyarlılığı incelenmiştir. Araştırma Intel Core i5-8250U CPU 1.60 GHz işlemci ve 12 GB belleğe sahip bilgisayar üzerinde

Python programlama dili, Gurobi çözücüsü kullanarak gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle modelin davranışı kısıtlara uygun menü planlayıp planlamadığı aşağıdaki ayarlama ve beklentilerle test edilmiştir. Modelin hafıza özelliğinin etkisini gözlemlemek için model iki defa peş peşe çalıştırılmıştır. İlk çalıştırma sonucunda yemeklerin planlama sayıları geçmiş planlama dönemine ait yemek sayılarını temsil edecek şekilde ikinci çalıştırmaya veri (ρ_f^p) olarak dahil edilmiştir. İkinci çalıştırmada mümkün olduğunca farklı yemeklerin tercih edilmesi beklenmektedir.

Mevsimsellik etkisinin menü planına dahil edilip edilmediğini gözlemlemek için meyve grubundan 11 çeşit yemek parametre olarak pasif hale getirmiştir. Aktif 208 çeşit yemek ile model testi gerçekleştirilmiştir. Pasif hale getirilen yemeklerin planlamaya dahil edilmemesi beklenmektedir.

Maliyet ve beğeni açısından dengeli bir menü hazırlanması için politika parametresi $w = 0,5$ olarak belirlenmiştir. Günlük menülerin ortalama maliyet ve beğeni puanlarının uç değerlerden uzak, ortalama değerlerde yoğunlaşması beklenir.

Kabul edilebilir menü planının oluşup oluşmadığının gözlemlenebilmesi için günlük menülerin belirlenen besin değeri limitleri arasında olması ve 4 haftalık menü planının şartnamedeki yemek sıklıkları ve uyum kurallarını ihlal etmemesi beklenir.

Modelin testi sonucunda hazırlanan 4 haftalık menü planı ve günlük menülerin besin değerleri ve ortalama beğeni ve maliyet puanları Çizelge 7 ve 8'de gösterilmektedir. Çizelgelerdeki sonuçlar ikinci çalıştırmanın sonucudur. İlk çalıştırma veri hazırlamak amacıyla gerçekleştirildiği için sonuçları çalışmada raporlanmamıştır.

Çizelge 7. 4 haftalık menü planlamasında günlük menüler

1. Hafta	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
Çorba	Kafkas Çorbası	Nohut Çorbası	Mengen Çorbası	Yeşil Mercimek Çorbası	Ezogelin Çorba
Ana Yemek	Olimpiyat Köfte	Orman Kebabı	Sebzeli Piliç	Sebzeli Kebap	Yoğurtlu Biber Dolma
Pilav	Bezelyeli Pirinç Pilavı	Sebzeli Bulgur Pilavı	Pirinç Pilavı	Yoğurtlu Makarna	Ispanaklı Börek
Meyve	Karışık Turşu	Mandalina	Ayran	Supangle	Söğüş
2. Hafta	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
Çorba	Kırmızı Mercimek Çorba	Ayran Aşı Çorbası	Kremalı Mantar Çorbası	Köy Çorbası	Tavuk Suyu Çorba
Ana Yemek	Sebzeli Köfte	Piliç Pirzola Biftek	Bahçivan Kebabı	Çoban Kavurma	Yoğurtlu Karnabahar Kızartma
Pilav	Bulgur Pilavı	Pirinç Pilavı	Soslu Makarna	Avcı Böreği	Bezelyeli Pirinç Pilavı
Meyve	Sütlac	Patates Salatası	Elma	Çoban Salatası	Yoğurt

Çizelge 7. (devamı) 4 haftalık menü planlamasında günlük menüler

3. Hafta	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
Çorba	Tarhana Çorbası	Domates Çorbası	Bulgur Çorbası	Yayla Çorba	İrmik Çorbası
Ana Yemek	Et Izgara	Sebzeli Kebap	Etli Kuru Fasulye	Bahçivan Köfte	Piliç Pirzola
Pilav	Meyhane Pilavı	Kıymalı Makarna	Sebzeli Pirinç Pilavı	Ispanaklı Tepsi Böreği	Nohutlu Pirinç Pilavı
Meyve	Meyve Suyu	Revani	Cacık	Salatalık Turşusu	Kivi
4. Hafta	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
Çorba	Erişte Çorbası	Köfteli Sebze Çorbası	Sebze Çorbası (Kış)	Köylü Çorbası	Gendime Çorbası
Ana Yemek	Piliç Sis	Patates Oturtma	Et Döner	Yahni	Çiftlik Köfte
Pilav	Sebzeli Makarna	İç Pilav	Nohutlu Bulgur Pilavı	Patatesli Börek	Meyhane Pilavı
Meyve	Revani	Portakal	Elma Komposto	Karışık Salata	Rus Salatısı

Çizelge 8. 4 haftalık menü planlamasında günlük menülerin besin değerleri ve ortalama beğeni ve maliyet puanları

	1. Hafta	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
Enerji		769	759,1	725,1	798	848,7
Protein		29	27,6	31,9	33,4	41,7
Yağ		33,7	34,2	27,5	33,1	31,4
Karbonhidrat		84,1	82,8	85,8	89,8	97,7
Ort. Beğeni Puanı		4,5	5,75	4,75	6,75	6,5
Ort. Maliyet Puanı		7,5	7,25	7,25	7,5	8,25
	2. Hafta	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
Enerji		768,1	802,3	762,1	787,4	749
Protein		32,9	42,8	37,5	41,9	26
Yağ		32,3	31,9	30,1	31,6	34,2
Karbonhidrat		85,2	83,8	83,6	82,3	81,2
Ort. Beğeni Puanı		6,5	7,5	6,25	6	5,25
Ort. Maliyet Puanı		8,5	7,25	8,5	6,5	7,25
	3. Hafta	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
Enerji		753,7	873,4	754,2	735,1	819,8
Protein		32,5	35,8	27,5	34,3	42
Yağ		31,4	28,3	33,4	28,7	32,4
Karbonhidrat		82,8	116,7	84,4	82,7	86
Ort. Beğeni Puanı		5,75	5,5	4,75	7,25	5,5
Ort. Maliyet Puanı		7,25	8,5	7,75	8,25	7,75
	4. Hafta	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
Enerji		871,2	763,6	804,8	808,1	756,9
Protein		40,9	28,6	29,3	34,5	28,4
Yağ		31,1	31,9	33,3	32,2	32,3
Karbonhidrat		105,3	87,4	95,4	92,5	86,5
Ort. Beğeni Puanı		6,25	6	4,25	6,25	5
Ort. Maliyet Puanı		8,75	7,5	7,75	7,75	7,5

4 Haftalık menü planlamasından ilk bakışta yapılabilecek tespitler şöyledir. Mevsimin menü planı üzerindeki etkisini gözlemlemek için pasif hale getirilen yemekler (Ayva Tatlısı, Karpuz, Kavun, Üzüm, Kiraz, Şeftali, Çilek, Erik, Malta Eriği, Kayısı, Ayva) planlamada yer almamıştır. Bu tespit modelin beklenildiği gibi davrandığını ve karar vericinin yemek parametrelerini değiştirerek ilgili dönem için hangi yemeğin planlamaya dahil olup olamayacağını belirleyebileceğini göstermektedir. Bu sayede mevsim nedeniyle olmasa bile herhangi bir nedenle ilgili yemeğin hazırlanması mümkün olamaması durumlarda menü planının yayınlandıktan sonra güncellenmesine gerek

kalmadan planlama aşamasında müdahale edilebilmektedir. Bir diğer tespit 4 çeşit yemek grubunda planlama döneminin her gününde uygun bir menü planlanmıştır. Şartnamede belirlenen yemek sıklıkları ile ilgili kısıtların (Kısıt 13-26) ve günlük menülerdeki yemekleri birbiriyle uyumu ve içerik benzerliği ile ilgili kısıtlamaların (Kısıt 27-34) sağlandığı görülmektedir. Model temel olarak kendisinden beklenen menü planını yaklaşık 14 saniye gibi kısa bir sürede hazırlayabilmektedir. 4 haftalık menü planı besin değerleri açısından incelendiğinde belirlenen alt ve üst limitlerin ihlal edilmediği görülmektedir (Çizelge 9).

Menülerin ortalama beğeni ve maliyet puanlarının frekansı (Çizelge 10) incelendiğinde politika parametresinin 0,5 olarak belirlenmesine paralel olarak dengeli bir menü planı oluşturulduğu görülmektedir. Menüler ortalama değerlerde yoğunlaşmaktadır.

Çizelge 9. 4 haftalık menünün besin istatistikleri

	En Yüksek	En Düşük	Ortalama	Alt Limit	Üst Limit
Enerji	873,4	725,1	785,5	720,0	880,0
Protein	42,8	26,0	33,9	25,2	44,0
Yağ	34,2	27,5	31,8	16,0	34,2
Karbonhidrat	116,7	81,2	88,8	81,0	132,0

Çizelge 10. 4 haftalık menünün ortalama beğeni ve maliyet puanı istatistikleri

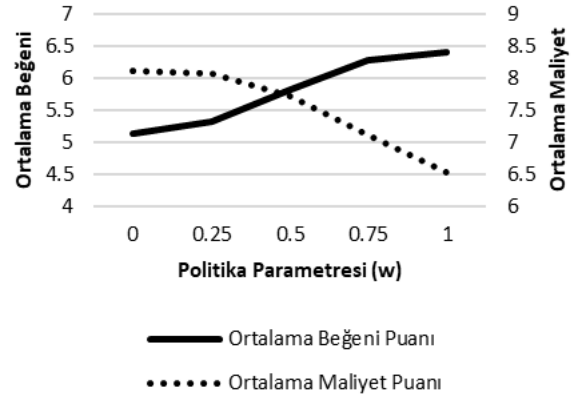
Ort. Beğeni Puanı	Menü Sayısı	Ort. Maliyet Puanı	Menü Sayısı
<5	4	<7	1
5-7	14	7-8	13
>7	2	>8	6

Modelin hafıza özelliğinin davranışları hakkında yapılan tespitler ve çıkarımlar şöyledir. Birinci ve ikinci çalıştırmada toplam 46 adet yemek tekrar etmiş ve 34 adet yemek değişmiştir. 4 haftalık menü planının yaklaşık %43'ünün değişmiş olması sabit bir menü planının oluşmadığını, yemek çeşitliliğinin sunulduğunu kanıtlamaktadır. Tekrar eden yemekler incelendiğinde tekrarlanan yemeklerin %43'ünün (20 adet) çorba grubunda, %24'ü (11 adet) pilav grubunda ve %33'ünün (15 adet) meyve grubunda olduğu gözlenmektedir. Ana yemek grubunda tekrar eden yemek bulunmamaktadır. Bu sonucun nedeni şartnamede ana yemek grubunun diğer gruplara göre sayıca daha fazla yemeği barındırmasıdır. Çeşitlerin fazla olması nedeniyle model ana yemek grubunda yemekleri tekrar etmeden menü planını hazırlayabilmiştir. Bu sonuç diğer gruplarda da yeterince çeşit olması durumunda yemek tekrarının tamamıyla engellenebileceğini göstermektedir. Yemek çeşitliliğinin artması durumunda el yordamıyla menü planının daha zor bir hal alacağı unutulmamalıdır.

Menü planının politika parametresine (w) duyarlılığı 5 senaryoda ($w = \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$) incelenmiştir. $w = 0$ maliyet odaklı bir politikayı $w = 1$ ise beğeni odaklı bir politikayı temsil etmektedir. Ara değerler denge politikalarını temsil etmektedir. 5 senaryoda ölçülen ortalama beğeni ve maliyet puanları Şekil 1'de gösterilmektedir.

Beğeni ve maliyetin ters orantılı olduğu görülmektedir. Beğenilen menülerin yüksek maliyetli olması ve bunun tam tersinin geçerli olması bu sonucu doğrulamaktadır. Bu

kapsamda karar vericinin yararlanıcının çıkarlarını korumaya çalışmak için beğenilen yemeklere sık yer verilmesi hizmet sağlayıcının maliyetlerini artıracak ve hizmetin sürdürülebilmesi için gerekli olan finansal motivasyonu ortadan kaldıracaktır. Tam tersi durumda yararlanıcı beğenmediği yemeklerin servis edildiği yemekhaneyi tercih etmekten vazgeçecektir.



Şekil 1. Senaryoların Ortalama Beğeni ve Maliyet Puanları

Bu durum toplu beslenmenin sağlanamayacağını anlamına geldiği için istenmeyen bir durumdur. Karar vericinin mutlak suretle yararlanıcı ve hizmet sağlayıcı arasındaki çıkar çatışmasını dengelemesi gerekmektedir. Öğrencilerin yüksek motivasyona sahip olması gereken sınav dönemlerinde beğeni odaklı yemeklerin planlanması öğrencileri memnun edecektir. Benzer şekilde öğrencilerin okulda bulunmadıkları dönemlerde maliyet puanı yüksek (maliyeti düşük) yemeklerin planlanması yemek firmasını memnun edecektir. Karar vericinin politika değişikliği gerektiren durumlara uyum sağlayabilmesi önerilen matematiksel model ile mümkün olabilmektedir. w politika parametresi 1'e yaklaştıkça beğeni odaklı, 0'a yaklaştıkça maliyet odaklı bir menü planı hazırlanabilmektedir. 0.5 olması durumunda ise paydaşların çıkarlarının dengelendiği menü elde edilebilmektedir. Paydaşların bireysel çıkarlarına odaklanmanın avantaj sağlamadığı normal dönemlerde politika parametresinin 0.5 olarak belirlenmesi uygun olacaktır.

4.1. Model sonuçlarının el yordamıyla hazırlanan menü planı ile karşılaştırılması

Çalışmada önerilen modelin sağlamlığını test edebilmek için model sonuçları ile el yordamıyla hazırlanan menü planı karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Çizelge 11'de gösterilen 2022 Aralık ayına ait el yordamıyla hazırlanan menü planı incelenerek karar vericinin nasıl bir politika izlediği öngörülmeye çalışılmıştır.

2022 Aralık ayına ait menü planının inceleme sonuçları ise Çizelge 12'de gösterilmektedir. El yordamıyla hazırlanan menü planının Çizelge 1'de belirtilen besin limitlerinin

altında veya üstünde kalarak çok defa ihlal ettiği görülmektedir. Enerji, protein, yağ ve karbonhidrat limitleri sırasıyla 12 (%60), 7 (%35), 11 (%55), 12 (%60) menüde ihlal edilmiştir. Bu tespit el yordamıyla hazırlanan menülerin belirlenen besin değerlerini garanti etmediğini göstermektedir. Çizelge 11'deki menü dikkatli incelenirse çorba grubunda yemeklerin tekrar edildiği gözlemlenebilir. Bu tespit ise yemek çeşitliliğinin menü planının el yordamıyla hazırlanması durumunda sağlanamadığını göstermektedir. 2022 Aralık ayı menü planının ortalama beğeni (5,9) ve maliyet puanları (7,2)

Şekil 1'de gösterilen ortalama maliyet ve beğeni arasındaki ödünleşim dikkate alındığında karar vericinin beğeni ağırlıklı bir politika ($w = 0.75$) benimsediği sonucuna ulaşılabilir. Bu çıkarıma dayanarak politika parametresi $w = 0.75$ ve bir önceki planlama dönemi (2022 Kasım) menü planında yer verilen yemeklerin sayıları ρ_f^p parametresi olarak kabul edilerek önerilen model ve el yordamıyla hazırlanan (2022 Aralık) menü planı karşılaştırılmıştır.

Çizelge 11. 2022 aralık ayına ait el yordamıyla hazırlanan menü planı

Tarih	5.12.2022	6.12.2022	7.12.2022	8.12.2022	9.12.2022
Çorba	Domates Çorbası	Mengen Çorbası	Ezogelin Çorba	Şehriye Çorba	Sebzeli Çorbası
Ana Yemek	Tas Kebabı	İzmir Köfte	Piliç Haşlama	Karışık Dolma	Sebzeli Kebab
Pilav	Pirinç Pilavı	Bulgur Pilavı	Soslu Makarna	Kıymalı Börek	Pirinç Pilavı
Meyve	Karışık Salata	Ayran	Yeşil Salata	Kemalpaşa Tatlısı	Armut
Ort. Maliyet	7,3	7,3	5,3	7,3	7,5
Ort. Beğeni	4,5	7	7,5	7,8	5,8
Enerji	711,6	744,1	973	951,8	697,0
Protein	27,7	29,1	64,8	34,4	26,1
Yağ	35,5	33,5	55,6	33,2	23,8
Karbonhidrat	68,8	80,2	52,7	133,6	85,2
Tarih	12.12.2022	13.12.2022	14.12.2022	15.12.2022	16.12.2022
Çorba	Tarhana Çorbası	Buğday Çorbası	Acem Çorbası	Kırmızı Mercimek Çorba	Köylü Çorbası
Ana Yemek	Orman Kebabı	Yahni	Sebzeli Piliç	Bahçivan Köfte	Patates Oturtma
Pilav	Bulgur Pilavı	Yoğurtlu Makarna	Pirinç Pilavı	Peynirli Börek	Pirinç Pilavı
Meyve	Rus Salatası	Üzüm Hoşafı	Kabak Tatlısı	Elma	Mevsim Salata
Ort. Maliyet	7,6	6,9	7,5	8,1	6,8
Ort. Beğeni	6,5	4,8	5,0	5,0	6,0
Enerji	615,8	753,4	740,8	988,2	722,2
Protein	23,0	28,5	32,8	44,7	23,2
Yağ	33,0	36,9	20,3	51,8	32,0
Karbonhidrat	55,9	74,7	104,9	103,5	83,0
Tarih	19.12.2022	20.12.2022	21.12.2022	22.12.2022	23.12.2022
Çorba	Gendime Çorbası	Kafkas Çorbası	Ezogelin Çorba	Ekşili Köfte Çorbası	Şehriye Çorba
Ana Yemek	Avcı Kebabı	Olimpiyat Köfte	Fırın Piliç	Orman Kebabı	Etili Kuru Fasulye
Pilav	Bulgur Pilavı	Pirinç Pilavı	Patatesli Börek	Soslu Makarna	Pirinç Pilavı
Meyve	Yeşil Salata	Şekerpare	Mandalina	Elma Komposto	Havuç Salatası
Ort. Maliyet	7,1	8,1	5,9	7,6	8,1
Ort. Beğeni	7,5	8,3	5,8	3,5	6,8
Enerji	788,6	880,1	934,2	995,7	722,4
Protein	29,0	29,4	45,8	30,8	26,5
Yağ	48,6	37,0	37,2	34,9	30,7
Karbonhidrat	57,7	104,9	101,2	136,3	83,2
Tarih	26.12.2022	27.12.2022	28.12.2022	29.12.2022	30.12.2022
Çorba	Kırmızı Mercimek Çorba	Tarhana Çorbası	Sebzeli Çorbası	Mengen Çorbası	Şehriye Çorba
Ana Yemek	Filiz Kebabı	Bahçivan Kebabı	Sebzeli Piliç	Zeytinyağlı Barbunya	Fırın Köfte
Pilav	Pirinç Pilavı	Yoğurtlu Makarna	Bulgur Pilavı	Kıymalı Börek	Pirinç Pilavı
Meyve	Yoğurt	Portakal	Kalburabastı	Karışık Salata	Cacık
Ort. Maliyet	8,5	7,2	6,7	7,1	8,5
Ort. Beğeni	7,5	4,8	4,5	5,0	5,0
Enerji	813,7	603,9	646,8	939,5	842,9
Protein	35,0	26,6	24,8	23,9	41,9
Yağ	38,1	31,2	27,5	46,1	39,4
Karbonhidrat	80,7	51,1	73,7	99,1	78,9

Çizelge 12. 2022 aralık menü planı inceleme sonuçları

Maksimum	Minimum	Ortalama		Altında	Arasında	Üstünde	İhlal Oranı
995,7	603,9	803,3	Enerji	5	8	7	%60
64,8	23,0	32,4	Protein	4	13	3	%35
55,6	20,3	36,3	Yağ	0	9	11	%55
136,3	51,1	85,5	Karbonhidrat	10	8	2	%60
8,3	3,5	5,9	Ort. Beğeni P.				
8,53	5,1	7,2	Ort. Maliyet P.				

Çizelge 13. 2022 aralık menü planı ile model sonuçlarının karşılaştırılması

2022 Aralık Menü Planı				Önerilen Model		
Maksimum	Minimum	Ortalama		Maksimum	Minimum	Ortalama
995,7	603,9	803,3	Enerji [720-880]	854,0	745,4	785,9
64,8	23,0	32,4	Protein [25,2-44]	43,8	26,1	34,0
55,6	20,3	36,3	Yağ [16-34,2]	34,2	22,8	32,0
136,3	51,1	85,5	Karbonhidrat [81-132]	124,5	81,0	88,4
8,3	3,5	5,9	Ort. Beğeni P.	8,3	5,0	6,3
8,53	5,1	7,2	Ort. Maliyet P.	8,8	5,3	7,1

Karşılaştırma (Çizelge 13) sonucunda önerilen modelin menü besin değerlerini ihlal etmediği gözlenmiştir. Besin değerlerinde gözlemlenen maksimum ve minimum değerler arasındaki farkın el yordamıyla hazırlanan menü planına göre daha düşük olması önerilen modelin daha tutarlı menüler oluşturduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca her iki menü planında yakın ortalama maliyet puanı elde edilmişken önerilen model ile ortalama beğeni puanı göreceli olarak daha yüksektir. Bu sonuç önerilen modelin karar vericiye göre daha hassas ve doğru tercihler yapabildiğini kanıtlamaktadır.

5. Sonuçlar

Bireylerin günlük rutinleri içerisinde vücudun ihtiyaç duyduğu temel besin içeriklerinden yeteri kadar alarak dengeli beslenmeyi sağlamaları oldukça güçtür. Okul, hastane, işyerleri gibi ortak yaşam alanlarında toplu beslenme ile bireylerin dengeli beslenme çabaları desteklenebilir. Bireysel beslenmeye kıyasla toplu beslenmenin sağladığı avantajlar, toplumun beslenme alışkanlıklarının düzenlenmesini ve dengeli beslenmesini amaçlayan kamu politikalarının toplu beslenme sürecini düzenlemeye yönelik çabalarını destekler. Bu kapsamda Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığının hazırladığı "Toplu Beslenme Sistemleri (Toplu Tüketim Yerleri) İçin Ulusal Menü Planlama ve Uygulama Rehberi" başlıklı rehber toplu beslenme sürecine yönelik detaylı yönlendirmeleri kapsamaktadır. Ancak toplu beslenme sürecindeki kurum, hizmet sağlayıcı ve yararlanıcı paydaşlarını tatmin eden

menü planının nasıl hazırlanacağına yönelik sistematik bir yaklaşım sunmamaktadır.

Toplu beslenmede menü planlaması belirli bir planlama periyodunda hangi gün hangi grupta hangi yemeğin planlanacağına çeşitli yan kısıtları dikkate alarak karar verme sürecini kapsamaktadır. Menü planlama literatürü incelendiğinde bireylerin sağlık sorunlarına yönelik olarak diyet menülere odaklanan ve ayrıca hastane, okul gibi ortak yaşam alanlarındaki dengeli ve yeterli beslenmeyi sağlayan menüler oluşturmaya odaklanan çalışmalara rastlanılmaktadır. Bu çalışmalarda bireyin ihtiyaç duyduğu besinleri alması, düşük maliyetli olması ortak amaç olarak belirmektedir. Menü planlama kararını etkileyebilen paydaşların çıkarlarını gözetilen bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada bir üniversite yemekhanesinde kurum, hizmet sağlayıcı ve yararlanıcının çıkarlarını gözetilen menü planlama problemi ele alınmaktadır. Üniversitenin ihale şartnamesi çerçevesinde tanımlanan menü planlama problemi maliyet odaklı, beğeni odaklı veya dengeli menüler hazırlayabilen, hafıza özelliğine sahip ve mevsim etkilerini dikkate alabilen matematiksel model ile çözülmüştür. Modelin sahip olduğu bu özellikler çalışmanın menü planlama literatürüne katkılarını oluşturmaktadır. Pratik uygulamada ise karar vericinin farklı zaman dilimlerinde farklı politikalar ile menü planları hazırlamasına izin vererek paydaşların tatminini en üst düzeye çıkarabilecek bir yapı sunmaktadır.

Çalışmada modelin özellikleri ve temel beklentiler test edilmiş ve uygulanabilirliği doğrulanmıştır. Beğeni ve maliyet odaklı menüler hazırlanmasına olanak tanıyan politika parametresinin menü planı performans parametreleri olan ortalama beğeni ve maliyet puanları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca önerilen model el yordamıyla hazırlanan menü planı ile karşılaştırılarak el yordamıyla hazırlanan menü planının eksiklikleri ortaya konularak ve model sonuçlarının üstünlüğü vurgulanmıştır.

Sonraki çalışmalarda yararlanıcıların günlük yemekhaneden yararlanma olasılıkları planlamaya dahil edilerek maliyet beğeni dengesi gün bazında planlanabilir. Ayrıca online bir platform veya bir cep telefonu uygulaması ile yararlanıcıların menü planlama sürecine dinamik olarak katılımını sağlayacak bir karar destek sistemi hazırlanabilir. Toplu beslenme hizmeti verilen kurumlarda yemek hizmetin kalitesi kurumun kalitesiyle yakından ilişkilidir. Bu nedenle okul, üniversite, hastane, işyeri gibi kurumlarda menü planlamanın iyileştirilmesine yönelik araştırmalar desteklenmelidir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Yazma/inceleme ve düzenleme, Doğrulama, Veri toplama

Yazar 2: Yazma/orijinal taslak, Yazma/inceleme ve düzenleme, Doğrulama, Kavramsallaştırma, Metodoloji

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

Veri kümeleri istek üzerine mevcuttur. Bu makalenin sonuçlarını destekleyen ham veriler, yazarlar tarafından herhangi bir çekince olmaksızın sunulacaktır.

6. Kaynaklar

- Ai Lee, O., Firdaus Sufahani, S., Helmy Abd Wahab, M., Zulkarnain Syed Idrus, S., Surono, S., ve Ahmad, A., 2020. Computerized integer programming method: menu scheduling for critical illness patients. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 917, 1, 012057. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/917/1/012057>
- Baykasoğlu, A., Taşkıran, D., ve Akkoyun, H. G., 2016. Toplu Beslenme İçin Menü Planlama Karar Destek Sistemi Geliştirilmesi ve Uygulanması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31, 1, 191–200. <https://doi.org/10.17341/GUMMFD.74322>

- Ediz, A., ve Yağdıran, Y., 2009. Hedef Programlama Tekniği ile Menü Planlaması. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11, 1, 45–74.
- Eren, T., Kaçmaz, S. Ö., ve Şengül, N., 2018. Hastanelerde Özel Hastalar İçin Bulanık Hedef Programlama ile Menü Planlaması. *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11, 1, 1–37. <https://doi.org/10.20854/BUJSE.330745>
- Guala, S., ve Marenco, J., 2020. Scheduling weekly menus in a hospital with integer programming techniques. *Investigacion Operacional*, 41, 1, 67–79.
- Hamzah, P., Shuib, A., Tumin, H., Shamsudin, M. R., ve MD. Yusof, S., 2011. Two-stage LP diet model for Malay households. *2011 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering, CHUSER 2011*, 562–567. <https://doi.org/10.1109/CHUSER.2011.6163796>
- Handayani, D., Rianti, I. S., Mahesa, F., Hamida, K., Umam, M. R. A., Naura, N. W., Ricky, Gestiovani, I., ve Sabila, S., 2021. A simple mathematical model simulating individual weight based on daily diet menu. *AIP Conference Proceedings*, 2423, 1. <https://doi.org/10.1063/5.0075685>
- Hui, L. S., Sufahani, S. F., Khalid, K., Wahab, M. H. A., Idrus, S. Z. S., Ahmad, A., ve Subramaniam, T. S., 2021. Menu scheduling for high blood pressure patient with optimization method through Integer Programming. *Journal of Physics: Conference Series*, 1874, 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1874/1/012088>
- Ichraf, J., Soulef, S., ve Hichem, K., 2020. Incorporating the decision maker's preferences in Dietary Menu Planning problem. *2020 International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA)*, 806–811. <https://doi.org/10.1109/DASA51403.2020.9317191>
- Jamaludin, M. A., ve Sufahani, S. F., 2022. Nutritious Menu and Nutrient Planning for Avoiding Stroke Disease by Using Optimization Technique. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 348, 45–56. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7597-3_4
- Kaçmaz, S. Ö., Şengül, N., Eren, T., ve Özder, E. H., 2018. Hastanelerde Özel Hastalar İçin Hedef Programlama İle Menü Planlamasını Etkileyen Unsurlar. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 21, 3, 393–422.
- Kallel, D., Kanoun, I., ve Dhoub, D., 2022. The Menu Planning Problem: A Systematic Literature Review. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 418 LNNS, 1313–1324. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96308-8_122
- Körpeli, S., Şahin, B., ve Eren, T., 2012. Hedef Programlama İle Menü Planlaması: Bir Örnek Uygulama. *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2, 1, 121–142.

- Leow, S., Dimmock, J. A., Guelfi, K. J., Alderson, J. A., ve Jackson, B., 2021. Understanding the determinants of stress-induced eating – A qualitative study. *Appetite*, **165**.
<https://doi.org/10.1016/J.APPET.2021.105318>
- Oruç, K. O., 2014. Bulanık Hedef Programlama ile Menü Planlama. *Journal of Management and Economics Research*, **12**, **23**, 33–51.
- Pichugina, O., 2020. Diet-Menu Problem Modelling And Applications. *2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC)*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/SAIC51296.2020.9239149>
- Price, S., 2005. Understanding the importance to health of a balanced diet. *Nursing Times*, **101**, **1**, 30–31.
- Sapri, N. S. M., Bedi, M. R. B. D. S., Abdul-Rahman, S., ve Benjamin, A. M., 2019. A diet recommendation for diabetic patients using integer programming. *AIP Conference Proceedings*, **2138**, **1**.
<https://doi.org/10.1063/1.5121101>
- Seljak, B. K., 2009. Computer-based dietary menu planning. *Journal of Food Composition and Analysis*, **22**, **5**, 414–420.
<https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2009.02.006>
- Sezgin, A. C., ve Özkaya, F. D., 2014. An overview of mass feeding system. *Akademik Gıda*, **12**, **1**, 124–128.
- Spak, M. D. S., ve Colmenero, J. C., 2021. University restaurants menu planning using mathematical modelling. *Journal of Food and Nutrition Research*, **60**, **1**, 38–48.
- T.C. Sağlık Bakanlığı Halk Sağlığı Genel Müdürlüğü., 2020. *Toplu Beslenme Sistemleri (Toplu Tüketim Yerleri) İçin Ulusal Menü Planlama ve Uygulama Rehberi* (1184). Ankara Türkiye.
- Tee, J. Y., ve Sufahani, S. F., 2022. Menu Planning and Scheduling for Vegetarian Breast Cancer Patients in Malaysia Using Optimization Approaches. *Lecture Notes in Networks and Systems*, **348**, 203–212.
https://doi.org/10.1007/978-981-16-7597-3_16
- Türkiye Halk Sağlığı Kurumu., 2013. *Türkiye Sağlıklı Beslenme ve Hareketli Hayat Programı Sağlık Bakanlığı* (773). Ankara Türkiye.



On Reverse and Generalized of Bellman Type Inequality

Bellman Tipi Eşitsizliğin Ters ve Genelleştirilmesi Üzerine

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 09.10.2023

Kabul/Accepted: 06.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Necmettin ALP*,

Düzce Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Düzce

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu çalışmanın amacı, önceki çalışmalar incelendikten sonra dışbükey ve integrallenebilir ve diferansiyellenebilir fonksiyonlar için ters Bellman tipi eşitsizliği elde etmektir. Bununla birlikte Bellman tipi eşitsizliğin genelleştirilmesinin ispatı yapılmıştır. Elde edilen ana sonuçlar yardımıyla dışbükey ve integrallenebilir, diferansiyellenebilir fonksiyonlar üzerine bazı özel durumlar elde edildi. Bu sonuçlar kullanılarak analitik olarak hesaplanması zor integraller için bir alt sınır elde edilmiştir.

Abstract

The aim of this work, to obtain reverse Bellman type inequality for convex and integrable-differentiable functions after examining the previous studies on the Bellman inequality and giving the results that are a source of inspiration for us. With that we proved the generalized of Bellman type inequality. With the help of obtained main results, we have obtained some special cases on convex and integrable-differentiable functions. For convexity we have also included some examples to make these exercises more understandable. On the other hand, we have expressed with examples to obtain a lower bound for hard integrals.

Anahtar Kelimeler: Konvekslik; Eşitsizlikler; İntegral Operatörü; Bellman.

Keywords: Convexity; Inequalities; Integral operator; Bellman.

1. Introduction

Calculus, using different notions of derivatives and integrals of arbitrary order, has become in recent years one of the centers of attention of mathematical researchers, both pure and applied. By other hand, one of the most developed mathematical areas in the last 30 years is that of integral inequalities, associated with different functional notions: convex, q -calculus, synchronous functions within the framework of Riemann, fractional and generalized integral operators (Alp 2021, Delgado et al. 2021, Roberts et al. 1974). Moreover, many research papers have studied the properties of convex functions that make this concept interesting in mathematical analysis. In recent years, important generalizations have been made in the context of convexity: quasi-convex, pseudo-convex, invex and preinvex, strongly convex, approximately convex, MT-convex, $(\alpha; m)$ -convex, and strongly $(s; m)$ -convex (Cristescu and Lupşa 2002, Vivas-Cortez et al. 2020, Youness 1999).

Recently, some studies have been done on the Bellman inequality, which has an important place in the literature on inequalities. Pecaric and Mitronic (Mitronic and Pecaric, 1988, Pecaric 1982) obtained Bellman type generalization of Steffensen's inequalities. In 2014,

Mirzapour (Mirzapour and Moslehian 2014) proved some results on Bellman operator inequality. Moreover in 2013 Morassaei (Morassaei et al. 2013) proved the Bellman operator inequality. In 2014 Iddrisu (Iddrisu et al. 2014) proved Bellman type inequality. On the other hand, in 2020 Sababheh (Sababheh et al. 2020) obtained reversing Bellman operator inequality. The inspiration for this work is the inequality achieved by Iddrisu. The purpose of this paper, to obtain inverse inequality of (4) and prove generalized of (4) with some results. By using this result we obtain upper and lower bounds for integrals.

2. Preliminaries

We begin with convex functions.

Definition 1. (Convex Function). Let real function f be defined on some non-empty interval I of real line \mathbb{R} . The function f said to be convex on I , if the inequality

$$f(tb + (1 - t)a) \leq tf(b) + (1 - t)f(a),$$
$$a, b \in I \text{ and } t \in [0, 1].$$

The following inequality was discovered in 1918 by Steffensen (Steffensen 1947):

Assume that two integrable functions $h(x)$ and $\mathfrak{I}(x)$ are defined on $[a, b]$, that $h(x)$ never increases and that $0 \leq \mathfrak{I}(x) \leq 1$ in (a, b) .

Then

$$\int_a^b h(x)dx \leq \int_a^b h(x)\phi(x)dx$$

$$\leq \int_a^b h(x)dx \tag{1}$$

where $\lambda = \int_a^b \phi(x)dx$.

Bellman in (Bellman 1959) prove the following inequality:

$$\left(\int_a^b \Psi(s)\Lambda(s)ds\right)^p \leq \int_a^{a+c} \Psi^p(s)ds, \tag{2}$$

where $c = a + \left(\int_a^b \Lambda(s)ds\right)^p$.

But, Godunova and Levin in (Godunova and Levin 1968) noted Inequality (2) that the generalisation of Inequality (1) was incorrect. Pecaric (Pecaric 1982) corrected the Bellman generalisation with a narrow subclass. The corrected result is

$$\left(\int_0^1 \Psi(s)\Lambda(s)ds\right)^p \leq \int_0^\lambda \Lambda^p(s)ds, \tag{3}$$

where

$$\lambda = \left(\int_0^1 \Psi(s)ds\right)^p, \Lambda: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$$

is a nonnegative and nonincreasing function, $\Psi: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ is an integrable function with $0 \leq \Psi(x) \leq 1$ and $p \geq 1$, for the proof; see (Pecaric 1982) and the references therein.

Iddrisu et al. (Iddrisu et al. 2014) prove the following refinement of Bellman type inequality:

Theorem 1. Let the function $\Psi: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ be continuous such that $0 \leq \Psi(x) \leq 1$. If $\mathfrak{I}: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ is a convex, differentiable function with $\mathfrak{I}(0) = 0$, then

$$\mathfrak{I}\left(\int_0^1 \Psi(s)ds\right) \leq \int_0^1 \Psi(s)\mathfrak{I}'(s)ds \tag{4}$$

for all $s \in [0,1]$.

The purpose of this paper, to obtain reversi of (4) and prove generalized of (4) with some results. By using obtained our results we obtain lower bounds for integrals.

3. Reverse Bellman Type Inequality

In this section, we prove reverse of Inequality (4) and by following theorems:

Theorem 2 (Reverse Bellman Type Inequality). Assume $\Psi, \mathfrak{I}: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ are integrable-differentiable functions and \mathfrak{I} is convex. For $0 \leq \Psi(t) \leq 1$ and $\mathfrak{I}(0) = 0$, then the following inequality holds:

$$\int_0^1 \Psi(x)\mathfrak{I}'\left(\frac{x}{2}\right)dx + 2\mathfrak{I}\left(\frac{1}{2}\right) - \mathfrak{I}(1)$$

$$\leq \mathfrak{I}\left(\int_0^1 \Psi(x)dx\right). \tag{5}$$

(5) changes direction when \mathfrak{I} is concave.

Proof. Assume $0 \leq \Psi(t) \leq 1$ and

$$0 \leq \int_0^x \Psi(t)dt,$$

$$\frac{x}{2} \leq \frac{1}{2}\left(\int_0^x \Psi(t)dt + x\right).$$

Now choosing $F(x) = \frac{1}{2}\left(\int_0^x \Psi(t)dt + x\right)$, then we have

$$G(x) = \mathfrak{I}(F(x)) = \mathfrak{I}\left\{\frac{1}{2}\left(\int_0^x \Psi(t)dt + x\right)\right\}$$

\mathfrak{I}' is nondecreasing and this yields

$$G'(x) = F'(x)\mathfrak{I}'(F(x))$$

$$= \frac{\Psi(x) + 1}{2}\mathfrak{I}'\left\{\frac{1}{2}\left(\int_0^x \Psi(t)dt + x\right)\right\}$$

$$\geq \frac{\Psi(x) + 1}{2}\mathfrak{I}'\left(\frac{x}{2}\right).$$

By integrating the last inequality on $[0,1]$ and for $\mathfrak{I}(0) = 0$, we get

$$\int_0^x G'(x)dx = G(1) - G(0)$$

$$= \mathfrak{I}\left\{\frac{1}{2}\left(\int_0^1 \Psi(t)dt + 1\right)\right\}$$

$$\geq \int_0^1 \frac{[\Psi(x) + 1]}{2}\mathfrak{I}'\left(\frac{x}{2}\right)dx.$$

Due to convexity of \mathfrak{I} , we obtain

$$\frac{1}{2}\left\{\mathfrak{I}\left(\int_0^1 \Psi(t)dt\right) + \mathfrak{I}(1)\right\}$$

$$\geq \mathfrak{I}\left\{\frac{1}{2}\left(\int_0^1 \Psi(t)dt + 1\right)\right\}$$

$$\begin{aligned} &\geq \int_0^1 \frac{[\Psi(x) + 1]}{2} \mathfrak{Z}'\left(\frac{x}{2}\right) dx \\ &= \frac{1}{2} \int_0^1 \Psi(x) \mathfrak{Z}'\left(\frac{x}{2}\right) dx + \frac{1}{2} \int_0^1 \mathfrak{Z}'\left(\frac{x}{2}\right) dx. \end{aligned}$$

So, we have

$$\begin{aligned} &\mathfrak{Z}\left(\int_0^1 \Psi(t) dt\right) + \mathfrak{Z}(1) \\ &\geq \int_0^1 \Psi(x) \mathfrak{Z}'\left(\frac{x}{2}\right) dx + 2\mathfrak{Z}\left(\frac{1}{2}\right), \end{aligned}$$

i.e.

$$\begin{aligned} &\mathfrak{Z}\left(\int_0^1 \Psi(t) dt\right) \\ &\geq \int_0^1 \Psi(x) \mathfrak{Z}'\left(\frac{x}{2}\right) dx + 2\mathfrak{Z}\left(\frac{1}{2}\right) - \mathfrak{Z}(1). \end{aligned} \tag{6}$$

Thus, the proof is completed. \square

Corollary 1. In (5), assume $\mathfrak{Z}(t) = t^p$ for $p \geq 1$, then we get

$$\begin{aligned} &\frac{p}{2^{p-1}} \int_0^1 x^{p-1} \Psi(x) dx + \frac{1 - 2^{p-1}}{2^{p-1}} \\ &\leq \left(\int_0^1 \Psi(x) dx\right)^p. \end{aligned}$$

4. Generalized Results

In this section we generalize Theorem 1. and 2.

Theorem 3 (Generalized Bellman Type Inequality). Assume $\Psi, \Lambda, \mathfrak{Z} : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ are integrable-differentiable functions and $\mathfrak{Z}(x)$ is a convex. For $\Psi(x) \leq M$, $\Lambda'(t) \geq 0$, and $\mathfrak{Z}(0) = 0$ the following inequality holds

$$\begin{aligned} &\mathfrak{Z}\left(\int_a^b \Lambda'(t) \Psi(t) dt\right) \\ &\leq \int_a^b \Lambda'(t) \Psi(t) \mathfrak{Z}'\{M[\Lambda(t) - \Lambda(a)]\} dt. \end{aligned} \tag{7}$$

where $M \in \mathbb{R}$.

Proof. Assume $m \leq \Psi(x) \leq M$ and $\Lambda'(t) \geq 0$,

$$\Lambda'(t) \Psi(t) \leq \Lambda'(t) M$$

$$\begin{aligned} &\int_a^x \Lambda'(t) \Psi(t) dt \leq M \int_a^x \Lambda'(t) dt \\ &= M[\Lambda(x) - \Lambda(a)]. \end{aligned}$$

Now choosing

$$E(x) = \int_a^x \Lambda'(t) \Psi(t) dt,$$

then, we have

$$H(x) = \mathfrak{Z}(E(x)) = \mathfrak{Z}\left(\int_a^x \Lambda'(t) \Psi(t) dt\right).$$

\mathfrak{Z}' is nondecreasing due to convexity, so this yields

$$\begin{aligned} H'(x) &= E'(x) \mathfrak{Z}'(E(x)) \\ &= \Lambda'(x) \Psi(x) \mathfrak{Z}'\left(\int_a^x \Lambda'(t) \Psi(t) dt\right) \\ &\leq \Lambda'(x) \Psi(x) \mathfrak{Z}'\{M[\Lambda(x) - \Lambda(a)]\}. \end{aligned}$$

By integrating the last inequality on $[a, b]$, we have

$$\begin{aligned} &\int_a^b H'(x) dx \\ &\leq \int_a^b \Lambda'(x) \Psi(x) \mathfrak{Z}'\{M[\Lambda(x) - \Lambda(a)]\} dx. \end{aligned}$$

Since $\mathfrak{Z}(0) = 0$ and

$$\begin{aligned} &\int_a^b H'(x) dx = H(b) - H(a) \\ &= \mathfrak{Z}\left(\int_a^b \Lambda'(t) \Psi(t) dt\right), \end{aligned}$$

and the desired result is achieved as follows

$$\begin{aligned} &\mathfrak{Z}\left(\int_a^b \Lambda'(t) \Psi(t) dt\right) \\ &\leq \int_a^b \Lambda'(x) \Psi(x) \mathfrak{Z}'\{M[\Lambda(x) - \Lambda(a)]\} dx. \end{aligned}$$

Corollary 2. Considering the conditions in Theorem 3, assume $\Lambda(t) = t$ in Inequality (7), then we obtain

$$\mathfrak{Z}\left(\int_a^b \Psi(t) dt\right) \leq \int_a^b \Psi(t) \mathfrak{Z}'\{M[t - a]\} dt. \tag{8}$$

Remark 1. In (8), assume $a = 0$, $b = 1$ and $m = 0 \leq \Psi(x) \leq 1 = M$, then we reach (4).

Corollary 3. In (7), assume $\mathfrak{Z}(t) = t^p$ for $p \geq 1$, then we get

$$\left(\int_a^b \Lambda'(x)\Psi(x)dx \right)^p \tag{9}$$

$$\leq pM^{p-1} \int_a^b \Lambda'(x)\Psi(x)[\Lambda(x) - \Lambda(a)]^{p-1}dx.$$

Corollary 4. In (9), assume $\Lambda(t) = t$, then we get

$$\left(\int_a^b \Psi(x)dx \right)^p \leq pM^{p-1} \int_a^b (x - a)^{p-1}\Psi(x)dx. \tag{10}$$

Example 1. In (10), assume $p = 2$, then we get

$$\left(\int_a^b \Psi(x)dx \right)^2 \leq 2M \int_a^b (x - a)\Psi(x)dx.$$

Theorem 4 (Generalized Reverse Bellman Type Inequality). Assume $\Psi, \Lambda, \mathfrak{I} : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ are integrable-differentiable functions and $\mathfrak{I}(x)$ is a convex. For $m \leq \Psi(x)$, $\Lambda'(x) \geq 0$, and $\mathfrak{I}(0) = 0$ the following inequality holds

$$\int_a^b \Lambda'(x)\Psi(x)\mathfrak{I}'\left(\frac{(m+1)\Lambda(x) - m\Lambda(a)}{2}\right)dx \tag{11}$$

$$+ \frac{2}{(m+1)} \left[\mathfrak{I}\left(\frac{(m+1)\Lambda(b) - m\Lambda(a)}{2}\right) + m\mathfrak{I}\left(\frac{\Lambda(a)}{2}\right) \right]$$

$$- \mathfrak{I}(\Lambda(b))$$

$$\leq \mathfrak{I}\left(\int_a^b \Lambda'(x)\Psi(x)dx\right),$$

where $m \in \mathbb{R}$.

Proof. Assume $m \leq \Psi(x)$ and $\Lambda'(t) \geq 0$, then we write

$$m\Lambda'(t) \leq \Lambda'(t)\Psi(t),$$

$$m[\Lambda(x) - \Lambda(a)] \leq \int_a^x \Lambda'(t)\Psi(t)dt,$$

$$\frac{m[\Lambda(x) - \Lambda(a)] + \Lambda(x)}{2}$$

$$\leq \frac{1}{2} \left(\int_a^x \Lambda'(t)\Psi(t)dt + \Lambda(x) \right).$$

Now, choosing $K(x) = \frac{1}{2} \left(\int_a^x \Lambda'(t)\Psi(t)dt + \Lambda(x) \right)$, then we have

$$T(x) = \mathfrak{I}(K(x))$$

$$= \mathfrak{I}\left\{ \frac{1}{2} \left(\int_a^x \Lambda'(t)\Psi(t)dt + \Lambda(x) \right) \right\}.$$

\mathfrak{I}' is nondecreasing and this yields

$$T'(x) = K'(x)\mathfrak{I}'(K(x))$$

$$= \frac{1}{2}(\Lambda'(x)\Psi(x) + \Lambda'(x))$$

$$\times \mathfrak{I}'\left\{ \frac{1}{2} \left(\int_a^x \Lambda'(t)\Psi(t)dt + \Lambda(x) \right) \right\}$$

$$\geq \frac{1}{2}(\Lambda'(x)\Psi(x) + \Lambda'(x))$$

$$\times \mathfrak{I}'\left\{ \frac{m[\Lambda(x) - \Lambda(a)] + \Lambda(x)}{2} \right\}.$$

If the last inequality integrate on $[a, b]$, the following inequality is obtained

$$\int_a^b G'(x)dx = G(b) - G(a)$$

$$= \mathfrak{I}\left\{ \frac{1}{2} \left(\int_a^b \Lambda'(t)\Psi(t)dt + \Lambda(b) \right) \right\} - \mathfrak{I}\left(\frac{\Lambda(a)}{2}\right)$$

$$\geq \frac{1}{2} \int_a^b \{\Lambda'(x)[\Psi(x) + 1]\}$$

$$\times \mathfrak{I}'\left(\frac{m[\Lambda(x) - \Lambda(a)] + \Lambda(x)}{2}\right) dx,$$

i.e.

$$\mathfrak{I}\left\{ \frac{1}{2} \left(\int_a^b \Lambda'(t)\Psi(t)dt + \Lambda(b) \right) \right\}$$

$$\geq \frac{1}{2} \int_a^b \{\Lambda'(x)[\Psi(x) + 1]\}$$

$$\times \mathfrak{I}'\left(\frac{m[\Lambda(x) - \Lambda(a)] + \Lambda(x)}{2}\right) dx + \mathfrak{I}\left(\frac{\Lambda(a)}{2}\right).$$

Due to convexity of \mathfrak{I} , we obtain

$$\frac{1}{2} \mathfrak{I}\left(\int_a^b \Lambda'(t)\Psi(t)dt\right) + \frac{1}{2} \mathfrak{I}(\Lambda(b))$$

$$\begin{aligned} &\geq \mathfrak{S} \left\{ \frac{1}{2} \left(\int_a^b \Lambda'(t) \Psi(t) dt + \Lambda(b) \right) \right\} \\ &\geq \frac{1}{2} \int_a^b \{ \Lambda'(x) [\Psi(x) + 1] \\ &\times \mathfrak{S}' \left(\frac{m[\Lambda(x) - \Lambda(a)] + \Lambda(x)}{2} \right) \} dx + \mathfrak{S} \left(\frac{\Lambda(a)}{2} \right). \end{aligned}$$

So, the following inequality is obtained

$$\begin{aligned} &\mathfrak{S} \left(\int_a^b \Lambda'(t) \Psi(t) dt \right) \tag{12} \\ &\geq \int_a^b \{ \Lambda'(x) [\Psi(x) + 1] \\ &\times \mathfrak{S}' \left(\frac{m[\Lambda(x) - \Lambda(a)] + \Lambda(x)}{2} \right) \} dx \\ &+ 2\mathfrak{S} \left(\frac{\Lambda(a)}{2} \right) - \mathfrak{S}(\Lambda(b)). \end{aligned}$$

By editing the integral in right side of (12), we get

$$\begin{aligned} &\int_a^b \{ \Lambda'(x) [\Psi(x) + 1] \\ &\times \mathfrak{S}' \left(\frac{\Lambda(x)[m + 1] - m\Lambda(a)}{2} \right) \} dx \tag{13} \\ &= \int_a^b \Lambda'(x) \Psi(x) \mathfrak{S}' \left(\frac{\Lambda(x)[m + 1] - m\Lambda(a)}{2} \right) dx \\ &+ \int_a^b \Lambda'(x) \mathfrak{S}' \left(\frac{\Lambda(x)[m + 1] - m\Lambda(a)}{2} \right) dx \\ &= \int_a^b \Lambda'(x) \Psi(x) \mathfrak{S}' \left(\frac{\Lambda(x)[m + 1] - m\Lambda(a)}{2} \right) dx \\ &+ \frac{2}{m + 1} \cdot \frac{m + 1}{2} \int_a^b \Lambda'(x) \mathfrak{S}' \left(\frac{\Lambda(x)[m + 1] - m\Lambda(a)}{2} \right) dx \\ &= \int_a^b \Lambda'(x) \Psi(x) \mathfrak{S}' \left(\frac{\Lambda(x)[m + 1] - m\Lambda(a)}{2} \right) dx \\ &+ \frac{2}{m + 1} \mathfrak{S} \left(\frac{[m + 1]\Lambda(b) - m\Lambda(a)}{2} \right) \\ &- \frac{2}{m + 1} \mathfrak{S} \left(\frac{[m + 1]\Lambda(a) - m\Lambda(a)}{2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \int_a^b \Lambda'(x) \Psi(x) \mathfrak{S}' \left(\frac{\Lambda(x)[m + 1] - m\Lambda(a)}{2} \right) dx \\ &+ 2 \frac{\mathfrak{S} \left(\frac{(m+1)\Lambda(b) - m\Lambda(a)}{2} \right) - \mathfrak{S} \left(\frac{\Lambda(a)}{2} \right)}{m + 1}. \end{aligned}$$

If (13) is substituted in (12), we get

$$\begin{aligned} &\mathfrak{S} \left(\int_a^b \Lambda'(t) \Psi(t) dt \right) \\ &\geq \int_a^b \{ \Lambda'(x) [\Psi(x) + 1] \\ &\times \mathfrak{S}' \left(\frac{m[\Lambda(x) - \Lambda(a)] + \Lambda(x)}{2} \right) \} dx \\ &+ 2\mathfrak{S} \left(\frac{\Lambda(a)}{2} \right) - \mathfrak{S}(\Lambda(b)) \\ &= \int_a^b \Lambda'(x) \Psi(x) \mathfrak{S}' \left(\frac{\Lambda(x)[m + 1] - m\Lambda(a)}{2} \right) dx \\ &+ 2 \frac{\mathfrak{S} \left(\frac{(m+1)\Lambda(b) - m\Lambda(a)}{2} \right) - \mathfrak{S} \left(\frac{\Lambda(a)}{2} \right)}{m + 1} \\ &+ 2\mathfrak{S} \left(\frac{\Lambda(a)}{2} \right) - \mathfrak{S}(\Lambda(b)) \\ &= \int_a^b \Lambda'(x) \Psi(x) \mathfrak{S}' \left(\frac{\Lambda(x)[m + 1] - m\Lambda(a)}{2} \right) dx \\ &+ \frac{2}{m + 1} \mathfrak{S} \left(\frac{(m + 1)\Lambda(b) - m\Lambda(a)}{2} \right) \\ &+ \frac{2m}{m + 1} \mathfrak{S} \left(\frac{\Lambda(a)}{2} \right) - \mathfrak{S}(\Lambda(b)). \end{aligned}$$

Thus, the desired result is achieved and the proof is completed.

Remark 2. In (11), assume $a = 0, b = 1, \Lambda(x) = x$ and $m = 0 \leq \Psi(x) \leq 1 = M$ we reach (5).

Corollary 5. Considering the conditions in Theorem 4, in (11), assume $\Lambda(t) = t$ we obtain

$$\begin{aligned} &\int_a^b \Psi(x) \mathfrak{S}' \left(\frac{(m + 1)x - ma}{2} \right) dx \\ &+ \frac{2}{(m+1)} \left[\mathfrak{S} \left(\frac{(m+1)b - ma}{2} \right) + m\mathfrak{S} \left(\frac{a}{2} \right) \right] - \mathfrak{S}(b) \\ &\leq \mathfrak{S} \left(\int_a^b \Psi(x) dx \right), \end{aligned}$$

where $m \in \mathbb{R}$.

Corollary 6. In (11), assume $\mathfrak{I}(t) = t^p$, for $p \geq 1$ then we get

$$\begin{aligned} & \frac{p}{2^{p-1}} \int_a^b \Lambda'(x) \Psi(x) ((m+1)\Lambda(x) - m\Lambda(a))^{p-1} dx \\ & + \frac{2}{(m+1)} \left[\left(\frac{(m+1)\Lambda(b) - m\Lambda(a)}{2} \right)^p + m \left(\frac{\Lambda(a)}{2} \right)^p \right] \\ & - (\Lambda(b))^p \\ & \leq \left(\int_a^b \Lambda'(x) \Psi(x) dx \right)^p, \end{aligned} \tag{14}$$

where $m \in \mathbb{R}$.

Corollary 7. In (14), assume $\Lambda(t) = t$ then we get

$$\begin{aligned} & \frac{p}{2^{p-1}} \int_a^b \Psi(x) ((m+1)x - ma)^{p-1} dx \\ & + \frac{((m+1)b - ma)^p + ma^p - 2^{p-1}(m+1)b^p}{2^{p-1}(m+1)} \\ & \leq \left(\int_a^b \Psi(x) dx \right)^p. \end{aligned} \tag{15}$$

Corollary 8. In (15), assume $p = 2$ then we get

$$\begin{aligned} & \int_a^b \Psi(x) ((m+1)x - ma) dx \\ & + \frac{((m+1)b - ma)^2 + ma^2 - 2(m+1)b^2}{2(m+1)} \\ & \leq \left(\int_a^b \Psi(x) dx \right)^2. \end{aligned} \tag{16}$$

Finally, we give some examples to calculate some bound value for hard integrals using the obtained results.

Example 2. By using (16) we obtain a lower bound for $\int_a^b e^{x^2} dx$ as follows

$$\begin{aligned} & \int_a^b x e^{x^2} dx - \frac{b^2}{2} \leq \left(\int_a^b e^{x^2} dx \right)^2, \\ & \sqrt{\frac{e^{b^2} - e^{a^2} - b^2}{2}} \leq \int_a^b e^{x^2} dx. \end{aligned}$$

Example 3. By using (16) we obtain a lower bound for $\int_a^b \sin(x^2) dx$ as follows

$$\begin{aligned} & \int_a^b x \sin(x^2) dx - \frac{b^2}{2} \leq \left(\int_a^b \sin(x^2) dx \right)^2, \\ & \sqrt{\frac{\sin(a^2) - \sin(b^2) - b^2}{2}} \leq \int_a^b \sin(x^2) dx. \end{aligned}$$

5. Conclusion

In this research, we have proved generalized of Bellman type inequality and obtained Reverse Bellman type inequality with some more results for convex functions. We also get some bounds for hard integrals with examples. Our results can be applied to other analyses especially q-calculus. Similar inequalities in convexity types (for example, quasi-convex, pseudo-convex, invex, preinvex, strongly convex, approximately convex, MT-convex, $(\alpha; m)$ -convex, strongly $(s; m)$ -convex) can be investigated. Moreover, similar results on the Time Scale can be explored.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, Methodology/Study design, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data curation, Writing—original draft, Writing—review and editing, Visualization, Supervision

Declaration of Competing Interest

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

Data Availability Statement

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

Acknowledgement

The author would like to thank the reviewers for evaluating and enriching this paper with their ideas, and the journal editors for their interest and effort.

6. References

- Alp, N., 2021. Wirtinger type q-Integral Inequalities On q-Calculus. *Math. Meth. Appl. Sci.*, 1–12. <https://doi.org/10.1002/mma.7643>
- Bellman, R., 1959. On inequalities with alternating signs. *Proc. Amer. Math. Soc.* **10**, 807-809.
- Cristescu, G. And Lupsa, L., 2002. Non-connected Convexities and Applications. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

- Delgado, J. G. G., Valdes, J. E. N. and Reyes, E. P., 2021. Several integral inequalities for generalized Riemann-Liouville fractional operators. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A1 Mathematics and Statistics*, **70.1**: 269-278. <https://doi.org/10.31801/cfsuasmas.771172>
- Godunova, E. K. and Levin V. I., 1968. A general class of inequalities containing Steffensen's inequality. *Mat. Zametki* **3**, 339-344.
- Iddrisu, M. M., Okpoti, C. A., and Gbolagade, K. A., 2014. Geometrical proof of new Steffensen's inequality and applications. *Adv. Inequal. Appl.*, **23**, 2050-7461.
- Mitrinović, D. S., and Pečarić, J. E., 1988. On the Bellman generalization of Steffensen's inequality. III. *Journal of mathematical analysis and applications* **135.1**, 342-345. [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(88\)90158-8](https://doi.org/10.1016/0022-247X(88)90158-8)
- Mirzapour, F., Morassaei, A. and Moslehian, M.S., 2014. More on operator Bellman inequality. *Quaest. Math.*, **37**, 9-17. <https://doi.org/10.2989/16073606.2013.779965>
- Morassaei, A., Mirzapour, F. and Moslehian, M.S., 2013. Bellman inequality for Hilbert space operators. *Linear Algebra Appl.*, **438**, 3776-3780. <https://doi.org/10.1016/j.laa.2011.06.042>
- Pecaric, J. E., 1982. On the Bellman Generalization of Steffensen's Inequality, *J. Math. Anal. Appl.* **88**, 505-507. [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(82\)90208-6](https://doi.org/10.1016/0022-247X(82)90208-6)
- Roberts, A.W. and Varberg, D.E., 1973. *Convex Functions*, Academic Press, **300pp**, New York.
- Sababheh, M., Moradi, H. R. and Furuichi, S., 2020. Reversing Bellman operator inequality. *J. Math. Inequal*, **14.2**: 577-584. <https://doi.org/10.7153/jmi-2020-14-36>
- Steffensen, J., 1947. Bounds of certain trigonometric integrals. *Tenth Scandinavian Mathematical congress*, 181-186, Copenhagen, Hellerup.
- Vivas-Cortez, M., Abdeljawad, T. and Mohammed, P. O., 2020. Simpson's integral inequalities for twice differentiable convex functions. *Math. Probl. Eng.*, 1936461,1-15. <https://doi.org/10.1155/2020/1936461>
- Youness, E. A., 1999. E-convex sets, E-convex functions, and E-convex programming. *J. Optim. Theory Appl.*, **102**, 439-450. <https://doi.org/10.1023/A:1021792726715>



Rasyonel Regle Yüzeylerin Afin Denklikleri ve Simetrilerinin Tespiti Üzerine Yeni ve Etkili Bir Algoritma

A New and Efficient Algorithm for Detecting Affine Equivalences and Symmetries of Ruled Rational Surfaces

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 11.10.2023

Kabul/Accepted: 06.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Hüsnü Anıl ÇOBAN^{1*}, Uğur GÖZÜTOK²

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü, Trabzon, Türkiye

²Milli Savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu, Temel Bilimler Bölümü, İstanbul, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu çalışmada, rasyonel parametrizasyonlar yardımıyla verilen iki regle yüzey arasındaki tüm afin denklikleri hesaplayan yeni ve etkili bir yöntem sunulmaktadır. Yöntem, temelde, afin diferansiyel invariantsı kullanılarak denklikleri tespit etmektedir. Bu sayede, benzer problemi çözen metodlardan farklı olarak hesaplamayı zorlaştıran ve hesaplama süresinin uzamasına sebep olan polinom sistemi çözümlerine ihtiyaç duymamaktadır. Bu yöntem bir algoritma haline getirilmiş ve yöntemin performansı *MapleTM* (2021) bilgisayar cebir sistemi kullanılarak, geniş kapsamlı testlerle incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Regle yüzeyler; Afin denklik; Afin simetri; Algoritma.

Abstract

A novel and efficient method for computing all affine equivalences between two ruled surfaces using rational parameterizations is presented in this paper. The technique essentially uses affine differential invariants to find equivalences in contrast to other methods, our method does not require polynomial system solutions, which complicate computations and increase computation time. The performance of the method was thoroughly tested using the *MapleTM* (2021) computer algebra system after it had been transformed into an algorithm.

Keywords: Ruled surfaces; Affine equivalence; Affine symmetry; Algorithm.

1. Giriş

Bir yüzeye, bir afin dönüşüm uygulanarak elde edilen ikinci yüzeye birinci yüzeyin afin dengidir, ya da iki yüzey afin denktir denir. Afin denkliklerin belirlenmesi, Bilgisayarlı Görü ve Örüntü Tanıma gibi alanlarda oldukça önemlidir. Çünkü bu alanlarda nesnelere bir veri tabanında depolanır. Daha az depolama kapasitesi kullanmak için nesnelere, belli bir dönüşüm altında bilinen nesne ile ilişkilendirmeye ihtiyaç duyulur. Dahası Afin denkliklerin/simetrilerin tespiti ile iki nesne arasındaki tüm izometrilere, simetrilere (merkezi simetriler, bir düzleme göre yansımalar, dönel simetriler) de belirlenmiş olur. Örneğin bir yüzeyin simetrilerinin bilinmesi, yüzeyin geometrisini anlamak için ve hatta yüzeyi doğru bir şekilde görselleştirebilmek için oldukça faydalıdır. Bundan dolayı görüntü depolama, nesne tespiti gibi işlemlerde etkin olarak kullanılır. Bu durum, birçok metodun geliştirilmesine yol açmıştır. Son yıllarda birçok makale, eğriler ve yüzeyler için benzer problemleri ele almıştır (Alcázar vd. 2015, Alcázar ve Hermoso 2016, Alcázar ve Goldman 2017, Alcázar ve Quintero 2020, Alcázar vd.

2022, Bizzarri et al. 2020, Chen et al. 2001, Chen and Wang 2003, Gözütok vd. 2023, Hauer ve Jüttler 2018, Hauer vd. 2018, Perez-Díaz ve Shen 2014).

Bunlardan Alcázar ve Quintero (2020), Chen vd. (2001), Chen ve Wang (2003), Perez-Díaz ve Shen (2014)' in çalışmalarında doğrudan regle yüzeyler araştırılmıştır.

Bu çalışmada, Alcázar ve Quintero (2020)' de elde edilen bulgulardan yararlanarak geliştirilen yeni ve etkili bir yöntem sunulmaktadır. Yöntem, benzer problemi ele alan diğer çalışmalardan farklı olarak, Alcázar vd. (2015) çalışmasından esinlenilerek ilk kez Gözütok vd. (2023) çalışmasında sunulan, denklik problemine diferansiyel invariantsı yardımıyla çözüm arayan bir yaklaşıma dayanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde çok bilinmeyenli, yüksek dereceli, zorlu denklem sistemi çözümünden kaçınılmış olmaktadır.

Her denklik problemi, dönüşümün kendine has özelliklerinden dolayı farklı bir diferansiyel invariantsı fonksiyon kümesine ihtiyaç duymaktadır. Bu da elde edilen invariantsların diğer denklik problemlerinde elde

edilenlerden farklı ve yeni olmasını sağlamaktadır. Ayrıca oluşturulan algoritma yardımıyla elde edilen test sonuçları da yöntemin bu konudaki benzer çalışmalara oranla ne kadar etkili olduğunu kanıtlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Ön bilgiler

S_1, S_2 , aşağıda verildiği gibi, standart formda reel rasyonel parametrisasyonlar r_1, r_2 yardımıyla tanımlanan iki regle yüzey olsun.

$$r_i(t, s) = x_i(t) + sy_i(t) \quad (1)$$

Perez-Diaz ve Shen (2014) çalışmasında verilen bir algoritma ile, standart formda verilmemiş bir regle yüzeyin standart forma dönüştürülmesi sağlanmıştır. Burada, $x_i(t)$ taban eğrisi (the base curve) ve $y_i(t)$ ise gösterge eğrisi (the director curve) olarak adlandırılır (O' Neill 2006).

Bu aşamadan sonra, S regle yüzeyinin çift katlı regle yüzey (düzlem, hiperbolik paraboloid ve tek kanatlı hiperboloid) olmadığını varsayacağız. Çünkü, paraboloidlerin ve hiperboloidlerin afin denklikleri, onların kapalı denklemleri yardımıyla kolayca belirlenebilmektedir. Ayrıca her bir regle yüzey parametrisasyonu uygun, yani en fazla yüzeyin bir boyutlu alt kümesi hariç birebir, olduğunu kabul edeceğiz. Bunların yanında, $y_i(t)$ nin bileşeni olan üç polinomun en büyük ortak böleninin 1 olduğunu varsayacağız. Böylece, parametre değişimi tersinir olduğundan, bir parametrisasyon uygun ise diğeri de uygun olacaktır.

Eğer $f(S_1) = S_2$ olacak şekilde $f(r) = Mr + B$, $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ bir regüler kare matris ($\det(M) \neq 0$), $r \in \mathbb{R}^3$ ve $B \in \mathbb{R}^3$ şeklinde tanımlanan bir $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ tersinir afin dönüşümü varsa S_1, S_2 yüzeylerine afin denktirler denir. Burada, M matrisi bir ortogonal matris ise f dönüşümü yüzeyler arasındaki izometriyi; $\lambda \neq 0$ ve N bir ortogonal matris olmak üzere $M = \lambda N$ ise f dönüşümü yüzeyler arasındaki benzerliği tanımlar. Eğer $S_1 = S_2$ ise, bu takdirde birimden farklı f dönüşümü S_1 in simetrisini tanımlar.

2.2. Regle yüzeylerin afin denklikleri

S_1 ve S_2 , (1) denklemindekine benzer şekilde, sırasıyla, r_1 ve r_2 ile parametrelenmiş ve 2.1. Ön bilgiler bölümünde verilen şartları sağlayan iki reel rasyonel regle yüzey olsun. Aşağıda verilen teorem iki regle yüzey arasındaki afin

denkliği parametrelenişleri arasındaki denkleme indirgediği için çok önemlidir.

Teorem. S_1 ve S_2 reel rasyonel regle yüzeyleri, (1) denklemindekine benzer şekilde, sırasıyla, r_1 ve r_2 ile parametrelenmiş olsun. Bir $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$, $f(r) = Mr + B$, burada M , 3×3 tipinde bir regüler matris ve $B \in \mathbb{R}^3$ şeklinde tanımlanan dönüşüm için $f(S_1) = S_2$ (S_1, S_2 afin denk) dir ancak ve ancak bir $\mu: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ birasyonel dönüşümü vardır öyle ki aşağıda verilen diyagram değişmelidir (commutative).

$$\begin{array}{ccc} S_1 & \xrightarrow{f} & S_2 \\ r_1 \uparrow & & \uparrow r_2 \\ \mathbb{R}^2 & \xrightarrow{\mu} & \mathbb{R}^2 \end{array}$$

Bir başka değişle,

$$f(r_1(t, s)) = r_2(\mu(t, s)) \quad (2)$$

dir.

İspat. Bu teoremin bir ispatı Alcázar ve Quintero (2020) makalesinde verilmiştir. ■

Buradaki birasyonel μ dönüşümü Cremona dönüşümü olarak isimlendirilir. Alcázar ve Quintero (2020) makalesinin 3. Bölüm'ünde S_1 ve S_2 yüzeylerinin afin denk ve regle olmalarını kullanarak μ Cremona dönüşümünün

$$\mu(t, s) = (\varphi(t), k(\gamma t + \delta)^n s + c(t)) \quad (3)$$

şeklinde olduğu gösterilmiştir. Burada $\varphi(t) = \frac{\alpha t + \beta}{\gamma t + \delta}$, $\alpha \delta - \gamma \beta \neq 0$ şeklinde tanımlanan iyi bilinen Möbius dönüşümü; k , bir sabit; $c(t)$, bir rasyonel fonksiyon; n ise q_i yi oluşturan polinomların derecelerinin en büyüğüdür. Böylece, (2) ve (3) denklemlerini kullanarak,

$$\begin{aligned} M(x_1(t) + sy_1(t)) + B &= \\ &= x_2(\varphi(t)) + (k(\gamma t + \delta)^n s + c(t))y_2(\varphi(t)) \end{aligned}$$

elde edilir. İfadenin her iki tarafı s ye göre lineer olduğundan,

$$Mx_1(t) + B = x_2(\varphi(t)) + c(t)y_2(\varphi(t)) \quad (4)$$

ve

$$My_1(t) = k(\gamma t + \delta)^n y_2(\varphi(t)) \quad (5)$$

eşitlikleri elde edilir. Böylece iki regle yüzeyin afin denliği, bu iki regle yüzeyin dayanak ve gösterge eğrilerinin afin denliğine indirgenmiş olur.

2.3. Metot ve strateji

Dolayısı ile problem, 2.1. *Ön bilgiler* bölümündeki şartları sağlayan iki rasyonel regle yüzeyin denliğinden (4) ve (5) denklemleri ile verilen iki farklı eğrinin afin denliğine dönüşür. Fakat, burada (4) denklemi ile verilen denklik, $c(t)$ rasyonel fonksiyonunun bilinmemesinden ve eşitliğin bir tarafında sadece dayanak eğrisi verisi varken diğer tarafında hem dayanak hem de gösterge eğrisi verisi bulunmasından dolayı incelenmesi zor bir denklidir. Bundan dolayı öncelikle (5) denklemi ile verilen yani sadece gösterge eğrileri arasındaki denklik ifadesini ele alacağız. Alcázar ve Quintero (2020) da uygulanan metottan bu aşamadan sonra ayrıışmaktayız. Bunun için;

1. *İnvariant (değişmez) fonksiyonlar.* Bir parametrizasyonun kendisi ve türevlerini içeren determinantlar yardımıyla yazılan altı rasyonel fonksiyon ile yola çıkıyoruz. Bu fonksiyonları $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ ile göstereyim. Bu sayede, $1 \leq i \leq 6$ için,

$$I_i(y_1(t)) = I_i(k(\gamma t + \delta)^n y_2(\varphi(t))) \quad (6)$$

elde edilir. Burada, $\alpha\delta - \gamma\beta \neq 0$ olacak şekilde $\varphi(t) = \frac{\alpha t + \beta}{\gamma t + \delta}$ ve n ise y_i yi (Afin denk olduklarından $derece(y_1(t)) = derece(y_2(t))$ dir.) oluşturan polinomların derecelerinin en büyüğüdür. Denklem (6)'daki değişkenleri k ve $\varphi(t)$ nin katsayıları olan bir denklem sistemi ortaya çıkarır. Fakat, bu sistem yüksek derecededir ve çözümde kaçındığımız uzun hesaplama süreleriyle karşılaşmamıza sebep olur.

2. *Möbius dönüşümünden etkilenmeyen afin invariant fonksiyonlar.* Büyük polinom sistemlerinin çözümü ile uğraşmamak için, I_i lerden iki rasyonel fonksiyon üreteceğiz. Bu invariant fonksiyonları $R\kappa_1$ ve $R\kappa_2$ ile göstereceğiz. $i \in \{1,2\}$ için bu invariantlar aşağıda verilen eşitliği sağlarlar;

$$R\kappa_i(y_1(t)) = R\kappa_i(k(\gamma t + \delta)^n y_2(\varphi(t))).$$

Burada elde edilen yeni fonksiyonların getirdiği avantaj,

$$I_i(k(\gamma t + \delta)^n y_2(\varphi)) \neq I_i(y_2) \circ \varphi(t)$$

iken

$$R\kappa_i(k(\gamma t + \delta)^n y_2(\varphi(t))) = R\kappa_i(y_2) \circ \varphi(t)$$

eşitliğini sağlamasıdır. Devamında, $R\kappa_i$ lerden elde edilen iki polinomun gcd (*greatest common divisor*) si hesaplanır. Elde edilen polinomu çarpanlara ayırarak istenilen sonuç, yani φ nin katsayıları elde edilir.

3. φ Möbius dönüşümünü (5) denkleminde yerine yazarak k ya bağlı \mathcal{M} matrisi elde edilir. Geriye, (4) denklemini kullanarak k , $c(t)$ ve B nin bulunması kalır. Bunun için de (4) denkleminin her iki tarafının t ye göre türevi alınır ve ortaya çıkan eşitliklerinden sırasıyla k sabiti ve $c(t)$ fonksiyonu elde edilir. Elde edilenlerin hepsi (4) denkleminde yerine yazılarak B vektörü hesaplanır.

3. Bulgular

3.1. Afin invariantların belirlenmesi

I_i afin invariantların inşası Gözütok vd. (2023) makalesi Bölüm 3.2. dekinе benzerdir. Bu takdirde, (5) denklemine geri dönerek, $z = y_1(t)$ ve $w = (\gamma t + \delta)^n y_2(\varphi(t))$, yazalım. Böylece (5) denklemi, $\mathcal{M} := \frac{1}{k}M$ şeklinde bir tanımlamayla, $\mathcal{M}z = w$ olarak yazılabilir. Bu denklemin art arda t ye göre türevinin alınmasıyla $D(z) = [z \ z' \ z'']$ ve $D(w) = [w \ w' \ w'']$ olmak üzere $\mathcal{M}D(z) = D(w)$ eşitliği elde edilir. $D(z)$ ve $D(w)$ tersinir olduğundan, $\mathcal{M} = D(w)D(z)^{-1}$ yazılabilir. Denklem t ye göre türevini alarak ve \mathcal{M} matrisinin bileşenlerinin sabit olduğunu da hesaba katarak,

$$\frac{d(D(w)D(z)^{-1})}{dt} = 0 \quad (7)$$

elde edilir. (7) eşitliğinin sol tarafındaki türevi açarak

$$D(z)^{-1} \frac{dD(z)}{dt} = D(w)^{-1} \frac{dD(w)}{dt} \quad (8)$$

eşitliğine ulaşılır. Bu eşitliğin sol taraf Z ile, sağ tarafı W ile işaretlenirse,

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\|z'''\ z' \ z''\|}{\|z \ z' \ z''\|} \\ 0 & 1 & \frac{\|z \ z'''\ z''\|}{\|z \ z' \ z''\|} \\ 0 & 0 & \frac{\|z \ z' \ z'''\|}{\|z \ z' \ z''\|} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\|w'''\ w' \ w''\|}{\|w \ w' \ w''\|} \\ 0 & 1 & \frac{\|w \ w'''\ w''\|}{\|w \ w' \ w''\|} \\ 0 & 0 & \frac{\|w \ w' \ w'''\|}{\|w \ w' \ w''\|} \end{bmatrix} \quad (10)$$

elde edilir. Z matrisinin son sütununda ortaya çıkan rasyonel ifadeleri sırasıyla $I_1(u) := \frac{\|z'''\ z' \ z''\|}{\|z \ z' \ z''\|}$, $I_2(u) :=$

$\frac{\|z z''' z''\|}{\|z z' z''\|}$ ve $I_3(u) := \frac{\|z z' z'''\|}{\|z z' z''\|}$ ile gösterelim. Burada, $\|z z' z''\|$, özdeşçe sıfır olmadığından (2.1. Ön Bilgiler bölümündeki şartlar sağlandığında) $1 \leq i \leq 3$ için I_i ler iyi tanımlıdır. (8) denkleminde, yani Z ve W matrislerinin eşitliğinden $1 \leq i \leq 3$ için $I_i(z) = I_i(w)$ dir, yani $I_i(y_1(t)) = I_i((\gamma t + \delta)^n y_2(\varphi(t)))$ dir. Fakat, burada özel yapısından dolayı afin denklik için ek olarak $I_4 := \frac{\|z z'''' z''\|}{\|z z' z''\|}$, $I_5 := \frac{\|z z' z''''\|}{\|z z' z''\|}$ ve $I_6 := \frac{\|z z' z'''''\|}{\|z z' z''\|}$ şeklinde tanımlı üç tane daha invariant fonksiyona ihtiyaç duyulmaktadır.

3.2. Möbiüs dönüşümünden etkilenmeyen Rk_1 ve Rk_2 afin invariant fonksiyonlar

Bu fonksiyonları elde etmek için öncelikle, Möbiüs dönüşümünün paydası $\hbar := \gamma t + \delta$, $\Delta := \alpha\delta - \beta\gamma$ ve $\tilde{y}_2(t) := \hbar^n y_2(\varphi(t))$ ile gösterilip, $\tilde{y}_2(t)$ nin t ye göre türevi alınırsa zincir kuralından,

$$(\tilde{y}_2(t))' = n\gamma \hbar^{n-1} y_2(\varphi(t)) + \Delta \hbar^{n-2} y_2'(\varphi(t))$$

$$\begin{aligned} (\tilde{y}_2(t))'' &= n(n-1)\gamma^2 \hbar^{n-2} y_2(\varphi(t)) \\ &+ 2(n-1)\gamma \Delta \hbar^{n-3} y_2'(\varphi(t)) \\ &+ \Delta^2 \hbar^{n-4} y_2''(\varphi(t)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\tilde{y}_2(t))''' &= n(n-1)(n-2)\gamma^3 \hbar^{n-3} y_2(\varphi(t)) \\ &+ 3(n-1)(n-2)\gamma^2 \Delta \hbar^{n-4} y_2'(\varphi(t)) \\ &+ 3(n-2)\gamma \Delta^2 \hbar^{n-5} y_2''(\varphi(t)) \\ &+ \Delta^3 \hbar^{n-6} y_2'''(\varphi(t)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\tilde{y}_2(t))'''' &= n(n-1)(n-2)(n-3)\gamma^4 \hbar^{n-4} y_2(\varphi(t)) \\ &+ 4(n-1)(n-2)(n-3)\gamma^3 \Delta \hbar^{n-5} y_2'(\varphi(t)) \\ &+ 6(n-2)(n-3)\gamma^2 \Delta^2 \hbar^{n-6} y_2''(\varphi(t)) \\ &+ 4(n-3)\gamma \Delta^3 \hbar^{n-7} y_2'''(\varphi(t)) \\ &+ \Delta^4 \hbar^{n-8} y_2''''(\varphi(t)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\tilde{y}_2(t))''''' &= n(n-1)(n-2)(n-3)(n-4)\gamma^5 \hbar^{n-5} y_2(\varphi(t)) \\ &+ 5(n-1)(n-2)(n-3)(n-4)\gamma^4 \Delta \hbar^{n-6} y_2'(\varphi(t)) \\ &+ 10(n-2)(n-3)(n-4)\gamma^3 \Delta^2 \hbar^{n-7} y_2''(\varphi(t)) \\ &+ 10(n-3)(n-4)\gamma^2 \Delta^3 \hbar^{n-8} y_2'''(\varphi(t)) \\ &+ 5(n-4)\gamma \Delta^4 \hbar^{n-9} y_2''''(\varphi(t)) \\ &+ \Delta^5 \hbar^{n-10} y_2'''''(\varphi(t)) \end{aligned}$$

elde edilir.

I_i invariant fonksiyonlarının tanımından,

$$\begin{aligned} \hbar^6 I_1(\tilde{y}_2(t)) &= n(n-1)(n-2)\gamma^3 \hbar^3 \\ &+ n(n-1)\gamma^2 \Delta \hbar^2 I_3(y_2(t)) \circ \varphi(t) \\ &- n\gamma \Delta^2 \hbar I_2(y_2(t)) \circ \varphi(t) \\ &+ \Delta^3 I_1(y_2(t)) \circ \varphi(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hbar^4 I_2(\tilde{y}_2(t)) &= -3(n-1)(n-2)\gamma^2 \hbar^2 \\ &- 2(n-1)\gamma \Delta \hbar I_3(y_2(t)) \circ \varphi(t) \\ &+ \Delta^2 I_2(y_2(t)) \circ \varphi(t) \end{aligned}$$

$$\hbar^2 I_3(\tilde{y}_2(t)) = 3(n-2)\gamma \hbar + \Delta I_3(y_2(t)) \circ \varphi(t)$$

$$\begin{aligned} \hbar^6 I_4(\tilde{y}_2(t)) &= -8n(n-1)(n-2)(n-3)\gamma^3 \hbar^3 \\ &- 8(n-1)(n-3)\gamma^2 \Delta \hbar^2 I_3(y_2(t)) \\ &\circ \varphi(t) + 4(n-3)\gamma \Delta^2 \hbar I_2(y_2(t)) \\ &\circ \varphi(t) - 2(n-1)\gamma \Delta^2 \hbar I_5(y_2(t)) \\ &\circ \varphi(t) + \Delta^3 I_4(y_2(t)) \circ \varphi(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hbar^4 I_5(\tilde{y}_2(t)) &= 6(n-2)(n-3)\gamma^2 \hbar^2 \\ &+ 4(n-3)\gamma \Delta \hbar I_3(y_2(t)) \circ \varphi(t) \\ &+ \Delta^2 I_5(y_2(t)) \circ \varphi(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hbar^6 I_6(\tilde{y}_2(t)) &= 10(n-2)(n-3)(n-4)\gamma^3 \hbar^3 \\ &+ 10(n-3)(n-4)\gamma^2 \Delta \hbar^2 I_3(y_2(t)) \\ &\circ \varphi(t) + 5(n-4)\gamma \Delta^2 \hbar I_5(y_2(t)) \\ &\circ \varphi(t) + \Delta^3 I_6(y_2(t)) \circ \varphi(t) \end{aligned}$$

ifadelerine ulaşılır. Elde edilen bu ifadeler $I_i(y_1(t)) = I_i(\tilde{y}_2(t))$ eşitliği uygulanırsa ve kısalık için $I_i(y_1(t)) := I_i(y_1)$ ve $I_i(y_2(t)) \circ \varphi(t) := J_i(y_2)$ gösterimleri seçilirse aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\begin{aligned} \hbar^6 I_1(y_1) &= n(n-1)(n-2)\gamma^3 \hbar^3 \\ &+ n(n-1)\gamma^2 \Delta \hbar^2 J_3(y_2) \\ &- n\gamma \Delta^2 \hbar J_2(y_2) + \Delta^3 J_1(y_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hbar^4 I_2(\tilde{y}_2(t)) &= -3(n-1)(n-2)\gamma^2 \hbar^2 \\ &- 2(n-1)\gamma \Delta \hbar J_3(y_2) + \Delta^2 J_2(y_2) \end{aligned}$$

$$\hbar^2 I_3(\tilde{y}_2(t)) = 3(n-2)\gamma \hbar + \Delta J_3(y_2)$$

$$\begin{aligned} \hbar^6 I_4(\tilde{y}_2(t)) &= -8n(n-1)(n-2)(n-3)\gamma^3 \hbar^3 \\ &- 8(n-1)(n-3)\gamma^2 \Delta \hbar^2 J_3(y_2) \\ &+ 4(n-3)\gamma \Delta^2 \hbar J_2(y_2) \\ &- 2(n-1)\gamma \Delta^2 \hbar J_5(y_2) + \Delta^3 J_4(y_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hbar^4 I_5(\tilde{y}_2(t)) &= 6(n-2)(n-3)\gamma^2 \hbar^2 \\ &+ 4(n-3)\gamma \Delta \hbar J_3(y_2) + \Delta^2 J_5(y_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hbar^6 I_6(\tilde{y}_2(t)) &= 10(n-2)(n-3)(n-4)\gamma^3 \hbar^3 \\ &+ 10(n-3)(n-4)\gamma^2 \Delta \hbar^2 J_3(y_2) \\ &+ 5(n-4)\gamma \Delta^2 \hbar J_5(y_2) + \Delta^3 J_6(y_2) \end{aligned}$$

$\Delta u = 1$ olacak şekilde $u \neq 0$ sayısı Δ ları yok edecek şekilde yukarıdaki denklemlere uygulanırsa,

$$u^3 \hbar^6 I_1(y_1) = n(n-1)(n-2)(\gamma u)^3 \hbar^3 + n(n-1)(\gamma u)^2 \hbar^2 J_3(y_2) - n(\gamma u) \hbar J_2(y_2) + J_1(y) \quad (11)$$

$$u^2 \hbar^4 I_2(y_1(t)) = -3(n-1)(n-2)(\gamma u)^2 \hbar^2 - 2(n-1)(\gamma u) \hbar J_3(y_2) + J_2(y_2) \quad (12)$$

$$u \hbar^2 I_3(y_1(t)) = 3(n-2)(\gamma u) \hbar + J_3(y_2) \quad (13)$$

$$u^3 \hbar^6 I_4(y_1(t)) = -8n(n-1)(n-2)(n-3)(\gamma u)^3 \hbar^3 - 8(n-1)(n-3)(\gamma u)^2 \hbar^2 J_3(y_2) + 4(n-3)(\gamma u) \hbar J_2(y_2) - 2(n-1)(\gamma u) \hbar J_5(y_2) + J_4(y_2) \quad (14)$$

$$u^2 \hbar^4 I_5(y_1(t)) = 6(n-2)(n-3)(\gamma u)^2 \hbar^2 + 4(n-3)(\gamma u) \hbar J_3(y_2) + J_5(y_2) \quad (15)$$

$$u^3 \hbar^6 I_6(y_1(t)) = 10(n-2)(n-3)(n-4)(\gamma u)^3 \hbar^3 + 10(n-3)(n-4)(\gamma u)^2 \hbar^2 J_3(y_2) + 5(n-4)(\gamma u) \hbar J_5(y_2) + J_6(y_2) \quad (16)$$

denklemleri elde edilir. (13) denkleminde

$$\gamma u = \frac{u \hbar^2 I_3(y_1) - J_3(y_2)}{3(n-2)\hbar}$$

elde edilip, (11), (12), (14), (15) ve (16) denklemlerinde yerine yazıldığında, (12) denkleminde

$$u^2 \hbar^4 = \frac{3(n-2)J_2(y_2) + (n-1)J_3(y_2)^2}{3(n-2)I_2(y_1) + (n-1)I_3(y_1)^2},$$

(15) denkleminde de

$$u^2 \hbar^4 = \frac{3(n-2)J_5(y_2) + (n-1)J_3(y_2)^2}{3(n-2)I_5(y_1) + (n-1)I_3(y_1)^2},$$

eşitlikleri elde edilir. Elde edilen denklemlerin sol taraflarının eşit olmasından dolayı,

$$\frac{3(n-2)J_2(y_2) + (n-1)J_3(y_2)^2}{3(n-2)I_2(y_1) + (n-1)I_3(y_1)^2} = \frac{3(n-2)J_5(y_2) + (n-1)J_3(y_2)^2}{3(n-2)I_5(y_1) + (n-1)I_3(y_1)^2}$$

ve buradan da,

$$\frac{3(n-2)I_5(y_1) + (n-1)I_3(y_1)^2}{3(n-2)I_2(y_1) + (n-1)I_3(y_1)^2} = \frac{3(n-2)J_5(y_2) + (n-1)J_3(y_2)^2}{3(n-2)J_2(y_2) + (n-1)J_3(y_2)^2}$$

simetrik ifadesi elde edilmiş olur. Böylelikle de aradığımız rasyonel invariantlardan ilkinde elde etmiş oluruz. Bu invariantı $R\kappa_1$ ile gösterirsek,

$$R\kappa_1(y_1) := \frac{3(n-2)I_5(y_1) + (n-1)I_3(y_1)^2}{3(n-2)I_2(y_1) + (n-1)I_3(y_1)^2} \quad (17)$$

dir. Benzer işlemler (11), (15) ve (16) denklemlerine uygulandığında ikinci invariant,

$$R\kappa_2(y_1) := \left(\frac{540(n-2)^2 \left[I_1(y_1) + \frac{I_4(y_1)}{4} + \frac{I_6(y_1)}{10} \right] n^2}{(-7I_1(y_1) - I_4(y_1) - \frac{I_6(y_1)}{10})n + 12I_1(y_1)} \right)^2 \frac{1}{(3(n-2)I_2(y_1) + (n-1)I_3(y_1)^2)^3} \quad (18)$$

elde edilir.

3.2.1. Not $R\kappa_1(y_1)$ ve $R\kappa_2(y_1)$ invariantları ile çalışabilmek için $n > 3$ yani $degree(y_i) > 3$ olmalıdır.

Bu şart yüzünden yöntemimiz ile bazı regle yüzeylerin afin denklikleri incelenemese de burada yalnızca denkliği kolayca hesaplanabilenler incelenememiş olacağı için önemli bir sorun ortaya çıkmamaktadır.

Böylece (5) denkleminde verilen gösterge eğrilerinin merkezil afin denkliği için aşağıdaki sonuçları verebiliriz.

3.2.2. Teorem $i \in \{1,2\}$ ve $n > 3$ için aşağıdaki eşitlik sağlanır.

$$R\kappa_i(y_1) = R\kappa_i(y_2)(\varphi) \quad (19)$$

3.2.3 Teorem S_1, S_2 sırasıyla (1) denkleminde verilen r_1, r_2 uygun parametrizasyonlarına sahip, çift katlı olmayan ve gösterge eğrilerinin (q_i) dereceleri 3 den büyük iki rasyonel regle yüzey olsun. Bu takdirde, S_1 ve S_2 afin denk ise aşağıdakiler sağlanır:

$$\begin{aligned} R\kappa_1(y_1) &= R\kappa_1(y_2)(\varphi) \\ R\kappa_2(y_1) &= R\kappa_2(y_2)(\varphi). \end{aligned} \quad (20)$$

3.3. Afin denkliklerin hesaplanması

Bu bölümde bir önceki bölümde elde edilen bulgular hesaplamalı sonuçlara dönüştürülecektir. İlk olarak,

$$\begin{aligned} R\kappa_1(q_1) &= \frac{U_1}{V_1}, & R\kappa_2(q_1) &= \frac{U_2}{V_2}, \\ R\kappa_1(q_2) &= \frac{\tilde{U}_1}{\tilde{V}_1}, & R\kappa_2(q_2) &= \frac{\tilde{U}_2}{\tilde{V}_2} \end{aligned}$$

alalım. Burada, U_i, V_i ile \tilde{U}_i, \tilde{V}_i ifadeleri t parametresine bağlı $\gcd(U_i, V_i) = \gcd(\tilde{U}_i, \tilde{V}_i) = 1$ şartını sağlayan polinomlardır. Buradan keyfi $\mathcal{L} = \varphi(t) = \frac{at+\beta}{\gamma t+\delta}$ Möbius dönüşümüne karşılık gelen Möbius çarpanı olmak üzere, aşağıdaki polinomları tanımlayalım.

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_1(t, \mathcal{L}) &:= U_1(t)\tilde{V}_1(\mathcal{L}) - V_1(t)\tilde{U}_1(\mathcal{L}) \\ \mathcal{P}_2(t, \mathcal{L}) &:= U_2(t)\tilde{V}_2(\mathcal{L}) - V_2(t)\tilde{U}_2(\mathcal{L}) \end{aligned} \quad (21)$$

Bu polinomların en büyük ortak çarpanını da

$$G := \gcd(\mathcal{P}_1(t, \mathcal{L}), \mathcal{P}_2(t, \mathcal{L})) \quad (22)$$

şeklinde gösterelim. Bununla birlikte, Möbius çarpanını da

$$\mathcal{C}(t, \mathcal{L}) := (at + \beta) - \mathcal{L}(\gamma t + \delta) \quad (23)$$

olarak tanımlayalım.

3.3.1. Teorem S_1, S_2 sırasıyla (1) denkleminde verilen r_1, r_2 uygun parametrisasyonlarına sahip, çift katlı olmayan ve gösterge eğrilerinin (q_i) dereceleri 3 den büyük iki regle yüzey olsun. S_1, S_2 afin denk ise \mathcal{C} polinomu G polinomunu böler.

İspat. S_1, S_2 regle yüzeyler afin denk ise bu yüzeylerin gösterge eğrilerinin q_1, q_2 parametrisasyonları (5) denklemindeki afin denkleme indirgenir. Bu takdirde, 3.2.3 Teorem ve (21) denklemlerinden $i \in \{1,2\}$ için $\mathcal{P}_i(t, \mathcal{L}) = 0$ olacak şekilde bir \mathcal{L} Möbius dönüşümü vardır. Bu Möbius dönüşümüne karşılık gelen Möbius çarpanı $\mathcal{C}(t, \mathcal{L})$ olsun. $\mathcal{L}, \mathcal{P}_i(t, \mathcal{L}) = 0$ sisteminin çözümü olduğundan, $\mathcal{C}(t, \mathcal{L})$ polinomunun sıfır yerleri olan (t, \mathcal{L}) ikilileri $G(t, \mathcal{L})$ polinomunun sıfır yerinde içerilir. Diğer taraftan $\mathcal{C}(t, \mathcal{L})$ indirgenemez olduğundan Bezout Teoremi' ne göre $\mathcal{C}(t, \mathcal{L}), G(t, \mathcal{L})$ nin bir çarpanı olmak zorundadır. Böylece ispat tamamlanmış olur. ■

Sonuç olarak $G(t, \mathcal{L})$ polinomunun çarpanlarından $\mathcal{C}(t, \mathcal{L})$ tipinde çarpanlar belirlenir. Bu çarpanlarda, \mathcal{L} yalnız bırakılarak Möbius çarpanları elde edilir.

Daha sonra, elde edilen her bir Möbius dönüşümüne karşılık gelen \mathcal{M} matrisi 3.1. *Afin invariantların belirlenmesi* bölümünde anlatıldığı şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\mathcal{M} = D((\gamma t + \delta)^n y_2(\mathcal{L})) D(y_1)^{-1} \quad (24)$$

Burada, \mathcal{M} matris, k sabitine bağlı, bileşenleri sabit sayılardan oluşan ve $\mathcal{M} = \frac{1}{k} M$ şeklinde tanımlı bir regüler matristir.

Daha sonra, elde edilen bütün bilgiler (4) denkleminde yerine yazılarak (4) denkleminin, k sabiti, $c(t)$ rasyonel fonksiyonu ve $B \in \mathbb{R}^3$ sabit vektörden oluşan bilinmeyenlere sahip iki rasyonel bileşenli vektör eşitliğine dönüşmüş olur. İlk olarak denklemin her iki tarafının t ye göre türevi alınarak $B \in \mathbb{R}^3$ sabit vektörü yok edilir. Elde edilen yeni vektör eşitliğinin bileşenleriyle oluşturulan denklem sisteminden *MapleTM*(2021) bilgisayar cebir sistemindeki "eliminate" komutu kullanılarak önce k sabiti, daha sonra da $c(t)$ rasyonel fonksiyonu belirlenir. Son olarak, (4) eşitliğinde elde edilenler yerine yazılarak $B \in \mathbb{R}^3$ sabit vektörü bulunur. Böylece, (2) eşitliği ile verilen, iki rasyonel regle yüzey arasındaki tüm afin denklemler elde edilmiş olur.

3.4. Algoritma

Önceki bölümlerde ulaşılan sonuçlar yardımıyla aşağıdaki RSAff isimli algoritma (bkz. **Algoritma 1**), verilen iki

rasyonel regle yüzey arasındaki tüm afin denklemleri belirlemektedir.

Algoritma 1: RSAff

Input: Çift katlı olmayan S_1, S_2 regle yüzeylerinin, sırasıyla, (1) denkleminde verilen ve gösterge eğrilerinin dereceleri 4 den büyük olan r_1, r_2 uygun parametrisasyonları.

Output: S_1, S_2 regle yüzeyleri arasındaki tüm afin denklemler. Denklik olmaması durumunda ise "Afin denk değildir." Uyarısı.

Procedure: RAff(S_1, S_2)

- (21) de verilen $\mathcal{P}_i(t, \mathcal{L})$ polinomlarını hesapla.
- (22) de tanımlanan G polinomunu hesapla.
- G polinomunun FC çarpanlarını hesapla.
- (23) de tanımlanan ϕ Möbius çarpanlarının kümesini oluşturmak için FC yi kontrol et.
- Eğer $\phi = \emptyset$ ise "Afin denk değildir." yaz
- Aksi takdirde her bir Möbius çarpanı için $M = kD((\gamma t + \delta)^n y_2(\mathcal{L})) D(y_1)^{-1}$ matrisini bul.
- (4) denkleminde elde edilen Möbius dönüşümlerini ve bunlara karşılık gelen M matrislerini yerlerine yaz.
7. adımda elde edilen eşitliğin her iki tarafının türevi alınarak elde edilen eşitliklerden k sabiti ve $c(t)$ yi hesapla.
8. adımda elde edilen bilgileri de kullanarak 7. adımda ortaya çıkan eşitliklerden B öteleme vektörünü bul.

Algoritma adımlarının daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıdaki örnek verilmiştir.

3.4.1 Örnek Aşağıda sırasıyla $r_1(t, s) = x_1(t) + sy_1(t)$ ve $r_2(t, s) = x_2(t) + sy_2(t)$ yardımıyla parametrelenmiş S_1 ve S_2 regle yüzeylerin afin denklemlerini inceleyelim. Burada,

$$\begin{aligned} x_1(t) &= (t^4 + t^2 + t, t^6 + t^3, t^5 + t^3 + t^2 + 3t) \\ y_1(t) &= (t^3 + t, t^5, t^4 + t^2 + 3) \\ x_2(t) &= (5t^4 + 5t^2 + 5t - 1, 3t^5 + 3t^3 + 3t^2 \\ &\quad + 9t + 5, -t^6 + t^4 - t^3 + t^2 + t) \\ y_2(t) &= (5t^3 + 5t, 3t^4 + 3t^2 + 9, -t^5 + t^3 + t) \end{aligned}$$

olsun. Böylece (21) denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_1(t, \mathcal{L}) &= (6t^{10} - 152t^8 - 574t^6 + 400t^4 + 2910t^2 \\ &\quad + 900)(3\mathcal{L}^{10} + 89\mathcal{L}^8 - 137\mathcal{L}^6 \\ &\quad + 2570\mathcal{L}^4 + 3300\mathcal{L}^2 + 1800) \\ &\quad - (3t^{10} + 89t^8 - 137t^6 + 2570t^4 \\ &\quad + 3300t^2 + 1800)(6\mathcal{L}^{10} - 152\mathcal{L}^8 \\ &\quad - 574\mathcal{L}^6 + 400\mathcal{L}^4 + 2910\mathcal{L}^2 + 900), \\ \mathcal{P}_2(t, \mathcal{L}) &= 524880000((t^6 + 3t^4 - 39t^2 - 30)^4(t^2 \\ &\quad - 1)^2(3\mathcal{L}^{10} + 89\mathcal{L}^8 - 137\mathcal{L}^6 \\ &\quad + 2570\mathcal{L}^4 + 3300\mathcal{L}^2 + 1800)^3 \\ &\quad - (3t^{10} + 89t^8 - 137t^6 + 2570t^4 \\ &\quad + 3300t^2 + 1800)^3(\mathcal{L}^6 + 3\mathcal{L}^4 \\ &\quad - 39\mathcal{L}^2 - 30)^4(\mathcal{L}^2 - 1)^2). \end{aligned}$$

Bu iki polinomun en büyük ortak çarpanı (gcd),

$$G = \mathcal{L}^2 - t^2$$

dir. Bu polinomu çarpanlara ayırırsak,

$$FC = (\mathcal{L} - t)(\mathcal{L} + t)$$

elde edilir. Buradan da Möbius dönüşümleri kümesi

$$\text{phi} = \{\mathcal{L} = t, \mathcal{L} = -t\}$$

ye ulaşılır. Her bir Möbius dönüşümüne karşılık sırasıyla,

$$\mathcal{L} = t, \quad M_1 = \begin{pmatrix} 5k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3k \\ k & -k & 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathcal{L} = -t, \quad M_2 = \begin{pmatrix} -5k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3k \\ -k & k & 0 \end{pmatrix},$$

matrisleri elde edilir.

Sırasıyla elde edilen bu bilgiler (4) denkleminde yerine yazıldığında

$$\begin{aligned} & (5k(t^4 + t^2 + t) + b_{11}, 3k(t^5 + t^3 + t^2 + 3t) \\ & \quad - b_{12}, k(t^4 + t^2 + t) - k(t^6 + t^3) \\ & \quad + b_{13}) \\ & = (-s(5t^4 + 5t^2 + 5t - 1) \\ & \quad - c(t)(5t^3 + 5t), -s(3t^5 + 3t^3 \\ & \quad + 3t^2 + 9t + 5) \\ & \quad - c(t)(3t^4 + 3t^2 + 9), -s(-t^6 \\ & \quad + t^4 - t^3 + t^2 + t) \\ & \quad - c(t)(-t^5 + t^3 + t)), \\ & (-5k(t^4 + t^2 + t) + b_{21}, 3k(t^5 + t^3 + t^2 + 3t) \\ & \quad + b_{22}, -k(t^4 + t^2 + t) \\ & \quad + k(t^6 + t^3) + b_{23}) \\ & = (-s(-3t^5 - 3t^3 + 3t^2 - 9t \\ & \quad + 5) \\ & \quad - c(t)(3t^4 + 3t^2 + 9), -s(5t^4 \\ & \quad + 5t^2 - 5t - 1) \\ & \quad - c(t)(-5t^3 - 5t), \\ & \quad -s(-t^6 + t^4 + t^3 + t^2 - t) \\ & \quad - c(t)(t^5 - t^3 - t)), \end{aligned}$$

vektör eşitlikleri karşımıza çıkar. Burada, $B_1 = (b_{11}, b_{12}, b_{13})^T$, $\mathcal{L} = t$ Möbius dönüşümüne karşılık gelen sabit vektör, $B_2 = (b_{21}, b_{22}, b_{23})^T$ ise $\mathcal{L} = -t$ e karşılık gelen sabit vektördür. Eşitliklerin her iki tarafının türevleri alınarak oluşturulan yeni eşitliklerden, sırasıyla,

$$k = 1, \quad c(t) = 0,$$

$$k = 1, \quad c(t) = 2t$$

elde edilir. Bütün bu bilgiler (4) denkleminde yerlerine yazıldığında oluşan eşitliklerden de sırasıyla, B_1 ve B_2 sabit vektörleri hesaplanır. Böylece, S_1 ve S_2 regle yüzeyleri arasındaki afin dönüşümün matrisi, öteleme vektörü ve (3) denkleminde verilen Cremona dönüşümünden oluşan çözüm kümeleri, sırasıyla, aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\left\{ \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -5 \\ 0 \end{pmatrix}, \mu_1(t, s) = (t, s) \right\},$$

$$\left\{ \begin{pmatrix} -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -5 \\ 0 \end{pmatrix}, \mu_2(t, s) = (-t, s + 2t) \right\}.$$

Bu örnekteki tüm hesaplamalar 0.141 saniyede tamamlanmıştır.

3.5. Testler ve Performans

Bir önceki bölümde verilen algoritma RSAff, bilgisayar cebir sistemi MapleTM(2021) kullanılarak uygulanmıştır. Bunun için 2.4 Ghz Intel Core i5 işlemciye ve 8 GB belleğe sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Bu çalışmada sunulan algoritmaya ait MapleTM(2021) uygulaması, birinci yazarın resmi web sayfasında (int. Kyn. 1) tüm araştırmacılara açık bir şekilde sunulmuştur.

Çizelge 1' de verilen parametrizasyonlar Alcázar ve Quintero (2020) çalışmasından alınmıştır.

Çizelge 1 Çeşitli rasyonel regle yüzeylerin parametrizasyonları.

Der.	Rasyonel regle yüzey parametrizasyonu
1 4	$(t^4 + t^2, t^2 - 3, t^3 + t) + s \cdot (-t^4 + 2, t^2 - 8, 2t)$
2 4	$(\frac{t^4 + t^2}{t^2 + 3}, \frac{t^2 - 3}{t^2 + 3}, \frac{t^3 + t}{t^2 + 3}) + s \cdot (-t^4 + 2, t^2 - 8, 2t)$
3 6	$(t^4 + t^2 + t, t^6 + t^3, t^5 + t^3 + t^2 + 3t) + s \cdot (t^3 + t, t^5, t^4 + t^2 + 3)$
4 6	$s \cdot (2t(t^4 - 6t^2 + 1), (t^2 + 1)(t^4 - 6t^2 + 1), (t^2 + 1)^3)$
5 7	$(t^6 - 6t^4 + t^2 + 2t, -t^7 + 6t^5 - t^3 + t^2 + t, t^3 + t) + s \cdot (t^5 - 6t^3 + t, -t^6 + 6t^4 - t^2 + 1, t^2 + 1)$
6 7	$(\frac{t^3}{t^2 + 1}, \frac{t^5}{t^2 + 1}, \frac{t^7}{t^2 + 1}) + s \cdot (-t^5 + t, 3t^7, -2t^3)$
7 9	$(\frac{2t^8 - 10t^6 - 10t^4 + 5t^2 + 1}{t^2 + 1}, \frac{t^9 - 6t^7 + 6t^3 + t^2 - 3t + 1}{t^2 + 1}, t^7 + 3t^5 + 3t^3 + t + 5) + s \cdot (2t(t^4 - 6t^2 + 1), -t^6 + 7t^4 - 7t^2 + 1, (t^2 + 1)^3)$
8 17	$(-\frac{t^{17} - 6t^{15} + 6t^{11} - 6t^7 + 6t^3 - t^2 - t + 1}{t^2 + 1}, \frac{2t(t^{15} - 5t^{13} - 5t^{11} + t^9 + t^7 - 5t^5 - 5t^3 + t + t(t^2 + 1)^3(t^8 + 1)) + s \cdot (-t^6 + 7t^4 - 7t^2 + 1, 2t(t^4 - 6t^2 + 1), (t^2 + 1)^3)$

Çizelge 2' de yapılan hesaplamalar, **Çizelge 1'** de verilen her bir regle yüzey parametrizasyonuna,

$$\begin{pmatrix} -1/2 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

matrisi uygulanarak elde edilen ikinci bir regle yüzey parametrizasyonu arasında olmuştur. Bununla birlikte, **Çizelge 3'** deki izometri hesaplamaları ise, yine **Çizelge 1'** de verilen her bir regle yüzey parametrizasyonuna,

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 4/5 & 0 & -3/5 \\ 3/5 & 0 & 4/5 \end{pmatrix}$$

matrisi uygulanarak elde edilen ikinci bir regle yüzey parametrizasyonu arasında olmuştur.

Bu da, **Çizelge 2** ve **Çizelge 3'** de Alcázar ve Quintero (2020) çalışmasında sunulan yöntem ile bu çalışmada sunulan yöntemin karşılaştırılmasını sağlamıştır. Bu çizelgelerde t_a , Alcázar ve Quintero (2020) çalışmasında elde edilen hesaplama sürelerini, t_b ise bu çalışmada elde edilen hesaplama sürelerini göstermektedir.

Yöntemimiz rasyonel regle yüzeylerin gösterge eğrilerinin dereceleri $n > 3$ olanlarını inceleyebildiğinden, **Çizelge 2'** de Alcázar ve Quintero (2020) çalışmasından sadece üç rasyonel regle yüzeyin afin denkliğine ait süreler karşılaştırılabilmiştir. Buna karşın **Çizelge 3'** de ise daha fazla rasyonel regle yüzeyin simetri ve izometrilere hesaplanması için geçen süreler karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırma yapılabilen her bir örnek için en iyi zamanlama mavi renkte verilmiştir.

Çizelge 2 Çizelge 1' de verilen rasyonel regle yüzeylerin afin denkliklerinin hesaplanması için geçen süreler saniye cinsinden verilmiştir.

Derece	Hesaplama süresi (t_a/t_b)	Afin denklik sayısı
1 4	0.452/0.047	2
2 4	0.608/0.063	2
3 6	/0.063	2
4 6	/0.094	8
5 7	11.563/0.062	2
6 7	/0.062	2
7 7	/0.093	8
8 17	/0.547	8

Çizelge 3 Çizelge 1' de verilen rasyonel regle yüzeylerin simetrilerinin ve izometrilere hesaplanması için geçen süreler saniye cinsinden verilmiştir.

Derece	Simetri için hesaplama süresi (t_a/t_b)	İzometri için hesaplama süresi (t_a/t_b)
1 4	/0.110	/0.172
2 4	/0.047	/0.078
3 6	1.716/0.047	2.200/0.078
4 6	4.587/0.312	10.280/0.125
5 7	1.888/0.062	2.184/0.078
6 7	1.935/0.063	2.372/0.063
7 7	9.640/0.266	9.267/0.281
8 17	9.828/0.218	10.124/0.250

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada iki rasyonel regle yüzey arasındaki afin denklikleri, simetrisini ve izometrisini hesaplayan yeni ve etkili bir yöntem sunulmuştur. Bunun için, (2) denkleminde verilen, regle yüzeylerin afin denkliğine (simetrisini ve izometrisini), bu yüzeylerin parametreleri arasındaki denkliğine indirgen $\mu: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ birasyonel dönüşümünün, Alcázar ve Quintero (2020) çalışmasında elde edilen bu çalışmada ise (3) denklemi ile verilen karakterizasyonu kullanılmıştır. Geliştirilen yöntem, Möbius dönüşümünden etkilenmeyen afin invariant fonksiyonlar yardımıyla iki rasyonel regle yüzey arasındaki afin denklik probleminde, çok bilinmeyenli doğrusal olmayan sistem çözümlerinden kaçınılarak, tam bir çözüm getirmiştir. Elde edilen sonuçlar bir algoritma yardımıyla Maple bilgisayar cebir sistemine aktarılmış, elde edilen test sonuçları Çizelge 2 ve Çizelge 3' de Alcázar ve Quintero (2020) çalışmasında elde edilen hesaplama süreleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların ne kadar başarılı ve algoritmamızın ne kadar etkili olduğu görülmektedir.

Bu çalışmadan edinilen bilgiler ışığında gelecek çalışmalarda, yöntemin rasyonel regle yüzeyler arasındaki projektif denklik ve simetrisini bulacak şekilde geliştirilmesi planlanmaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kavramsallaştırma, Metodoloji/Çalışma, Doğrulama, Analiz ve yorumlama, Araştırma, Yazma/orijinal taslak, Yazma/inceleme ve düzenleme, Görselleştirme

Yazar 2: Kavramsallaştırma, Metodoloji/Çalışma, Doğrulama, Analiz ve yorumlama, Araştırma, Kaynak sağlama, Yazma/inceleme ve düzenleme, Denetleme/danışmanlık

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

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

Teşekkür

Yazarlar, Prof. Juan Gerardo Alcazár' a hiçbir zaman esirgemediği yardımı için teşekkürlerini sunar.

5. Kaynaklar / References

- Alcázar, J.G., Hermoso, C. and Muntingh, G., 2015. Symmetry detection of rational space curves from their curvature and torsion. *Comput. Aided. Geom. Design*, **33**, 51-65.
<https://doi.org/10.1016/j.cagd.2015.01.003>
- Alcázar, J.G. and Hermoso, C., 2016. Involutions of polynomially parametrized surfaces. *J. Comput. Appl. Math.*, **294**, 23-38.
<https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.08.002>
- Alcázar, J.G. and Goldman, R., 2017. Detecting when an implicit equation or a rational parametrization defines a conical or cylindrical surface, or a surface of revolution. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics*, **12** (23), 2550-2559.
<https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/tvcg.2016.2625786>
- Alcázar, J.G. and Quintero, E., 2020. Affine equivalences, isometries and symmetries of ruled rational surfaces. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **364**, 112339.
<https://doi.org/10.1016/j.cam.2019.07.004>
- Alcázar, J.G., Gözütok, U., Çoban, H.A. and Hermoso, C., 2022. Detecting affine equivalences between implicit planar algebraic curves. *Acta Applicandae Mathematicae*, **2** (182), 23-38.
<https://doi.org/10.1007/s10440-022-00539-1>
- Bizzarri, M., Lavička, M., Vršek, J., 2020. Computing projective equivalences of special algebraic varieties. *J. Comput. Appl. Math*, **367**, 112438.
<https://doi.org/10.1016/j.cam.2019.112438>
- Chen, F., Zheng J. and Sederberg, T.W., 2001. The μ -basis of a rational ruled surface. *Comput. Aided. Geom. Design*, **18**, 61-72.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8396\(01\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8396(01)00012-7)
- Chen, F., Wang W., 2003. Revisiting the μ -basis of a rational ruled surface. *J. Symbolic Comput*, **36**, 699-716.
[https://doi.org/10.1016/S0747-7171\(03\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0747-7171(03)00064-6)
- Gözütok, U., Çoban, H.A., Sağıroğlu, Y., Alcázar, J.G., 2023. A new method to detect projective equivalences and symmetries of rational 3D curves. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **419**, 114782.
<https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.114782>
- Hauer, M., Jüttler, B., 2018. Projective and affine symmetries and equivalences of rational curves in arbitrary dimension. *J. Symbolic Comput.*, **87**, 68-86.
<https://doi.org/10.1016/j.jsc.2017.05.009>
- Hauer, M., Jüttler, B. and Schicho, J., 2018. Projective and affine symmetries and equivalences of rational and polynomial surfaces. *J. Comput. Appl. Math.*, **349**, 424-437.
<https://doi.org/10.1016/j.cam.2018.06.026>
- O' Neill, B., 2006. Elementary Differential Geometry. Revised Second Edition. NY, USA, 145-146.
- Perez-Diaz, S., Shen, L-Y., 2014. Characterization of rational ruled surfaces. *J. Symbolic. Comput.*, **63**, 21-45.
<https://doi.org/10.1016/j.jsc.2013.11.003>

İnternet Kaynakları

- 1- <https://avesis.ktu.edu.tr/hacoban/dokumanlar>, (10.10.2023)

Oyun Teorisi Açısından Türkiye Gözünden Finlandiya ve İsveç'in NATO'ya Üyelik Süreci

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 01.11.2023

Kabul/Accepted: 14.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

The Accession Process of Finland and Sweden to NATO by Türkiye's Perspective from the Point of Game Theory

Murat ÖZKAYA^{1,2,*}, Yücel BAŞTAN³, Burhaneddin İZGİ²

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Siyasal Bilgiler Fakültesi, İşletme Bölümü, Çanakkale.

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Matematik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

³Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Siyasal Bilgiler Fakültesi, Uluslararası İlişkiler Bölümü, Çanakkale.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu çalışmada, İsveç ve Finlandiya'nın NATO üyelik başvurularının Türkiye tarafından onaylanma sürecini belirsizlik altında 3-boyutlu (3B) karar verme kriterlerini kullanarak inceledik. İlk olarak İsveç ve Finlandiya ile Türkiye'nin ilişkisini dış politika analizlerinde öne çıkan üç ana boyut politik, ekonomik ve askeri ve her bir ana boyutun üçer alt boyutunu göz önünde bulundurarak ele aldık. Daha sonra bu ilişkilerin Türkiye açısından önem derecelerini önem derecesi ölçeği kullanarak sıraladık ve bu sıralamalara uygun temsili değerler atayarak her bir boyut için 3-boyutlu getiri matrisleri oluşturulmuştur. Son olarak, belirsizlik altında 3-boyutlu karar verme kriterleri olan 3B Laplace kriteri, 3B Wald kriteri, 3B Hurwicz kriteri ve 3B Savage kriteri ile analizleri yaptık. 3B karar verme kriterlerinin kullanılmasının en büyük avantajı İsveç ve Finlandiya'nın politik, ekonomik ve askeri etkilerinin karar süreci üzerindeki etkilerini eş zamanlı incelemeye imkan vermesidir. Bu açıdan, bu çalışma belirsizlik altında 3B karar verme kriterlerinin uygulamasının yapıldığı ilk çalışma olması nedeniyle önem taşımaktadır. Game theory; 3D decision criteria; 3D matrices; International relations; International security; NATO

Anahtar Kelimeler: Oyun teorisi; 3B karar kriterleri; 3B matrisler; Uluslararası ilişkiler; Uluslararası güvenlik; NATO

Abstract

In this study, we investigate the approval process of Sweden and Finland's NATO membership applications by Turkey using 3-dimensional (3D) decision-making criteria under uncertainty. First, we consider Turkey's relationship with Sweden and Finland by considering the three main dimensions that come to the fore in foreign policy analyzes as political, economic and military, and three sub-dimensions of each main dimension. Then, we rank the importance of these relations for Turkey using the importance scale, and we create 3-dimensional payoff matrices for each dimension by assigning appropriate representative values to these rankings. Finally, we analyze the 3-dimensional decision making criteria under uncertainty with 3D Laplace criterion, 3D Wald criterion, 3D Hurwicz criterion and 3D Savage criterion. The most advantageous part of using 3D decision criteria is that it allows simultaneous examination of the effects of the political, economic and military influences of Sweden and Finland on the decision process. In this respect, this study is important because it is the first study in which the application of 3D decision-making criteria under uncertainty.

Keywords: Game theory; 3D decision criteria; 3D matrices; International relations; International security; NATO

1. Giriş

Oyun teorisi, rasyonel oyuncuların etkileşimli ortamlardaki karar verme süreçlerini matematiksel araçlar kullanarak inceleyen bir bilim dalıdır. İlk uygulamaları Haywood'un (1954) İkinci Dünya Savaşı'ndaki askeri doktrinleri matematiksel yaklaşımlarla ele almasıyla başlamasına rağmen temelleri von Neumann'ın (1928) minimaks teoremini ispatlamasıyla atılmıştır. Bu alanda yazılmış olan "Theory of Games and Economic Behavior" isimli kitap oyun teorisini kapsamlı olarak ele alan ilk eserdir (von Neumann and Morgenstern, 1944).

Oyun teorisi açısından diğer bir önemli dönüm noktası Nash'in (1950a) oyunların belirli şartlar altında her zaman bir denge noktasına sahip olduğunu ispatlamasıdır. Öte

yandan, yaptığı diğer çalışmalarda Nash, denge noktalarının belirlenmesi, pazarlık problemi gibi oyun teorisi için önemli konuları ele almıştır (Nash, 1950b; 1951; 1953). Nash bu çalışmasının sonucunda 1994 yılında Nobel Ekonomi Ödülü ile ödüllendirilmiştir. Shapley (1953) yaptığı çalışmada işbirlikli oyunlarda oyuncular arasındaki işbirliği sonucunda elde edilen toplam karın dağıtılmasını ifade Shapley değerini sunmuştur. Harsanyi (1967) ise eksik bilgiye sahip oyunların tam bilgiye sahip oyunlara dönüştürülmesini sağlayan bir dönüşüm sunmuştur. Takip eden yıllarda Aumann ve Schelling (2005) oyun teorisi kullanarak işbirlikli ve işbiriksiz durumların daha iyi anlaşılabilmesini sağlayacak çalışmalarından dolayı Nobel Ödülü ile ödüllendirilmiştir. Bu alanda yapılan çalışmaların ödüllendirilmesi araştırmacıların ilgilerinin oyun teorisine

yönelmesine katkı sağlamış ve böylece nispeten yeni bir alan olmasına rağmen oyun teorisinin diğer bilim dallarında çeşitli uygulamaları yapılmıştır (Steven, 1961; Hazell, 1970; Vincent; 1983; Weibull; 1997; Finus, 2000; Bauch and Earn, 2004; Madani, 2010, Sanchez-Soriano,2013, Özer , 2015; Çolak ve Koç, 2016; İzgi ve Özkaya, 2019). Örnek olarak, siyaset biliminde oy verme davranışlarının, uluslararası ilişkileri ve çatışmaların çözümlenmesini incelemek için oyun teorisi destekli modeller kullanılmaktadır (Correa, 2001, Diesen, 2015, Rass et al., 2017, Bigdeli et al., 2018, Özkaya ve İzgi, 2021, Özkaya ve Bakkaloğlu, 2023). Biyolojide hayvanların davranışlarını incelemek için, psikolojide ise karar verme sosyal etkileşimleri modellemek için kullanılmaktadır (Maynard-Smith and Price, 1973, Allanand Dupont, 1999,Keller, 2022). Sigortacılık sektöründe ise çeşitli şekillerde oyun teorisinin kullanımına yer verildiği görülmektedir (Okuera, 2007, Gao and Wang, 2019,İzgi and Özkaya, 2020). Ayrıca yapay zekanın gelişmesiyle birlikte oyunların çözüm yöntemlerine yapay zekanın da dahil olduğu yeni yöntemler de bulunmaktadır (Nanduri and Das, 2007, Nowe et al., 2012, İzgi vd. 2023b).Öte yandan, oyun teorisi ile yakından ilişki olan diğer bir alan ise karar teorisidir. Karar teorisi çok disiplinli bir alan olmakla beraber karar süreçlerini tüm açılardan inceleyen bir alandır. Luce ve Raiffa (1957) karar teorisini tanıtarak oyun teorisi ile beraber incelemiştir. Jeffrey (1990) ise karar teorisi için önem arz eden koşullu olasılıkları içeren bir beklenen değer fonksiyonu tanımlamıştır. Bu iki çalışma karar teorisinin klasik çalışmaları olarak değerlendirilmektedir. Bunlara ek olarak, Fishburn (1970) ve Kreps (1988) karar teorisinin önemli ve temel elemanlarını detaylı bir şekilde incelemiştir. Kreps çalışmasında tercih ilişkilerini, belirsizlik altında karar verme gibi diğer konuları da ele almıştır. Pataki (1996) yaptığı çalışmada belirsizlik altında karar verme yöntemlerini sunup, aksiyomlarını sunmuştur. Binmore (2009) ise belirsizlik altında karar verme yöntemlerinden biri olan Savage kriterini ele alıp bu kriteri geliştirmeye yönelik önerilerde bulunmuştur. Gilboa (2010) ise çalışmasında karar teorisinin zaman içerisindeki gelişimini detaylı bir şekilde ele almıştır. Özkaya vd. (2022) yaptıkları çalışmada kullanılacak belirsizlik altındaki karar verme süreçlerine ait en temel yöntemler olan Laplace, Wald, Hurwicz ve Savage kriterlerini 3-boyutlu matrisler için yeniden tanımlamış ve karakteristik aksiyomları her bir kriter için ifade edip, gerekli ispatları yapmıştır.

Bu çalışmada, Özkaya, İzgi ve Perc'in (2022) yılında sunmuş oldukları 3-boyutlu belirsizlik altında karar verme kriterleri Türkiye'nin, Finlandiya ve İsveç'in NATO başvurularını değerlendirme süreci analizlerinde

kullanılmıştır. Analizleri yaparken başvuru yapan ülkeler 3 ana faktör ve bu ana faktörlere ait üçer alt faktörleri kullanarak ele alınacaktır. Ana faktörler Dış Politika Analizlerinde öncelikle ele alınan faktörler olan ve aynı zamanda Monaghan tarafından hazırlanan çalışmada da yer alan Politik, Ekonomik ve Askeri faktörler şeklindedir (Hudson and Vore, 1995, Monaghan, 2023). Politika faktörünün alt faktörleri ise Güven, Dayanışma ve Etki; Ekonomi faktörünün alt faktörleri Maliyet Tasarrufu, Ticaret ve Kamu Malları; son olarak Askeri faktörün alt boyutları ise Birlikte Çalışılabilirlik, Standartizasyon ve Savaş Gücü olarak sıralandırılmıştır. (Monaghan, 2023). Literatürdeki çalışmalar iki ülke arasındaki ilişkilere odaklanırken, bu çalışma NATO'ya eş zamanlı başvuran iki ülke ile Türkiye arasındaki ilişkileri, Türkiye merkezli olmak üzere 3 ülke çerçevesinden değerlendirmektedir. Bunun sebebi NATO'ya birlikte başvuran iki ülkeye karşı diğer NATO üyesi ülkeler (süreçte Macaristan uzun süre Türkiye ile birlikte hareket etmiştir) aynı tepkiyi verirken Türkiye'nin iki ülkenin üyeliğine yönelik tepkisinin farklı olmasıdır. Finlandiya ve İsveç'in NATO'ya kabul edilmesi siyasi karar olarak tartışılırken, NATO'nun güvenlik mimarisi gereği karar özünde güvenlik kararıdır. NATO'nun savunma örgütü olması, 5.maddesinde de belirtildiği gibi taraflardan birine karşı yapılan silahlı saldırının tüm taraflara karşı yapılmış sayılacağı maddesi güvenlik mimarisinin en önemli ayağını oluştururken Rusya'ya komşu (kara veya deniz) iki ülkenin üyeliği aynı zamanda olası müdahale durumunda Türkiye'nin müdahale edilen ülkeyi askeri olarak destek göndereceği anlamını taşımaktadır. Türkiye'nin tepkisi siyasi olarak görülse de NATO kolaylaştırıcılığında NATO Madrid Zirvesi'nde imzalanan muhtıradan da görüleceği gibi aslında ülke güvenliği ile ilgili bir karar olduğu çalışmada değerlendirilmiştir. Çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde, 3-boyutlu matrisler kullanılarak doğaya karşı oyunlar ve 3-boyutlu karar verme kriterleri sunulmuştur. Üçüncü bölümde, çalışmada ele alınacak problemin konjonktürel boyutu, süreç ve sonuçlara yönelik diğer aktörlerin politik duruşları, diğer bir deyişle Türkiye ile İsveç ve Finlandiya'nın politik, ekonomik ve askeri ilişkileri özelinde ele alınmıştır. Dördüncü bölümde ise problemin 3-boyutlu karar verme kriterleri kullanılarak analizleri yapılmıştır. Son bölüm de ise çalışmanın sonuçlarına yer verilmiştir.

2. Doğaya Karşı Oyunlar ve 3-Boyutlu Karar Verme Kriterleri

Bu bölümde tanımlanmış doğaya karşı oyunlar ve 3-boyutlu (3B) belirsizlik altında karar verme kriterleri olan Laplace, Wald, Hurwicz ve Savage kriterleri sunulacaktır.

2.1. Doğaya Karşı Oyunlar

Doğaya karşı oyunlar belirsizlik altında karar verme kriterlerinin kullanımını gerektiren oyun türlerinden biridir. Bu oyunlarda aksiyon ve durumlar arasındaki ilişkiler aşağıdaki gibi bir getiri matrisi ile özetlenmektedir:

$$A = \begin{bmatrix} \text{Aksiyon/Durum} & D_1 & D_2 & \dots & D_n \\ A_1 & g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ A_2 & g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_m & g_{m1} & g_{m2} & \dots & g_{mn} \end{bmatrix}$$

matrisinde $i = 1, 2, \dots, m$ ve $j = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere, D_i 'ler durumları A_i 'ler ise oyuncunun seçebileceği aksiyonları temsil ederken, g_{ij} 'ler ise D_j durumda A_i aksiyonun tercih edildiği pozisyondaki getirileri temsil etmektedir. Doğaya karşı oyunlardaki amaç belirsizlik ve risk altında elde edilen mevcut bilgileri kullanarak en iyi olası getiriyi/kazancı elde etmektir.

3B karar kriterleri, 2B karar verme kriterlerinin aksine aynı anda en az iki farklı durumun karar verme sürecine etkisini analiz etmeyi kolaylaştırmaktadır

2.2. Üç Boyutlu Laplace Kriteri

$A \in R^{m \times n \times s}$ girdileri g_{ij}^k olan 3-boyutlu bir matris olmak üzere 3B Laplace kriteri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Özkaya vd., 2022):

$$E_i^k = \sum_{j=1}^n p_{ij}^k g_{ij}^k \quad (1)$$

Burada p_{ij}^k $i = 1, 2, \dots, m$ ve $k = 1, 2, \dots, s$ için her bir doğa durumunun olasılıklarını temsil etmektedir. Daha sonra, $i = 1, 2, \dots, m$ olmak üzere $E_i = \sum_{k=1}^s E_i^k$ Laplace kriteri

$$A_{opt} = \max_{i=1, \dots, m} \{E_i\} \quad (2)$$

Buna ek olarak eşit olasılıklara sahip durumlarda incelenmesi için

$$r_i = \frac{1}{ns} \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^n |g_{ij}^k| \quad (3)$$

$$A_{opt} = \max_i r_i$$

kullanılabilir.

Öte yandan, Laplace kriteri getiri matrisinin ∞ -normu ile de aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\|A\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq m} \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^n |g_{ij}^k| \\ = \text{en büyük mutlak satır bloğu toplamı} \quad (4)$$

2.3. Üç Boyutlu Wald Kriteri

$A \in R^{m \times n \times s}$ girdileri g_{ij}^k olan 3-boyutlu bir matris olmak üzere, 3B Wald kriteri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Özkaya vd., 2022):

$$W_i^k = \min_j \{g_{ij}^k\} \\ W_i = \min_k \{W_i^k\} \\ W_{opt} = \max_i \{W_i\} \quad (5)$$

burada $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ ve $k = 1, 2, \dots, s$ 'tir.

2.4. Üç Boyutlu Hurwicz Kriteri

$A \in R^{m \times n \times s}$ girdileri g_{ij}^k olan 3-boyutlu bir matris olmak üzere, 3B Hurwicz kriteri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Özkaya vd., 2022):

$$H_i^k = \max_j \{g_{ij}^k\} \\ H_i = \max_k \{H_i^k\} \\ H_{opt} = \max_i \{H_i\} \quad (6)$$

burada $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ ve $k = 1, 2, \dots, s$ 'tir.

Buna ek olarak Hurwicz $0 \leq z \leq 1$ olacak şekilde bir kötümserlik-iyimserlik indeksini önermiş ve karar kriterini aşağıdaki gibi sunmuştur:

$$zW_{opt} + (1 - z)H_{opt} = \max_i \{zW_i + (1 - z)H_i\}$$

2.5. Üç Boyutlu Savage Kriteri

$A \in R^{m \times n \times s}$ girdileri g_{ij}^k olan 3-boyutlu bir matris olmak üzere, 3B Savage kriteri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Özkaya vd., 2022):

$$R_{ij}^k = \max_k \max_i \{g_{ij}^k\} - g_{ij}^k \\ Y_i = \max_k \max_j \{R_{ij}^k\} \\ Y_{opt} = \min_i Y_i \quad (7)$$

burada $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ ve $k = 1, 2, \dots, s$ olmak üzere R_{ij}^k 3B pozitif pişmanlık matrisini temsil etmektedir.

3. Bulgular

Bu bölümde Türkiye'nin İsveç ve Finlandiya ile olan ilişkilerinin kısa bir analizi yapılmıştır. Bu bölümde yapılan analizler ve çıkarımlar çalışmanın temel problemi oluşturmak ve analizlerinin yapılabilmesi için getiri matrisinin oluşturulmasında kullanılacaktır.

İsveç ve Finlandiya'nın NATO geleneksel askeri tarafsızlık politikasını terk ederek NATO üyesi olmak istemelerinin

ardında, geniş kara ve deniz sınırlarının bulunduğu Rusya kaynaklı güvenlik endişeleri yatmaktadır. Rusya devlet başkanı Putin'in göreve gelmesinin ardından Rusya'nın Ulusal Güvenlik Konsepti, Askeri Doktrin ve Dış Politika Konseptlerinde de belirtildiği gibi Rusya'nın politikasının genel çerçevesi; ABD'nin ve Batı'nın, askeri, politik kültürel dahil tüm unsurları ile gücünü kabul ettirdiği hegemon gücünün kırılması, NATO'nun etkisinin sınırlandırılması ve mümkünse genişlemesinin önlenmesi, Rusya'nın doğusu ve güneyinde kalan eski Sovyetler Birliği ülkeleri ile ilişkilerin geliştirilmesi ve Batı ülkelerinin bu bölgeye müdahale etmesinin engellenmesi olmuştur.

NATO üyelik sürecine dahil olan İsveç ve Finlandiya aracılığıyla NATO, Rusya'ya aynı zamanda müttefiklerinin karar verirken üçüncü taraf olarak Rusya'nın görüşlerini önemsemediğini göstermektedir (Bağbaşıoğlu, 2022). Bu da küresel ölçekte yani konjonktürel sonuçlar doğuracak olan iki ülkenin üyelik durumları ve Türkiye'nin yaklaşımına yönelik 3 boyutlu analizi zorunlu kılmaktadır zira askeri tarafsız iki komşu ülkenin aynı anda NATO'ya üyelik başvurusu yapması üye adayı iki ülkenin Türkiye ile ilişkilerini 3'lü çerçevede ele alınmasını gerektirmektedir. NATO kolaylaştırıcılığında iki ülke ile ayrı ayrı değil 3 ülkenin 3'lü muhtıra imzalanmasının sebebi de budur.

3.1. Türkiye, Finlandiya ve İsveç: 3'lü Muhtıra

Finlandiya ve İsveç geleneksel askeri tarafsızlık politikasını 2022'de terk ederek NATO'ya üyelik başvurularında bulunmuşlardır. Türkiye başlangıçta başvurunun olumlu değerlendirileceğini ifade etmesine rağmen 3 temel gerekçede açıklanabilecek sorunların çözülmesini beklemiştir (İnt.Kay.10). Türkiye; AB ve ABD tarafından terör örgütü olarak kabul edilen PKK, Türkiye'de terör saldırıları düzenleyen Fetullah Gülen Terör Örgütü (FETÖ) ve YPG'nin ülke içindeki faaliyetlerinin (bayrak açma, propaganda yapma ve para toplama gibi) ifade özgürlüğü çerçevesinde değerlendirilmemesini ve Türkiye'nin tehdit algısına yönelik somut adım atılmasını beklemektedir. İkinci gerekçe ABD tarafından F-35 programından çıkartılan Türkiye'nin Finlandiya ve İsveç'in üyeliği karşılığında F-16 savaş uçakları ile modernizasyon kitlerinin Türkiye'ye temin edilmesi ve ABD'nin Suriye'de desteklediği YPG'ye yönelik politikaların gözden geçirilmesidir. Türkiye doğrudan iki konuyu söylemsel olarak ilişkilendirmese de görüşmelerde yetkililerin iki konuyu tek bağlamda ele alan yaklaşımları olduğu da görülmüştür (İnt.Kay.14). Son gerekçe ise NATO'nun genişlemesinin veto edilmesi veya bekletilmesi karmaşık Türkiye-Rusya ilişkilerinde Rusya'ya karşı Türkiye'nin elini güçlendirmektedir.

Türkiye'nin Finlandiya ve İsveç'in üyeliklerine karşı duyduğu kaygıların giderilmesi için 28 Haziran tarihinde NATO Genel Sekreterinin kolaylaştırıcılığında Madrid'de 3'lü muhtıra imzalanmıştır. Muhtıranın maddeleri incelendiğinde Türkiye'nin duyduğu güvenlik kaygıları ile ilgili NATO'ya katılmak isteyen ülkelerin somut adımlar atmasının beklendiği görülmektedir. Bu kapsamda Türkiye'nin beklentileri özetle; ülkelerin terör örgütü olarak tanımladığı PKK dışında Türkiye'nin terör örgütü olarak tanımladığı PYD ve FETÖ'ye karşı da somut adımların atılması, ülkelerin Türkiye'nin terör örgütü olarak tanımladığı yapılara verilen desteklerin kesilmesi ve somut adımlar atılması, ülkelerin terörle mücadele yasalarını bu kapsamda ele alarak düzenlemeleri, Türkiye'ye yönelik uygulanan silah ambargolarının kaldırılmasıdır. Bu kararların uygulanması ve takibinin sağlanabilmesi için devletler aralarında Dışişleri, İçişleri ve Adalet bakanlıkları, istihbarat servisleri ve güvenlik kurumları uzmanlarından oluşan Daimi Ortak Mekanizma oluşturulmuştur (TCCB, 2022). Genel olarak Türkiye'nin muhtıradaki beklentisinin siyasi olmadığı ve yalnız güvenlik çerçevesinde kaldığı görülmektedir. Bu durum Türkiye'nin NATO genişlemesine karşı olmadığı (10.madde) tehdit algısına yönelik somut adımların atılması durumunda yaklaşımının değişeceğini göstermektedir. Somut adıma atan Finlandiya'nın 2023 yılındaki seçimler öncesinde NATO üyeliğine onay verilmesi bu çerçevede değerlendirilebilir (TCCB, 2022).

3.1.1. Finlandiya

Çizelge 1'de Türkiye ile Finlandiya arasındaki ilişkiler çalışma kapsamında ele alınan ana faktörlerin ve bunların alt boyutların gerekçeleri sunulmaktadır.

3.1.2. İsveç

Çizelge 2'de Türkiye ile İsveç arasındaki ilişkiler çalışma kapsamında ele alınan ana faktörlerin ve bunların alt boyutların gerekçeleri sunulmaktadır.

4. Analizler

Bu bölümde Finlandiya ve İsveç'in NATO'ya yapmış oldukları başvuruların değerlendirilme sürecinde Türkiye'nin vermiş olduğu karar analiz edilecektir. Diğer bir deyişle, Türkiye bu çalışmada ele alınan ana faktörlere ve alt faktörlerine bakarak ilk olarak Finlandiya'nın NATO üyeliğinin onaylanmasının matematiksel gerekçeleri araştırılacaktır. Oyunda Türkiye tek bir seçim yapacaktır ve yaptığı seçim hangi ülkeye öncelikli olarak onay vermesi gerektiği durumunu temsil edecektir. Bu analizleri yapmak için belirsizlik altında karar verme kriterlerinden 3B Laplace, 3B Wald, 3B Hurwicz ve 3B Savage kriterleri kullanılacaktır.

Çizelge 1. Finlandiya'nın Politik, Ekonomik ve Askeri Kriterleri ile İlgili Değerlendirmeler

Faktör	Gereke
Politik: Güven, Dayanışma, Etki	<ul style="list-style-type: none">İktidar ve muhalefet üyeliği desteklemektedir. NATO üyeliği 7 olumsuz 184 olumlu oyla Finlandiya meclisinden geçmiştir (İnt.Kay.21).2023 seçimlerinde muhalefetten iktidara gelen Ulusal Koalisyon Partisi (NCP) parti programında NATO üyeliğine yer vermiştir (İnt.Kay.22).NATO üyeliği kamuoyunda %78 oranında desteklenmektedir (İnt.Kay.12).3'lü muhtıranın ardından mevzuatta değişiklikler yaparak terör örgütlerine katılıma yönelik teşvik, teröre yardım ve tahrik eylemlerini düzenleme kapsamında suç olarak düzenlemiştir İnt.Kay.12, İnt.Kay.15).Gösterilerde PKK bayrağı açılmasına izin verilmemiş ve Türkiye'nin iadesini talep ettiği teröristlerin bazılarını iade etmiştir (İnt.Kay.4,İnt.Kay.5).3'lü muhtırada da belirtildiği gibi Türkiye'nin çekincelerine önem verilmesi ve Finlandiya'nın iç politik koşullar sebebiyle devamlılık olacağına yönelik somut kanıtlar Finlandiya'nın NATO'ya üyeliğinin Türkiye'nin çıkarına olacağını göstermektedir.
Ekonomi: Maliyet Tasarrufu, Ticaret, Kamu Malları	<ul style="list-style-type: none">Finlandiya pazar büyüklüğü, iş gücü ve vergi maliyetleri sebebiyle Türk ihracatçısının dikkatini çekmektedir. AB pazarına giren Türk ürünleri, İsveç, Danimarka veya Almanya aracılığıyla Finlandiya pazarında yer almaktadır (İnt.Kay.16). Bu görüşmelerle doğrudan ticaret kanalı açılabilir.İki ülke arasındaki ticaret 2022 yılında tüm zamanların rekorunu kırmış, 2 Milyar Doların üzerine çıkmıştır (İnt.Kay.6).Finlandiya savunma sanayini güçlendirmek istemektedir ve Türk silah teknolojilerinin Finlandiya'nın dikkatini çektiği, üyeliğin ardından bu durumun değerlendirileceği açıklanmıştır (İnt.Kay.7).Türkiye'nin Dünya'nın ilk 10 ekonomisi arasına girme hedefleri, Finlandiya'ya yönelik ihracat potansiyeli ve savunma sanayine yönelik ambargonun kalkması ekonomik açıdan üyeliğin Türkiye'nin çıkarlarına uyumlu olduğunu göstermektedir.
Askeri: Birlikte Çalışılabilirlik, Standardizasyon, Savaş Gücü:	<ul style="list-style-type: none">Ülkelerin birbirleri arasında savunma ürünleri ihracatı iki ülkelerin birbirlerinin güvenlik önceliklerini tanıdığını ve bu çerçevede dayanışmayı benimsediğini göstermektedir.2023 seçimlerini kazanan NCP, NATO üyeliğine sahip çıkacağını, parti programında belirtildiği gibi güçlü savunma için yatırım yapılacağını, NATO'nun aktif üyesi olunacağını ve NATO operasyonları için sınırlamalar getirmeyeceğini ifade etmektedir.Global Fire verilerine göre askeri güç sıralamasında 2023 yılında Finlandiya 51, Türkiye 11.sırada iken 2024 yılında Finlandiya 50, Türkiye ise 8. Sırada (İnt.Kay.8).Üyelikle birlikte Finlandiya'nın savunma sanayini güçlendireceği açıklanmaktadır. Buna göre iki ülke arasında askeri iş birliği alanları güçlenecektir.Finlandiya üyeliği ile Rusya'ya karşı açılacak yeni cephe, Türkiye-Rusya arasındaki sorunlu alanlarda (Suriye, Kırım, Ukrayna vb.) Türkiye'nin elini rahatlatabilecektir.Finlandiya, 2019 yılında Türkiye'nin Barış Pınarı Harekatının ardından Türkiye'ye yönelik uyguladığı "askeri teçhizat ihracatı ambargosu" nu kaldırarak dayanışma sergilemiştir.

Çizelge 2. İsveç'in Politik, Ekonomik ve Askeri Kriterleri ile İlgili Değerlendirmeler

Faktör	Gereke
Politik: Güven, Dayanışma, Etki	<ul style="list-style-type: none">İsveç, Ermeni ve Süryani diasporalarının çalışmaları sonucunda 2010 yılında sözde Ermeni soykırımı iddialarını tanımıştır. Diğer parlamentolarda alınan kararlardan farklı olarak aynı zamanda Asuri/Süryani/Keldani ve Yunanistan'ın talebi olmamasına rağmen) Pontus Rumlarına yönelik soykırım yapıldığını da kabul etmiştir (İnt.Kay.20).Terörle etkin mücadele için yasalarında yapmaları beklenen değişiklikler ise sürekli ertelenmektedir (İnt.Kay.18).İsveç vatandaşı olan Danimarka merkezli İrkçı Yön Partisi Lideri Rasmus Paludan Türkiye'nin Stokholm Büyükelçiliği yakınlarında polis gözetiminde Kuran-ı Kerim'i yakma eylemi gerçekleştirmiş, eylemden 2 saat sonra PKK ve YPG Stokholm'de eylemlerine devam etmiş, başbakan eylemleri "saygısızlık" olarak tanımlamış ve savcılar eylemleri "ifade özgürlüğü" kapsamında değerlendirmiştir (İnt.Kay.2).İsveç Dışişleri Bakanı olayları provokasyon olarak nitelendirmiş ve İsveç'te gerçekleştirilen eylemlerin hükümetin desteklediği anlamına gelmediğini ifade etmiştir (İnt.Kay.19).İsveç'in muhtırada alınması gereken somut kararları almadığını, Türkiye'ye karşı terör örgütleri tarafından gerçekleştirilen eylemleri engellemediğini ve olaylara zayıf tepkiler verdiği görülmektedir.
Ekonomi: Maliyet Tasarrufu, Ticaret, Kamu Malları	<ul style="list-style-type: none">2019 yılında pandemi sebebiyle düşen İsveç-Türkiye ticaretinin pandeminin ardından her yıl artış trendi gösterdiği görülmektedir. Türkiye'nin İsveç'e 1.7 milyar dolarlık ihracatta bulunurken, Türkiye'nin İsveç'ten ithalatı 1.97 milyar doları bulmuştur. Silah ambargosunun kaldırılması ve iki ülke arasındaki olası iyi ilişkilerinin gelecekte ikili ticaret hacminde potansiyel ilişki alanlarını çeşitlendirebilecektir (İn.Kay.17).
Askeri: Birlikte Çalışılabilirlik, Standardizasyon, Savaş Gücü:	<ul style="list-style-type: none">İsveç'te Finlandiya gibi 2019 yılında Türkiye'ye karşı silah ambargosu kararı almış ve bu kararı 3'lü muhtıra sonrası kaldırmıştır.Global Fire verilerine göre İsveç askeri güç sıralamasında 2023 yılında 37. sırada iken 29. Sırada yer almaktadır (İnt.Kay.9).İki ülkenin askeri güç karşılaştırılması yapıldığında, Türkiye'nin birçok noktada üstün askeri üstünlüğüne rağmen İsveç ile olası iş birliği alanlarının da olabileceği görülmektedir. Karşılaştırmalarda genel olarak İsveç'in deniz gücünün ve lojistik ağının daha iyi olduğu görülmektedir. Bu durum eksilikleri olan iki ülkenin askeri alanda iş birliğine girebilecekleri alanlar olduğunu göstermektedir.

3B karar verme kriterlerinin tercih edilme sebebi bu karar kriterlerinin ele alınacak ülkelerin askeri, politik ve ekonomik etkilerinin Türkiye'nin karar verme sürecine olan etkilerinin bütüncül olarak ele alınarak 2B karar kriterlerine göre daha kapsamlı bir analiz yapmaya imkan

sağlamasıdır. Türkiye gözünden Finlandiya ve İsveç'in politik, ekonomik ve askeri faktörlerinin ve bu faktörlere ait alt faktörler kullanılarak $G \in R^{2 \times 3 \times 3}$ olacak şekilde getiri matrisi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur. Getiri matrisi $G \in R^{2 \times 3 \times 3}$ 'nin her bir kesiti bir ana faktörü temsil

ederken, kesitlerin sütunları ise ilgili ana faktörlerin alt faktörlerini temsil etmektedir. G matrisinde 1. Satır İsveç'i, 2. satır ise Finlandiya'yı temsil etmektedir.

$$G = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} \text{Güv.} & \text{Day.} & \text{Etk.} & \text{MT.} & \text{Tic.} & \text{KM} & \text{BÇ.} & \text{Std.} & \text{AG.} \\ a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & e_2 & f_1 & g_1 & h_1 & i_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & e_2 & f_2 & g_2 & h_2 & i_2 \end{array} \right]$$

Getiri matrisinde kullanılan kısaltmaların açıklamaları şu şekildedir: Güv.: Güven; Day.: Dayanışma; Etk.: Etki; MT.: Maliyet Tasarrufu; Tic.: Ticaret; BÇ.: Birlikte Çalışılabilirlik; Std.: Standartizasyon; AG: Askeri Güç.

Bir önceki bölümde detaylı bir şekilde ele alınan konjonktürel boyutlar sonucunda, Türkiye ile diğer iki ülke arasındaki ilişkiler getiri matrisindeki değişkenler kullanılarak önem derecesi ölçeğinden yola çıkarak önem derecesine göre şu şekilde sıralanmıştır: $a_1 < a_2$, $b_1 < b_2$, $c_2 < c_1$, $d_2 < d_1$, $e_1 < e_2$, $f_1 < f_2$, $g_1 < g_2$, $h_1 = h_2$, $i_2 < i_1$.

Önem derecesi ölçeği ve sıralamalar esas alınarak, aşağıdaki 3B matrisin girdileri örnek olarak seçilmiş ve getiri matrisi oluşturulmuştur.

$$G = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} \text{Güv.} & \text{Day.} & \text{Etk.} & \text{MT.} & \text{Tic.} & \text{KM} & \text{BÇ.} & \text{Std.} & \text{AG.} \\ 2 & 1 & 5 & 3 & 5 & 3 & 6 & 4 & 5 \\ 8 & 7 & 2 & 2 & 7 & 6 & 7 & 4 & 3 \end{array} \right]$$

3B Laplace Kriteri: 3B Laplace yöntemi için getiri matrisinin ∞ –normu kullanılarak verilen tanım aşağıdaki gibi uygulanmıştır.

$$\|G\|_{\infty} = \max_{i=1,2} \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 |g_{ij}^k| = \max_{i=1,2} \{34, 46\} = 46$$

46 değeri ikinci girdiden elde edildiği için 3B Laplace kriteri Finlandiya seçeneğini önermektedir. Öte yandan, ele aldığımız problemde seçimler eş olasılıklı olduğu için alternatif olarak şu şekilde de hesaplama yapılabilir.

$$r_i = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 |g_{ij}^k| = \{3.77, 5.11\} = 5.11$$

$$\max_i r_i = 5.11.$$

Benzer şekilde aynı sonucu işaret etmektedir.

3B Wald Kriteri: 3B Wald kriteri G getiri matrisine uygulandığında

$$W_i^k = \min_j \{g_{ij}^k\} = \{(1, 2)^T, (3, 2)^T, (4, 3)^T\}$$

$$W_i = \min_k \{W_i^k\} = \{1, 2\}$$

$$W_{opt} = \max_i \{W_i\} = 2$$

elde edilir. Görüldüğü üzere 2 değeri ikinci satırdan elde edildiği için 3B Wald kriteri de II. alternatifini yani Finlandiya seçeneğini işaret etmektedir.

3B Hurwicz Kriteri: 3B Hurwicz kriterinin tanımında verilen ifadeleri direkt kullanacak olursak,

$$H_i^k = \max_j \{g_{ij}^k\} = \{(5, 8)^T, (5, 7)^T, (6, 7)^T\}$$

$$H_i = \max_k \{H_i^k\} = \{6, 8\}$$

$$H_{opt} = \max_i \{H_i\} = 8$$

olarak bulunur. Böylece 3B Hurwicz kriterinin sonucu da bir önceki kriterlerle paralellik göstererek Finlandiya seçeneğini önermektedir. Hurwicz'in önerdiği kötümserlik-iyimserlik indeksini kullanmak için ilk olarak z indeksini her iki ülkede de yaşanan Türkiye aleyhindeki olayların sonucunda iki ülkenin Türkiye'nin üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olması sebebiyle Türkiye'nin kısmen olumsuz (kötümser) bir yaklaşım sergilemesi gerekçesiyle 0.5'ten küçük herhangi bir değer seçilebilir bu çalışmada örnek olarak $z = 0.4$ dikkate alınarak analizler yapılmıştır.

$$zW_{opt} + (1 - z)H_{opt}$$

$$= \max_i \{zW_i + (1 - z)H_i\}$$

$$= \max_i \{4, 5.6\} = 5.6$$

Yukarıdaki ifadeden de görüldüğü üzere 5.6 değeri ikinci girdiden gelmektedir, yani Hurwicz kriteri kötümserlik-iyimserlik indeksi kullanıldığında da Finlandiya seçeneğini önermektedir.

3B Savage Kriteri: 3B Savage kriterini uygulamak için ilk olarak tanım gereği pozitif pişmanlık matrisini $R_{ij}^k = \max_k \max_i \{g_{ij}^k\} - g_{ij}^k$ aşağıdaki gibi elde edilir.

$$R = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} \text{Güv.} & \text{Day.} & \text{Etk.} & \text{MT.} & \text{Tic.} & \text{KM.} & \text{BÇ.} & \text{Std.} & \text{AG.} \\ 6 & 7 & 3 & 5 & 3 & 5 & 2 & 4 & 3 \\ 0 & 1 & 6 & 6 & 1 & 2 & 1 & 4 & 5 \end{array} \right]$$

Daha sonra 3BSavage kriterinin tanımındaki diğer ifadeleri kullanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

$$Y_i = \max_k \max_j \{R_{ij}^k\} = \{(7, 6)\}$$

$$Y_{opt} = \min_i Y_i = 6$$

3B Savage kriteri de diğer 3B kriterlerde olduğu gibi ikinci alternatifi yani Finlandiya seçeneğini işaret etmektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmada ilk olarak Finlandiya ve İsveç'in NATO'ya başvuru sürecini ve konjonktürel alt yapısını ele aldık. Bu kapsamda, her iki ülkenin Türkiye gözünden dış politika analizlerinde ön plana çıkan faktörler olan politik, ekonomik ve askeri ana faktörleri açısından detaylı bir şekilde değerlendirmeler yaptık ve bu ana faktörlere ait alt faktörleri ele aldık. Bu incelemeler sonucunda Finlandiya ve İsveç'in bu üç ana faktörünün (Askeri, Politik ve Ekonomik) Türkiye gözünden önem derecesi ölçeği

kullanarak önem derecelerini belirledik. Daha sonra bu önem derecelerinin birbirleriyle olan etkileşimlerini de göz önüne alarak 3B bir doğaya karşı matris oyunu şeklinde modelledik. Son olarak modellediğimiz bu oyunda İsveç ve Finlandiya'nın özelliklerinin Türkiye'nin karar verme sürecine olan etkilerinin birlikte inceleyebilmek için 3B karar kriterlerini kullanarak analiz ettik ve sonuçlarını sunduk.

Analizler sonunda elde edilen sonuçlara bakıldığında her bir 3B kriter Türkiye için mevcut durumlar dahilinde oluşturmuş olduğumuz 3B getiri matrisi özelinde Finlandiya alternatifini işaret etmekte olduğu görülmüştür. Diğer bir deyişle, elde edilen analiz dahilinde Türkiye'nin bu iki ülkenin NATO üyelikleri konusunda rasyonel olarak bir tercih yapması durumunda ilk olarak Finlandiya'nın üyeliğini onaylaması Türkiye'nin çıkarları açısından matematiksel olarak daha avantajlı bir seçenek olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Nitekim, Türkiye'nin bugünkü yaptığı tercih de bu yönde olmuş ve ilk olarak Finlandiya'nın NATO üyeliğini onaylamıştır (İnt.Kay.3). Bunun yanında Türkiye İsveç'in NATO üyeliğini yaklaşık 1 yıl sonra onaylamıştır. Bunlara rağmen İsveç'in üyeliği Finlandiya'nın üyeliği gibi ikili ilişkiler üzerinden olmamıştır. İsveç'in NATO üyeliğine onay vermesi için ABD baskısı gerçekleşmiş ve İsveç'in üyeliği ancak ABD Başkanı Joe Biden'in Türkiye'ye F-16 satışı için Kongre'nin etkili isimlerine mektup göndermesi ile Resmi Gazete'de (Karar Sayısı:8141) yayınlanmıştır (İnt.Kay.13). İki ülkenin farklı zamanda üye olması göstermektedir ki yukarıda sonuçlanan analizlerdeki, gibi Türkiye ikili ilişkilerde İsveç'in adım atmaması durumunda üyeliğine onay vermemeye devam edecektir. 3. aktörün etkin olması ile Türkiye'nin ulusal güvenliğine yönelik İsveç'ten alamadığı destek ABD tarafından farklı şekillerde sağlanabilmiştir. Nihayetinde İsveç'in üyelik süreci, Türkiye'nin ulusal güvenlik kaygılarına yönelik adım atılması ile mümkün hale gelmiştir.

BRICS (Brezilya,Rusya,Hindistan,Çin,Güney Afrika) gibi kurumsallaşan yeni kutupların ortaya çıkması, Çin'in yükselişi ve İsrail'in Filistin işgali ve işgale karşı yaptırım uygulanamaması uluslararası sistemde siyasi, ekonomik ve askeri dönüşümün yaşandığını açık şekilde göstermektedir. Bu dönüşümün bir parçası olarak Rusya'nın Ukrayna işgali karşısında askeri olarak tarafsız olan iki ülkenin NATO'ya üye olmak istemesi, mevcut gelişmelerin ileride meydana gelebilecek olası etkilerine yönelik analiz imkânı tanımaktadır. Üyesi olarak Türkiye'nin de onay verdiği "NATO 2030:Yeni Bir Çağ için Birliktelik" NATO'nun 2020 (İnt.Kay.11) raporunda açıkça Çin'in güvenlik sorunu olarak tanımlanması ve Japonya'da

NATO irtibat ofisi açma çalışmaları gelecekte NATO'nun genişlemesinin farklı kıtalara uzanabileceğini göstermektedir. NATO'nun en önemli askeri ve siyasi gücü olan ABD, Asya-Pasifik bölgesinde İngiltere ve Avustralya ile birlikte kurduğu AUKUS güvenlik paktına Japonya'yı dahil etmeyi değerlendirmektedir (İnt.Kay.1). Bu çalışma, güncel tartışmalar ekseninde, gelecekte ABD'nin pakt ile NATO arasında işbirliği yapılması veya pakta üye ülkelerin NATO ile daha yakın işbirliği yapabilmesinin Türkiye'ye etkisi konusunda ön görülebilir çalışmalar yapılmasına katkı sağlayabilecektir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm bilimsel etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Murat Özkaya: Araştırma, Yazma, Kavramsallaştırma, Analiz.

Yücel Baştan: Araştırma, Yazma, Kavramsallaştırma, Analiz.

Burhaneddin İzgi: Araştırma, Yazma, Kavramsallaştırma, Analiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

Çalışmada herhangi bir veri kullanılmamıştır.

6. Kaynaklar

- Allan, P. ve Dupont, P. C. 1999. International Relation Theory and Game Theory: Baroque Modeling Choices and Empirical Robustness. *International Political Science Review*, **20 (1)**, 23-47
<https://doi.org/10.1177/0192512199201002>
- Aumann, R. ve Schelling, T. 2005, Contributions to game theory: *Analysis of conflict and cooperation*. Nobel Prize in Economics Documents, **2005-1**.
- Bağbaşıoğlu A., 2022. Implications of NATO's 2022 Strategic Concept on its Enlargement and Partnership Policies and Türkiye's Position: Challenges and Opportunities /Stratejik Araştırmalar Merkezi. *SAM Papers*, **22**.
- Bauch ,C.T. ve Earn, D. J. D. 2004. Vaccination and the theory of games, *PNAS September 7*, **101(36)**, 13391–13394.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0403823101>
- Bigdeli, H., Hassanpour, H. ve Tayyebi, J. 2018. Constrained bimatrix games with fuzzy goals and its application in nuclear negotiations, *Iranian J. Numer. Anal.Optim.*, **8 (1)**, 81–110.
<https://doi.org/10.22067/ijnao.v8i1.55385>
- Binmore, K. 2009, Rational decisions, Princeton, NJ: Princeton University Press.

- Correa, H. 2001. Game theory as an instrument for the analysis of international relations. *Ritsumeikan Annual Review of International Studies*, **14(2)**, 187-208.
- Çolak, K ve Koç, A. Ş. 2016, Grev Tehdidi Olmaksızın Yapılan Toplu Pazarlıklarda Oyun Teorisi Analizi. *Political Economy of Taxation*, **195**.
- Diesen, G. 2015. EU and NATO relations with Russia: After the collapse of the Soviet Union, Routledge.
- Finus, M. 2000. Game theory and international environmental cooperation: A survey with an application to the Kyoto-Protocol, Nota di Lavoro, 86, Fondazione Eni Enrico Mattei, Milano.
- Fishburn, P. 1970, Utility theory for decision making, Newyork, Wiley.
- Gao, L. ve Wang, X. 2019. Healthcare supply chain network coordination through medical insurance strategies with reference price effect. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16(18)**, 3479.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16183479>
- Gilboa, I. 2010, Rational choice, Cambridge, MA: MIT Press.
- Haywood Jr, O. G. 1954. Military decision and game theory. *Journal of the Operations Research Society of America*, **2(4)**, 365-385.
- Harsanyi, J. C. 1967, Games with Incomplete Information Played by 'Bayesian' Players, I-III, *Management Science*, **14(3)**, 159-182.
- Hazell, P.B.R. 1970. Game Theory-An Extension of its Application To Farm Planning Under Uncertainty. *Journal of Agricultural Economics*, **21(2)**, 239-252.
<https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.1970.tb02034.x>
- Hudson, V. M., ve Vore, C. S. 1995. Foreign Policy Analysis Yesterday, Today, and Tomorrow. *Mershon International Studies Review*, **39** (Supplement_2), 209-238.
<https://doi.org/10.2307/222751>
- İzgi, B. ve Özkaya, M. 2020. Tarım sigortası gerekliliğinin oyun teorisi yardımıyla gösterilmesi: Matris norm yaklaşımı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **20(5)**, 824-831.
<https://doi.org/10.35414/akufemubid.677349>
- İzgi, B., Özkaya, M., Üre, N. K. ve Perc, M. 2023. Machine learning driven extended matrix norm method for the solution of large-scale zero-sum matrix games. *Journal of Computational Science*, **68**, 101997.
<https://doi.org/10.1016/j.jocs.2023.101997>
- İzgi, B., & Özkaya, M. (2019). A new perspective to the solution and creation of zero sum matrix game with matrix norms. *Applied Mathematics and Computation*, **341**, 148-159.
<https://doi.org/10.1016/j.amc.2018.08.013>
- Jeffrey, R. 1990, The logic of decision, 2. Ed. Chicago: University of Chicago Press.
- Keller, J. V. 2022. Game theory without theory: Interactive choice in pigeons, humans and machines. *Learning and Motivation*, **77**, 101784.
<https://doi.org/10.1016/j.lmot.2022.101784>
- Kreps, D., 1988, Notes on the theory of choice, CO: Westview.
- Luce, R. D. Ve Raiffa, H. 1957, Games and Decisions. Newyork, Wiley.
- Madani, K. 2010. Game theory and water resources. *J. Hydrol.*, **381(3-4)**, 225-238.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.045>
- Maynard-Smith, J. M. ve Price, G. R. 1973. The logic of animal conflict. *Nature*, **246(5427)**, 15-18.
<https://doi.org/10.1038/246015a0>
- Monaghan, S. (2023) Solving Europe's Defense Dilemma. CSIS Briefs.
- Nanduri, V. ve Das, T. K. 2007. A reinforcement learning model to assess market power under auction-based energy pricing, *IEEE Trans. Power Syst.*, **22 (1)**, 85-95.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.888977>
- Nash, J. F. 1950a. The Bargaining Problem. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, **18(2)**, 155-162.
<https://doi.org/10.2307/1907266>
- Nash, J. F. 1950b. Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Science*, **36(1)**, 48-49.
<https://doi.org/10.1073/pnas.36.1.48>
- Nash, J. F. 1951. Noncooperative games. *Annals of Mathematics*, **54**, 289-295.
<https://doi.org/10.2307/1969529>
- Nash, J. F. 1953. Two-person cooperative games. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, **21**, 128-140.
<https://doi.org/10.2307/1906951>
- Nowé, A., Vrancx, P. ve Hauwere, Y.M.D. 2012. Game theory and multi-agent reinforcement learning, in: Reinforcement Learning, Springer, Berlin, Heidelberg, 441-470.

- https://doi.org/10.1007/978-3-642-27645-3_14
- Okura, M. 2007. Competitive Strategies of Approach. *International Studies of Management & Organization*, **27(2)**, 53-69.
<https://doi.org/10.2753/IMO0020-8825370203>
- Özer, O. O. 2015, Determining the best sales time period for dried figs: a game theory application. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*, **27(2)**, 91-99.
<https://doi.org/10.1080/08974438.2014.897665>
- Özkaya, M. ve İzgi, B. 2021. Uluslararası Bir Krizin Oyun Teorisi ile Matematiksel Olarak Modellenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **10(4)**, 1334-1341.
<https://doi.org/10.17798/bitlisfen.942655>
- Özkaya, M. ve Bakkaloğlu, A. 2023. Askeri Açından Denk Olmayan İki Ülke Savaşının Oyun Teorisi ile Modellenmesi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, **9(2)**, 268-275.
<https://doi.org/10.28979/jarnas.1204904>
- Özkaya, M., İzgi, B. ve Perc, M. 2022. Axioms of Decision Criteria for 3D Matrix Games and Their Applications. *Mathematics*, **10(23)**, 4524.
<https://doi.org/10.3390/math10234524>
- Pataki, B. 1996. A critique of some classical theories of decision under uncertainty. *Period. Polytech. Soc. Manag.*, **4**, 79–92.
- Rass, S., König, S., ve Schauer, S. 2017. Defending against advanced persistent threats using game theory. *PLOS ONE*, **12(1)**, e0168657.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168675>
- Shapley, L. S. 1953, A Value for n-Person Games. *Contributions to the Theory of Games*, **2**, 307–317. Princeton University Press.
<https://doi.org/10.1515/9781400881970-018>
- Sanchez-Soriano, J. 2013. An overview on game theory applications to engineering, *Int. Game Theory Rev.*, **15(3)**, 1340019.
<https://doi.org/10.1142/S0219198913400197>
- Steven, B. H. 1961, An application of game theory to a problem in location strategy. *Papers in Regional Science*, **7(1)**, 143-157.
<https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1961.tb01776.x>
- Von Neumann, J. 1928. Zur theorie der gesellschaftsspiele. *Mathematische annalen*, **100(1)**, 295-320.
<https://doi.org/10.1007/BF01448847>
- Von Neumann, J. ve Morgenstern, O. 1944. Theory of games and economic behavior, Princeton University Press.
- Vincent, T. L. 1983, Game theory as a design tool, *J. Mech., Trans, and Automation*, **105(2)**, 165-170.
<https://doi.org/10.1115/1.3258503>
- Weibull, J. W. Evolutionary game theory. MIT press, 1997.
- İnternet Kaynakları**
1. ANKASAM.2024.
<https://www.ankasam.org/abd-ingiltere-ve-avustralya-aukusun-ikinci-sutunu-cercevesinde-japonyayla-isbirligi-yapmayi-degerlendiriyor/> (17.04.2024)
 2. BBC News Türkçe. 2023.
https://www.bbc.com/turkce/articles/c4n8yrny_r1po (26.06.2023)
 3. BBC News Türkçe. 2024.
<https://www.bbc.com/turkce/articles/cyrzgd3r7epo> (15.04.2024)
 - 4- Euronews. 2022.
<https://tr.euronews.com/2022/09/30/isvec-turkiyeye-silah-satisina-yeniden-izin-verdi> (25.06.2023)
 - 5- Euronews. 2023.
<https://tr.euronews.com/2023/01/23/finlandiya-ekim-ayinda-turkiyenin-istedigi-bir-kisiyi-daha-iade-etti> (24.06.2023)
 - 6- Finland Abroad. 2023 (t.y.).
https://finlandabroad.fi/web/tur/current-affairs/-/asset_publisher/h5w4iTUJhNne/content/finland-t%25C3%25BCrkiye-trade-hits-record-highs-for-second-year-running-in-2022/384951 (29.06.2023)
 - 7- Financial Times. 2022.
<https://www.ft.com/content/cf154d42-d324-40a9-8478-9f59bee053b5> (29.06.2023)
 - 8- Global Fire, (2024b).
<https://www.globalfirepower.com/countries-listing.php> (29.02.2024)
 - 9- Global Fire. 2024a,
<https://www.globalfirepower.com/countries-listing.php> (29.02.2024)
 - 10- Levin P.. (t.y)
<https://www.fpri.org/article/2023/03/the-turkish-veto-why-erdogan-is-blocking-finland-and-swedens-path-to-nato/> (28.05.2023)
 - 11- NATO.2020.
https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/

- 2020/12/pdf/201201-Reflection-Group-Final-Report-
Uni.pdf (17.04.2024)
- 12- Radio Free Europe Radio Liberty. (t.y.).
<https://www.rferl.org/a/finland-nato-survey-membership/32145117.html> (16.05.2023)
- 13- Resmi Gazete, 20 Ocak 2024 Tarihli ve 3241 Sayılı,
<https://www.resmigazete.gov.tr/fihrist?tarikh=2024-01-26> (17.04.2024)
- 14- Savunma Sanayi ST. 2023.
<https://www.savunmasanayist.com/turkiyeden-abdli-senatorlere-f-16-tedarikinde-isvec-resti/>
(20.07.2023)
- 15- TBMM, 2023.
<https://www.tbmm.gov.tr/Haber/Detay?Id=a067a845-d174-4a0e-bd27-01870ef52307> (16.05.2023)
- 16- T.C. Ticaret Bakanlığı Uluslararası Anlaşmalar ve Avrupa Birliği Genel Müdürlüğü, 2022,
https://ticaret.gov.tr/data/5ef6018613b8762b38e2fe7e/F%C4%B0NLAND%C4%B0YA-%C3%9Clike%20Profili_2023.pdf (25.06.2023)
- 17- T.C. Ticaret Bakanlığı Uluslararası Anlaşmalar ve Avrupa Birliği Genel Müdürlüğü, 2022,
<https://ticaret.gov.tr/data/> (26.06.2023)
- 18- TRT Haber, 2023.
<https://www.trthaber.com/haber/dunya/isvecte-yeni-terorle-mucadele-ceza-yasasi-ileri-bir-tarihte-parlamentoda-oylanacak-751781.html> (14.07.2023)
- 19- Twitter. 2023.
<https://twitter.com/TobiasBillstrom/status/1616838480545386496> (15.07.2023)
- 20- VOA, 2023.
<https://www.voaturkce.com/a/a-17-2010-03-11-voa12-88927152/882487.html> (19.07.2023)
- 21- Yle, 2023. <https://yle.fi/a/74-20020423> (20.07.2023)
- 22- Kokoomus.Fi. 2023.
<https://www.kokoomus.fi/nationalcoalition-party-election-program/?lang=en> (16.06.2023)



Faiz Oranının Anüite Fiyatları Üzerindeki Etkisine İlişkin Bir Çalışma



*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 22.12.2023

Kabul/Accepted: 07.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Importance of Interest Rate on Annuity Prices: A Case Study

Çiğdem LAZOĞLU * , Müge YELDAN , Uğur KARABEY 

Hacettepe Üniversitesi, Fen Fakültesi, Aktüerya Bilimleri Bölümü, Ankara.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Sigortacılıkta, uzun dönemli anüiteler için doğru iskonto faktörünün belirlenmesi son derece önemlidir. Aktüeryal çalışmalarda iskonto faktörü genellikle sabit olarak ele alınmaktadır; ancak yüksek volatiliteli faiz oranına sahip ülkelerde sabit faiz oranı kullanmak, doğru olmayan hesaplamalara neden olmaktadır. Bu çalışmada farklı ekonomik ve demografik yapıya sahip ülkeler için Monte Carlo Simülasyonu oluşturulmuş, simülasyonda ölümlülük için Lee-Carter modeli, faiz için Vasicek modeli tercih edilerek, sabit ve stokastik faiz ile hayat anüitesi fiyatlarının ampirik olarak dağılımı elde edilmiştir. Risk ölçütleri kullanılarak hem ölümlülükteki hem de faizdeki oynaklığın anüite fiyatları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak faiz oranındaki değişkenlik arttıkça, anüite fiyatlarındaki volatilitenin de yükseldiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hayat Anüitesi; Lee-Carter ölümlülük Modeli; Vasicek faiz modeli; Risk ölçütleri

Abstract

Determination of the accurate discount factor for long-term annuities is crucial in insurance sector. In actuarial studies, the discount factor is typically assumed to be fixed. However using a fixed interest rate in countries with highly fluctuating interest rates can lead to unreliable calculations. In this paper, a Monte Carlo Simulation is constructed for countries with different economic and demographic structures where the Lee-Carter and Vasicek model is used for mortality and interest rate, respectively. Thanks to this scenario the empirical distribution of annuities with both fixed and variable interest rates are established. Risk measures are employed to analyze the impact of mortality volatility and interest rate volatility on the annuity prices. The findings indicate that annuities valued with high interest rate volatility exhibit greater overall volatility. As a result, as the variability of interest rates increases, the volatility of the annuity prices also rises.

Keywords: Life annuity; Lee-Carter Mortality Model; Vasicek short rate model; Risk Measures

1. Giriş

Aktüerler, geleneksel olarak sabit ölüm ve sabit faiz oranları kullanarak anüite ödemelerinin aktüeryal bugünkü değerini hesaplarlar. Değişen yaşam koşulları, ekonomik şartlar, teknolojik gelişmeler ya da yaşanabilecek bir felaket gelecekteki hem ölümlülük hem de faiz oranlarını belirsiz hale getirmektedir. Anüite ürünleri doğası gereği uzun vadeli yapıya sahiptir ve bu belirsizlikler anüite fiyatı üzerinde oldukça etkilidir.

Son yıllarda stokastik ölümlülük ve faiz oranları kullanılarak hayat anüitelerinin fiyatlamasına ilişkin yapılan çalışmalar popüler hale gelmiştir. Literatürde, ölümlülüğün anüite fiyatı üzerindeki etkisini Lee-Carter modeli ile ele alan çalışmalara Denuit (2008), Richards ve Currie (2009), Biffis ve Denuit (2011) örnek gösterilebilir.

Anüite ürünlerinde faiz belirsizliği için stokastik faiz modelleri ilk olarak Pollard (1971) ve Boyle (1976)

tarafından kullanılmıştır. Beekman ve Fuelling (1990) hem faiz oranlarının hem de gelecekteki yaşam sürelerinin rastgele olduğu anüiteler için bir model oluşturmuştur. Wang vd. (2004), Vasicek ve CIR modellerini kullanarak faiz oranı dalgalanmalarının hayat poliçesi primi ve riski üzerindeki etkisini incelemiştir. Hoedemakers vd. (2005) stokastik faizlerin sırasıyla Brownian hareketi ve Ornstein-Uhlenbeck süreci ile modellendiği hayat anüitesi dağılımı için yaklaşım önermiştir. Dufresne (2007) getirilerin Geometrik Brown hareketine uygun olduğu varsayımı altında stokastik bir hayat anüitesinin dağılımı için analitik yaklaşımlar önermiştir.

Dowd vd. (2011), faiz oranı riski ve uzun ömürlülük riskinin gelecek yıllardaki anüite fiyatlarının dağılımı üzerindeki etkisini ölçen bir algoritma önermiştir. Çalışmada ölümlülük riski için Cairns-Blake-Dowd model, faiz oranı için CIR model kullanılmıştır. Liu (2013) ölüm riski için Lee-

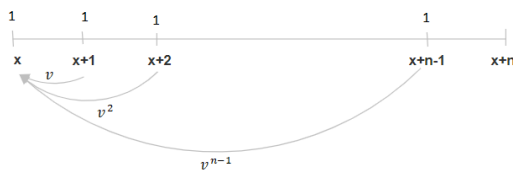
Carter ve Cairns-Blake-Dowd modellerini, faiz riski için ise tek faktörlü ve iki faktörlü CIR modellerini kullanarak anüitedeki belirsizliği incelemiştir. Rabiti ve Borgonovo (2020) stokastik ölümlülük ve faiz oranı faktörlerinin anüite üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla duyarlılık yöntemlerini karşılaştırmalı bir analiz ile incelemiştir.

Çalışma, farklı piyasa koşulları için faiz oranındaki değişkenliğin anüite fiyatlarına duyarlılığını gösterme konusunda literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Faizin anüite üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sabit ve stokastik faiz ile anüite fiyatları elde edilmiştir. Sabit faizli hayat anüiteleri, ekonomiye duyarlı olmayan sadece ölümlülük verisine duyarlı olan senaryoyu yansıtmaktadır. Diğer yandan, stokastik faizli hayat anüiteleri, ekonomideki belirsizlikleri ve faiz oranlarındaki dalgalanmaların etkilerini daha etkili bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu kapsamda farklı demografik ve ekonomik yapılaraya sahip Türkiye, ABD ve Kanada analizlerde ele alınmıştır. Ölümlülük yapısı için Lee-Carter (1992), stokastik faiz için Vasicek (1977) modeli kullanılarak parametre tahminleri yapılmıştır. Yaşam olasılıkları ve stokastik faiz oranları için Monte-Carlo simülasyonu ile gelecek 10, 20, 30 yıllık tahminler elde edilmiştir. Böylece ele aldığımız ülkeler için hayat anüitesinin ampirik dağılımı elde edilmiştir. Stokastik faizin anüite üzerindeki etkisini gösterebilmek için risk ölçütlerinden de yararlanılmıştır.

2. Hayat Anüitesi

Anüite ürünlerinin fiyatlarının doğru hesaplanması hayat sigorta şirketleri için finansal sorumluluklar açısından kritik bir değere sahiptir. Hayat anüite ürünleri, yaşam koşuluna bağlı olarak sürekli veya eşit aralıklarla yapılan düzenli ödemeler dizisidir. Ödemeler, belirli bir dönem boyunca yapılıyorsa dönem hayat anüitesi, kişi hayatta kaldığı süre boyunca yapılıyorsa tam hayat anüitesi olarak adlandırılır.

Şekil 1’de gösterildiği üzere x yaşındaki birine n yıl boyunca yaşama koşuluna bağlı olarak her yılın başında yapılacak 1 birimlik ödemelerin bugünkü değerlerinin toplamı hayat anüitesi olarak adlandırılır.



Şekil 1. x yaş için n yıllık dönem anüitesi

Şekil 1’de gösterilen ifadenin matematiksel olarak gösterimi, t yılında, n yıllık dönem anüitesinin bugünkü değeri:

$$\ddot{a}_{x:t:n} = \sum_{k=0}^{n-1} v_t^k p_{x,t} \quad (1)$$

şekindedir. v_t , t yılındaki iskonto faktörünü göstermek üzere; sabit faiz kullanıldığında $v_t^k = (1+i)^{-k}$, stokastik

faiz kullanıldığında $v_t^k = e^{-\int_t^{t+k} r(s)ds}$, $k > 0$ dir. t yılında, x yaşındaki bireyin k yıl yaşama olasılığı ${}_k p_{x,t} = \exp(-\sum_{j=0}^{k-1} \mu_{x+j,t+j})$ ile ifade edilir.

Hayat anüite ürünleri genellikle uzun vadeli ürünlerdir ve fiyatlanırken iki husus önemlidir: Faiz oranı ve ölümlülük.

2.1. Lee-Carter ölümlülük modeli

Lee ve Carter (1992), hem yaş grupları hem de yıllar üzerinden ölümlülüğün değişimini dikkate alan bir modeldir. Modelin en büyük eksikliği; hataların sabit varyanslı (homoscedastic) dağıldığı varsayımı ve ölümlülük değişiminde kuşak (cohort) etkisini dikkate almamasıdır. Bu modele göre $\mu_{x,t}$ ölümlülük oranı

$$\log(\mu_{x,t}) = a_x + b_x \kappa_t + \varepsilon_{x,t} \quad (2)$$

ve

$$\kappa_t = \delta + \kappa_{t-1} + \xi_t \quad (3)$$

olarak ifade edilir. Burada, $\mu_{x,t}$, x yaşı ve t yılı için ölüm hızını, $\varepsilon_{x,t}$ hata terimini gösterir. a_x zamandan bağımsız yaşa özel ortalama ölümlülük hızını, κ_t zamana bağlı ölümlülük trendini ve b_x x yaşı için ölüm hızının, ölümlülük trendindeki değişikliklere duyarlılığını ifade eder. κ_t , bir Gauss rastgele yürüyüşü olarak modellenir.

δ drift parametresi ve $\xi_t \sim N(0, \sigma_\kappa^2)$ ile bağımsız ve aynı dağılıma sahip olan ölümlülük trendinin hata terimidir. (Parametre tahmini için $\sum_t \kappa_t = 0$ ve $\sum_x \beta_x = 1$ varsayımı yapılmaktadır.)

Lee-Carter ölümlülük modelinde parametre tahmini, tekil değer ayrışımı (TDA) ile yapılan en küçük kareler (EKK) yöntemi ile elde edilir. Bu yöntemin modele uygulanışına ilişkin ayrıntılı bilgi Lee-Carter (1992) çalışmasında mevcuttur.

t yılında, x yaşındaki bir ortak özellikli grup için n yıllık tahmini yaşama olasılığı;

$${}_n p_{x,t} = \exp\left(-\sum_{j=0}^{n-1} \mu_{x+j,t+j}\right) \quad (4)$$

$$= \exp\left(-\sum_{j=0}^{n-1} a_{x+j} + b_{x+j} \kappa_{t+j}\right)$$

ve

$$\kappa_t = \delta \cdot j + \kappa_0 + \sum_{h=1}^j \xi_h \quad (5)$$

ile elde edilir.

2.2. Vasicek faiz modeli

Vasicek (1977) tarafından kısa vadeli faiz oranlarının modellenmesi için ortaya atılan model ilk stokastik modellerden biridir. Model faiz oranlarının tek bir stokastik faktöre (piyasa riski faktörüne) dayalı olarak modellenebileceğini varsayar. Kısa vadeli faiz oranı $r(t)$:

$$dr(t) = \alpha(\beta - r(t))dt + \sigma dW(t) \quad (6)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemde; $W(t)$ Wiener süreci olarak tanımlanan rastgele piyasa riskini, α ortalamaya dönme hızını, β uzun dönem ortalamasını, σ kısa vadeli faiz oranının volatilitisini gösterir. Parametre tahminleri

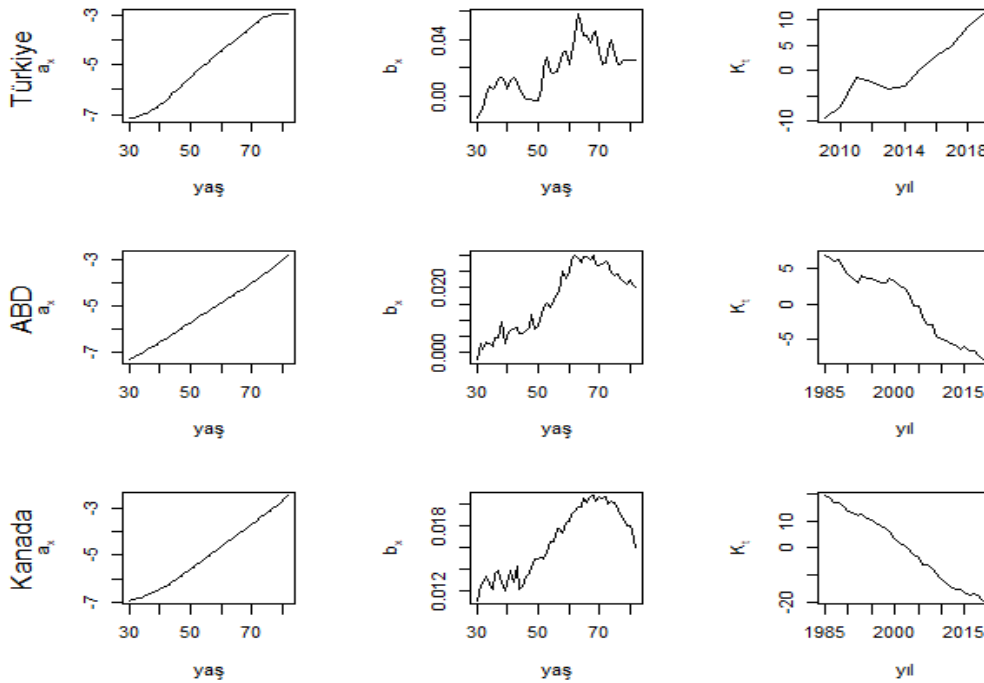
elde edebilmek için modeli kesikli hale getirmek gerekmektedir.

$$\Delta r(t) = \alpha(\beta - r(t))\Delta t + \sigma\sqrt{\Delta t}Z \quad (7)$$

Burada Δt , zaman aralığını; Z ise standart normal dağılımı ifade etmektedir $Z \sim N(0, 1)$. Modelin parametre tahminleri en çok olabilirlik yöntemi ile elde edilebilir. Ornstein-Uhlenbeck sürecine dayanan Vasicek modeli, ortalamaya dönme eğilimindedir. Bu durum şunu ifade eder: Kısa vadeli faiz oranı uzun vadeli ortalamasının üzerinde ise (altında ise), belli bir süre sonra uzun dönemli denge değerine doğru faiz değerinin düşmesi (artması) muhtemeldir. Böylece faiz oranlarının aşırı artmayacağı veya aşırı düşmeyeceği garanti edilir. Modelin en büyük eksikliği; faiz oranlarının negatif olmasına imkan vermesidir.

3. Uygulama

Bu çalışmada, ekonomik ve demografik koşulların anüite üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla Türkiye, sosyo-ekonomik açıdan daha gelişmiş olan ABD ve Kanada ile karşılaştırılmıştır. Beklenen yaşam süresi, bir ülkenin sosyo-ekonomik yapısını yansıtan önemli bir göstergedir. 2019 verilerine göre, 65 yaşındaki bir erkek için beklenen yaşam süresi Türkiye'de 16.3 iken, ABD ve Kanada için sırasıyla 18.2 ve 19.6'dır (İnt. Kyn. 1).



Şekil 2. Lee-Carter Ölümlülük modelinin tahmini parametre değerleri

Bu çalışmada, 30-80 yaş aralığındaki erkek ölümlülük verileri iki farklı kaynaktan elde edilmiştir. Türkiye için 2009-2019 yılları arasındaki veriler Türkiye İstatistik Kurumu 'dan (İnt. Kyn. 2), Kanada ve ABD için ise 1985-

2019 yılları arasındaki veriler Human Mortality Database' den (İnt. Kyn. 3) alınmıştır. Lee-Carter modeli ile parametre tahminleri gerçekleştirilmiştir. Lee-Carter ölümlülük modelinin tahmini parametre değerleri Şekil

2’de gösterilmiştir. Şekil 2’de yaşa özel ortalama ölümlülük hızı (a_x) üç ülke için benzerdir. Zamana bağlı ölümlülük trendi (κ_t) ABD ve Kanada için yıllar içinde azalırken Türkiye için artmaktadır. Ölümlülük trendi toplumdaki sosyo-ekonomik, sağlık ve demografik faktörlerin etkisi altında ölümlülük oranlarının nasıl değişeceği konusunda önemli ipuçları sunar. κ_t teriminin azalma eğilimde olması genel olarak yaşam kalitesinin artmasıyla ilişkilendirilebilir.

Ölümlülük trendinin bir zaman serisi olarak modellenmesi ve tahmin edilmesi için ARIMA modellerinden yararlanılmıştır. Farklı ARIMA modelleri için tahminler yapılmış ve tüm ülkelerin ölümlülük trendinin ARIMA(0,1,0) modeline daha uygun olduğu Çizelge 1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1. ARIMA modeli için AIC değerleri

	ABD	Türkiye	Kanada
ARIMA(0,1,0)	65.04	46.34	75.9
ARIMA(1,0,0)	88.03	62.62	130.21
ARIMA(1,1,0)	77.08	50.4	94.34
ARIMA(1,1,1)	-	52.29	91.57
ARIMA(0,1,1)	78.05	50.51	106.91
ARIMA(0,0,1)	173.5	67.57	239.91
ARIMA(2,0,0)	87.69	61.2	107.01
ARIMA(2,1,0)	87.69	52.35	90.25
ARIMA(2,1,1)	72.72	54.29	85.07
ARIMA(2,0,1)	-	62.97	91.1

ARIMA (0,1,0) ile parametre tahmin sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir.

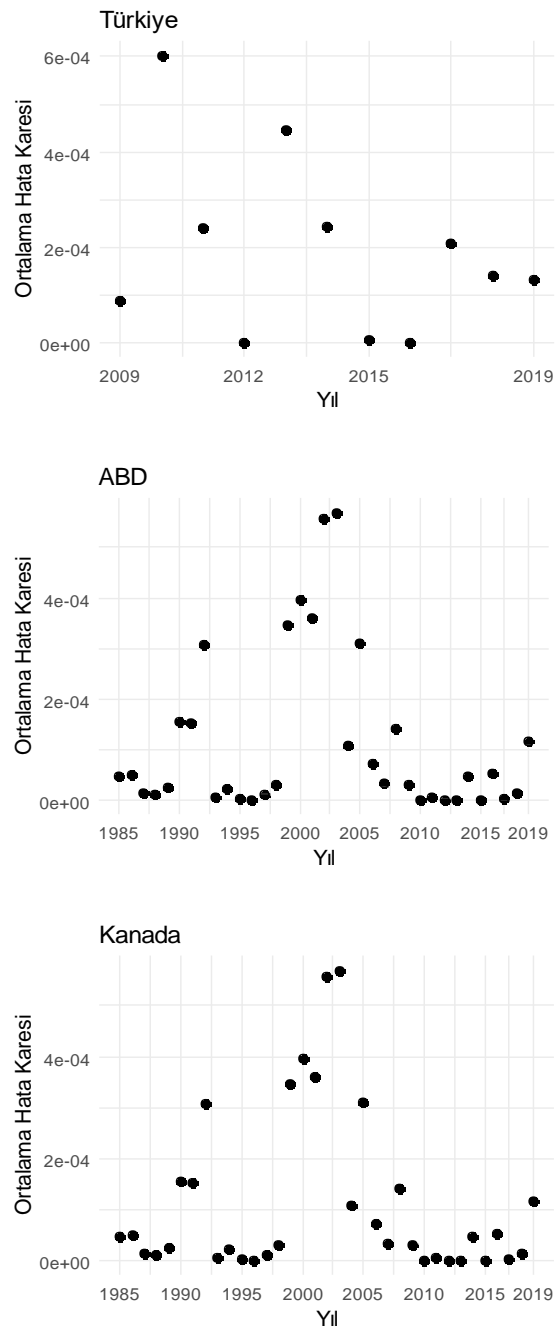
Çizelge 2. Ölümlülük trendinin (κ_t) parametre tahminleri

Parametre	ABD	Türkiye	Kanada
δ	-0.4297 (0.1018)*	2.057 (0.6355)*	-1.1250 (0.1195)*
σ^2	0.3632	4.488	0.500

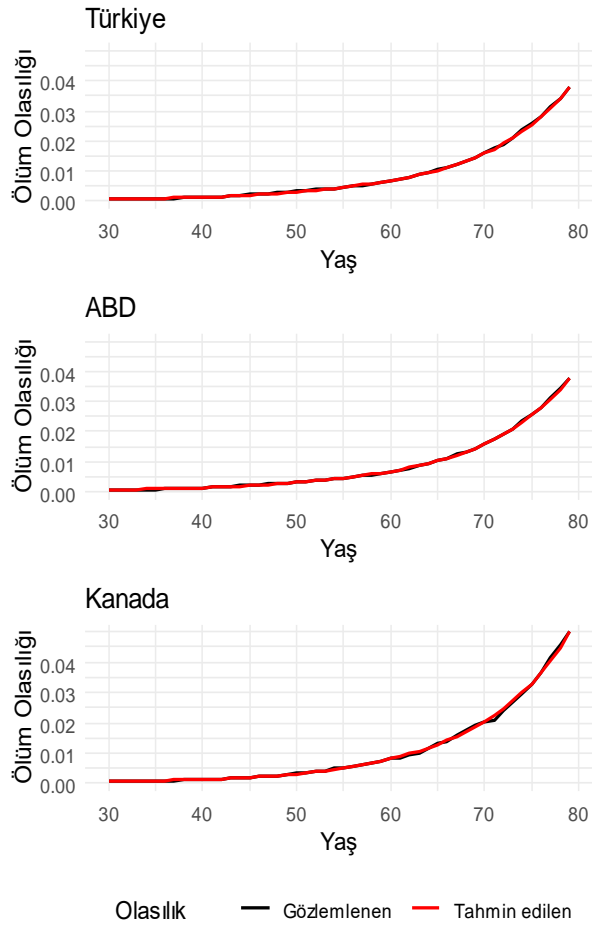
(* drift parametresinin hatasını gösterir.)

Tahmin edilen parametreler kullanılarak elde edilen ölüm olasılıklarının ortalama hata kareleri yıllar bazında Şekil 3’te verilmiştir. Hataların yıllar içerisinde değişkenlik göstermesinin yanı sıra küçük değerler aldığı görülmektedir. Bu durum Lee-Carter modelin gerçeğe yakın tahminler verdiğini göstermektedir.

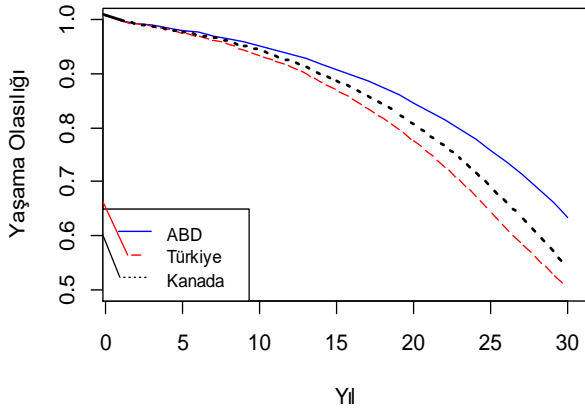
2015 yılı için her bir yaşa ilişkin tahmin edilen ile gözlemlenen ölüm olasılıkları Şekil 4’te gösterilmektedir. Monte Carlo simülasyonu oluşturulurken, bu parametreler kullanılarak farklı vadeler için (2019’dan başlayarak maksimum 30 yıl olmak üzere) ölüm olasılıkları tahmin edilmiştir. 10000 simülasyon ile elde edilen 50 yaşındaki bireyin $t = 1, 2, \dots, 30$ yıl yaşaması olasılıkları Şekil 5’te gösterilmiştir. Şekil 5’te ABD’nin yaşama olasılıkları yüksek iken Türkiye’nin olasılıklarının daha düşük olduğu görülmektedir. Zaman içerisinde olasılıklardaki değişimin daha fazla olması ölümlülükte oynaklığın daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 3. Ölüm olasılığının yıllar itibariyle ortalama hata kareleri



Şekil 4. 2015 yılı için gözlemlenen ve parametreler ile tahmin edilen ölüm olasılıkları



Şekil 5. 50 yaş için simülasyon sonucu elde edilen yaşam olasılıkları

Anüite fiyatlaması için önemli bir faktör olan faizi modellemek amacıyla, 2 Ocak 2008 ile 31 Aralık 2019 yılları arasındaki 3 aylık risksiz faiz oranlarının günlük değerleri kullanılmıştır (İnt. Kyn. 4). Çalışmada kullanılan faiz verisine ilişkin betimleyici istatistikler Çizelge 3'te yer almaktadır.

Çizelge 4'teki α parametresi incelendiğinde Kanada'nın faiz oranının, ortalamasına daha hızlı dönme eğiliminde olduğu söylenebilir. β 'ya göre, Türkiye'nin faiz oranının

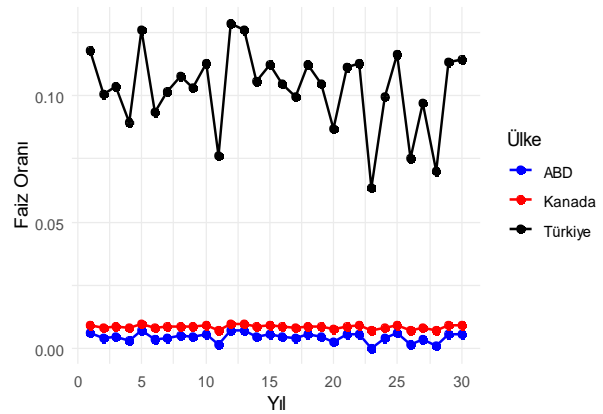
uzun vadeli ortalamasının en yüksek olduğu görülmektedir. σ değerlerine göre Türkiye için finansal piyasalarındaki belirsizliğin ve oynaklığın daha fazla olduğu söylenebilir. Vasicek modeli ile gelecek 30 yıla ilişkin oluşturulan simülasyonların yıllar itibarıyla ortalama değerleri Şekil 6'da verilmektedir. Türkiye için faiz oranlarının daha yüksek ve değişken olduğu gözlemlenmektedir. Vasicek modeli kullanılarak parametre tahminleri gerçekleştirilmiş ve Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. 3 aylık risksiz faiz oranına ilişkin betimleyici istatistikler

	ABD	Türkiye	Kanada
Ortalama	0.0058361	0.1099838	0.0096854
Std. sapma	0.0079229	0.0461545	0.0058004
Minimum	0.0100000	0.0400000	0.0016000
Maksimum	0.0323900	0.2548500	0.0379000

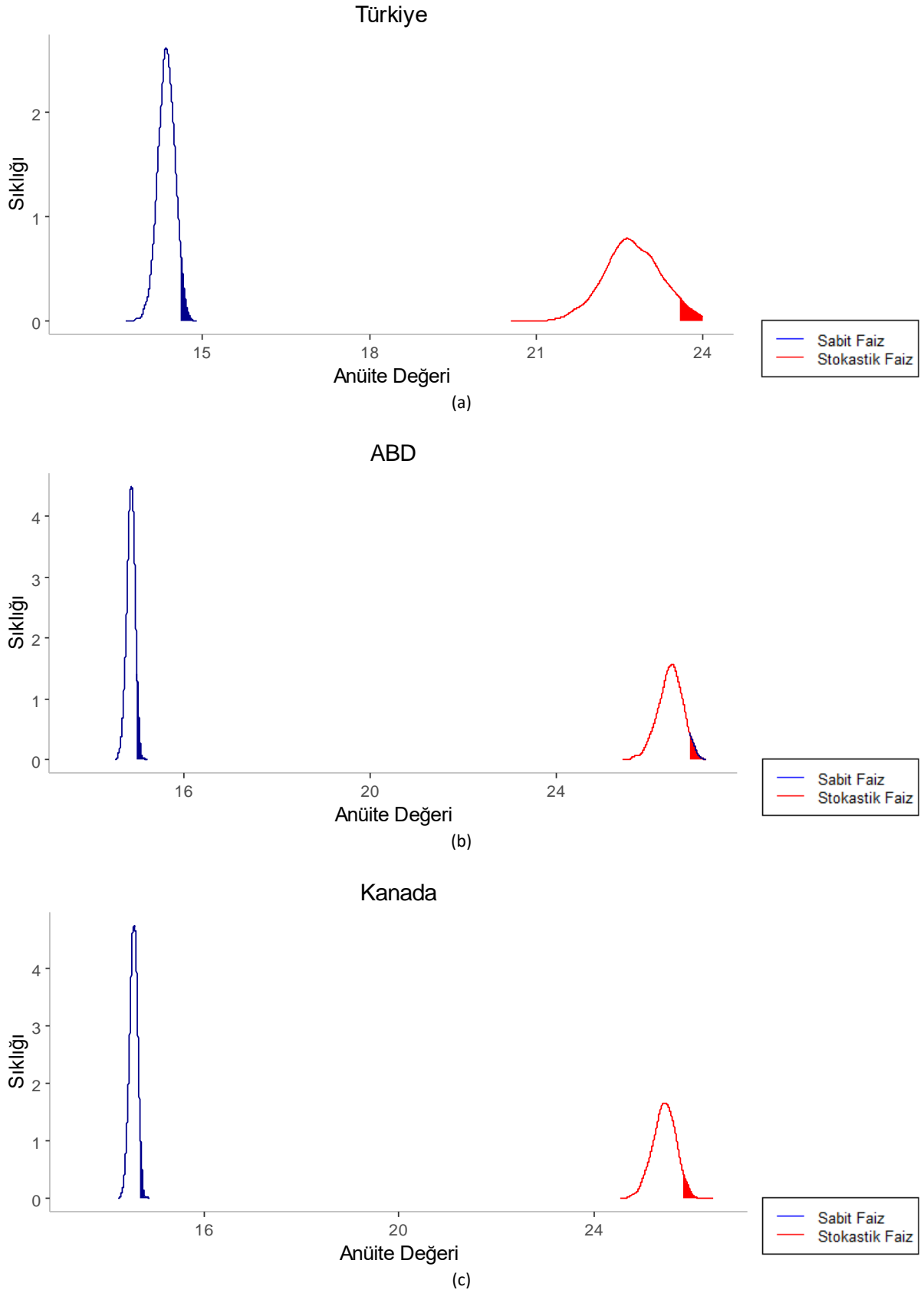
Çizelge 4. Vasicek faiz modelinin parametre tahminleri

Parametre	ABD	Türkiye	Kanada
α	0.6512837	0.6420228	1.0865789
β	0.0037388	0.1026490	0.0081055
σ	0.0056919	0.0507881	0.0035860
r_0	0.0154100	0.1026400	0.0016600



Şekil 6. Simülasyon sonucu elde edilen faiz oranları

Faizdeki belirsizliğin anüiteye yansımaları görmek için, elde edilen parametre değerleri kullanılarak farklı vadeler için (10, 20 ve 30) 2019'dan başlayarak simülasyon 10000 kez tekrarlanmıştır. Böylelikle hem sabit faizle hem de stokastik faizle hayat anüite fiyatları elde edilmiştir. Sabit faiz oranı, tek bir değer olarak belirlenmiştir. Çalışmada bu sabit değer 0.05 olarak kabul edilmiştir. Farklı değerlerin kullanılması mümkün olsa da, çalışmanın amacı anüite fiyatlarında faizin etkisini göstermek olduğundan sabit değer ne olduğu görece olarak önemsizdir. Elde edilen anüitelerin ampirik dağılımlarına ilişkin bilgiler Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Tüm ülkeler için sabit ve stokastik faizli 30 yıllık anüitelerin dağılımı ((a) Türkiye, (b) ABD ve (c) Kanada için dağılımları ifade eder. Taralı alanlar dağılımın 0.95 yüzdeliğini aşan değerlerini göstermektedir.

Şekil 7 'de sabit ve stokastik faizli anüite değerleri yer almaktadır. Ölümlülük yapılarındaki değişkenliğin anüite üzerindeki etkisi sabit faizli anüite dağılımıyla görülmektedir. Ölümlülükle birlikte ekonomik değişkenliğin etkisi stokastik faizli anüite dağılımı ile gözlemlenebilir. Sabit faizli anüite değerleri ele alındığında, Türkiye'nin dağılımı mortalitedeki değişkenlikten kaynaklı daha geniş aralığa yayılmaktadır. Stokastik faizli anüitelerin dağılımı, ekonomi ve ölümlülük açısından ülkeler arasındaki farklılıkları daha dinamik bir şekilde yansıtmaktadır. Sabit faizli anüite dağılımları daha sivriyken stokastik faizli anüite dağılımları daha basık bir yapı sergilemektedir. Ayrıca tüm ülkeler için anüite dağılımı üzerinde, ekonomik yapının etkisinin daha belirgin olduğu görülmüştür. Anüitenin değerleri daha ayrıntılı bir şekilde Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 5. Sabit faizli anüite değerleri ve standart sapmaları

	ABD	Türkiye	Kanada
$\ddot{a}_{50:\overline{10} }$	7.970513 (0.0033225)	7.92938 (0.0036407)	7.948673 (0.0041562)
$\ddot{a}_{50:\overline{20} }$	12.52101 (0.02887419)	12.30257 (0.043031)	12.4001 (0.02853284)
$\ddot{a}_{50:\overline{30} }$	14.87564 (0.0846195)	14.34317 (0.1226149)	14.56164 (0.0810306)

Şekil 5'ten tespit edilebilen Türkiye yaşam olasılıklarının görece düşüklüğü Çizelge 5'te anüite fiyatlarının da görece düşük olmasına neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Türkiye'ye ait anüitenin standart sapmaları tüm dönemler için daha yüksektir. Bu durum, yaşam olasılıklarının volatilitésinin yüksekliğinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 6. Stokastik faizli anüite değerleri ve standart sapmaları

	ABD	Türkiye	Kanada
$\ddot{a}_{50:\overline{10} }$	9.766781 (0.02337984)	8.907974 (0.1866079)	9.706788 (0.01101282)
$\ddot{a}_{50:\overline{20} }$	18.837 (0.06931814)	16.80504 (0.2901798)	18.52688 (0.05936222)
$\ddot{a}_{50:\overline{30} }$	26.43162 (0.2594304)	22.73947 (0.518828)	25.43985 (0.2376628)

Çizelge 6'da Türkiye için tahmin edilen hayat anüitesi fiyatlarının diğer ülkelerden önemli derecede sapma gösterdiği göze çarpmaktadır. Bu farklılık faiz oranının yüksek ve oynaklığının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu sonuçlardan ABD ve Kanada'nın finansal olarak daha istikrarlı bir yapıya sahip olduğu yorumu da yapılabilir.

Anüitenin dönemi uzadıkça faizin etkisi daha önemli hale gelmekte, sabit ve stokastik faizli anüite arasındaki fark artmaktadır. Örneğin ABD'ye ait sabit ve stokastik faizli anüite değerleri arasındaki fark 10 dönemlik bir hayat anüitesi için yaklaşık olarak 1.796 iken 30 dönemde 11.555'e kadar çıkmaktadır. Benzer durum anüitelerin standart sapmaları için de geçerlidir.

Anüite fiyatlarından değişkenliği, farklı bir bakış açısı ile analiz etmek için risk ölçütlerinden riske maruz değer ve beklenen kayıp kullanılmıştır. Riske maruz değer (Value at risk-VaR) genellikle belirli bir zaman diliminde ve belirli bir güven düzeyinde karşılaşılabilecek maksimum olası hasarı ifade eder. Riske maruz değer

$$VaR_{\alpha}(X) = \inf \{x \in [0, \infty) : F_X(x) \geq \alpha\} \quad (8)$$

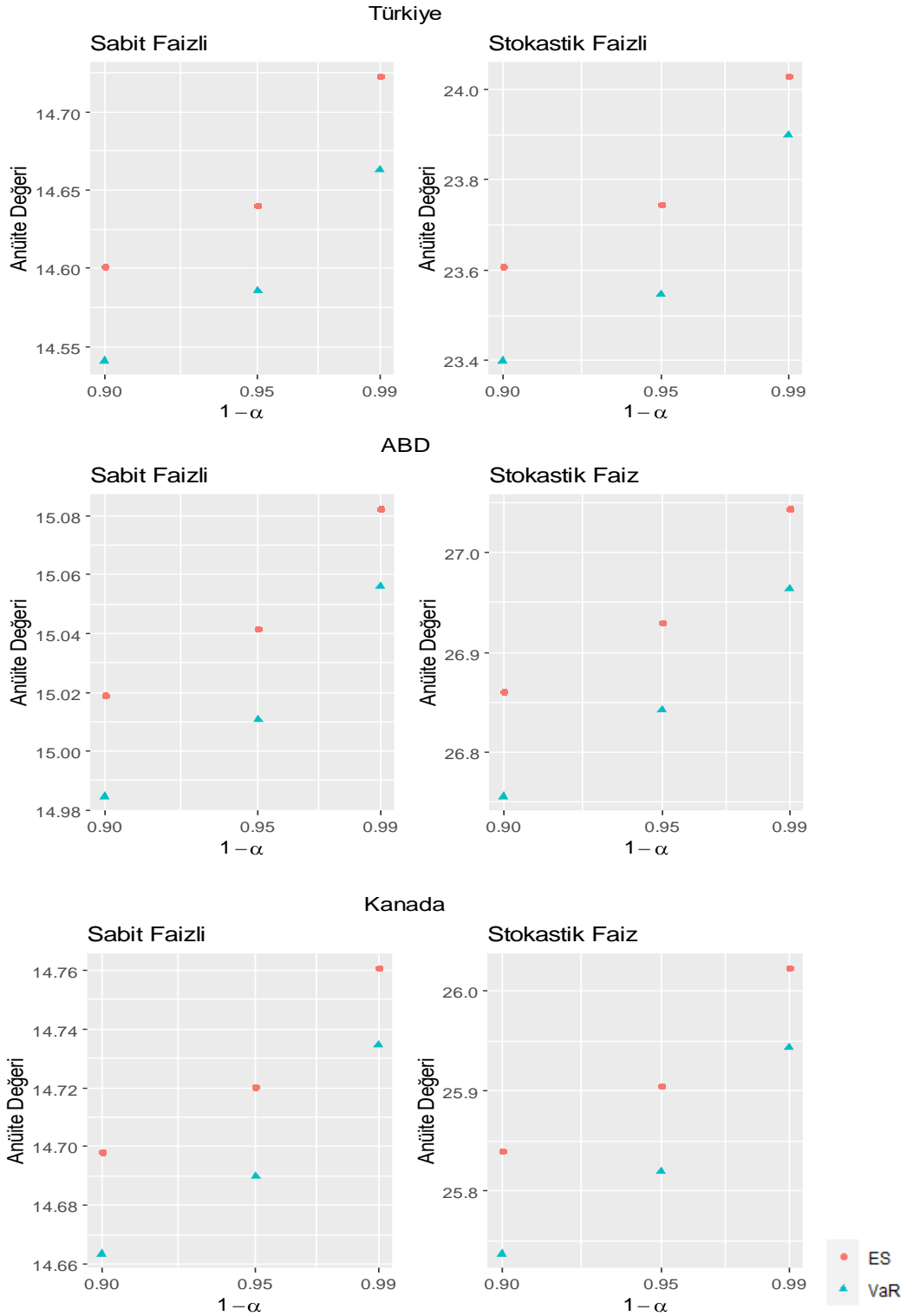
ile ifade edilir. α güven düzeyini, $F_X(x)$, X rastlantı değişkeninin kümülatif dağılımını göstermektedir. Riske maruz değer parasal bir ölçüt olduğundan popüler olmakla birlikte, tutarlı risk ölçütü özelliklerini sağlamadığından eleştirilmektedir. Bu kapsamda literatürde yapılan çalışmalar sonucu tutarlı bir risk ölçütü olan beklenen kayıp ortaya çıkmıştır. Riske maruz değer dağılımın kuyruğuna ilişkin sabit bir noktayı (çeyrekliği) ifade ederken, beklenen kayıp bu noktayı aşan tüm değerlerin ortalaması olarak değerlendirilir ve

$$ES_{\alpha}(X) = \frac{1}{1-\alpha} \int_{\alpha}^1 VaR_p(X) dp \quad (9)$$

ile ifade edilir.

Bu çalışmada her iki risk ölçütü üzerinden analizler değerlendirilmiştir. Böylece faiz ve mortalite oranı kapsamında yaşanacak değişikliklerin risk ölçütleri yönünden tepkisel analizleri incelenmiştir. Risk ölçütleri $\alpha = 0.90, 0.95, 0.99$ güven düzeyleri ile Şekil 8 'de gösterilmiştir.

Şekil 8 'de sabit ve stokastik faizli anüite için riske maruz değer (VaR) ve beklenen kayıp (ES) değerleri hesaplanmıştır. Grafiklerde farklı güven düzeyleri incelenmiştir. Sabit faizli anüitenin riske maruz değerleri ve beklenen kayıpları arasında görece farklılık olmadığı belirlenmiştir. Şekil 8 incelendiğinde tüm ülkeler için stokastik faizli anüitenin risk ölçütleri arasında belirgin bir fark olduğu görülmektedir. Özellikle Türkiye için farkın görece daha fazla olduğu söylenebilir. Bu durum, Türkiye için anüite fiyat dağılımı kuyruğunun diğer ülkelerden daha kalın ve uzun, ayrıca oynaklığının daha yüksek olmasından kaynaklıdır.



Şekil 8. 50 yaş için 30 yıllık anüitenin $\alpha = 0.90, 0.95, 0.99$ için riske maruz değerleri ve beklenen kayıpları

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, finansal risk yönetimi açısından faiz oranlarının anüite fiyatları üzerindeki etkisi Lee-Carter ölümlülük modeli ve Vasicek stokastik faiz modeli kullanılarak incelenmiştir. Lee-Carter modeli ile yaş gruplarına bağlı olarak belirlenen ölümlülük tahminleri ve Vasicek modeli ile elde edilen stokastik faiz oranları

kullanılarak Monte Carlo simülasyonları oluşturulmuştur. Bu simülasyonlar ile farklı vadeler için yaşam olasılıkları ve faiz oranlarının rassal değişimleri, hem dağılım yapısı hem de risk ölçütleri yönünden detaylı olarak analiz edilmiştir.

Sabit ve stokastik faiz faktörlerinin anüite fiyatları üzerindeki etkileri incelenmiş, sabit faizli anüitelerin fiyatları beklenen bir faiz oranı üzerinden hesaplandığı için

daha istikrarlı olsa da, stokastik faizli anüite fiyatlarının faiz oranlarındaki dalgalanmalara daha duyarlı olduğu belirlenmiştir. Dağılımın farklı güven düzeyleri için hesaplanan risk ölçütlerindeki değişkenlik de bu durumu destekleyen bir bakış açısı olarak değerlendirilmiştir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: Metodoloji, Tasarım, Analiz ve Yorumlama, Görselleştirme, Yazma

Yazar-2: Metodoloji, Tasarım, Yazma, Kaynaklar, İnceleme ve Düzenleme

Yazar-3: Analiz ve Yorumlama, İnceleme ve Düzenleme, Danışmanlık

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

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

5. Kaynaklar

Beekman, John A., and Clinton P. Fuelling. 1990. "Interest and Mortality Randomness in Some Annuities." *Insurance Mathematics and Economics* **9**, 185-196. [https://doi.org/10.1016/0167-6687\(90\)90033-A](https://doi.org/10.1016/0167-6687(90)90033-A)

Biffis, Enrico, and Michel Denuit. 2011. "Lee-Carter Goes Risk-Neutral." *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.848304>.

Boyle, Phelim P. 1976. "Rates of Return as Random Variables." *The Journal of Risk and Insurance* **43**, 693-713. <https://doi.org/10.2307/252033>

Denuit, Michel. 2008. "Comonotonic Approximations to Quantiles of Life Annuity Conditional Expected Present Value." *Insurance: Mathematics and Economics* **42**, 831-838. <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2007.09.00>

Dowd, Kevin, David Blake, and Andrew J.G. Cairns. 2011. "A Computationally Efficient Algorithm for Estimating the Distribution of Future Annuity Values Under Interest-Rate and Longevity Risks." *North American Actuarial Journal* **15**, 237-247. <https://doi.org/10.1080/10920277.2011.10597619>

Dufresne, Daniel. 2007. "Stochastic Life Annuities." *North American Actuarial Journal* **11**, 136-157. <https://doi.org/10.1080/10920277.2007.10597441>

Hoedemakers, Tom, Grzegorz Darkiewicz, and Marc Goovaerts. 2005. "Approximations for Life Annuity Contracts in a Stochastic Financial Environment." *Insurance: Mathematics and Economics* **37**, 239-269. <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2005.02.003>

Lee, Ronald D., and Lawrence R. Carter. 1992. "Modeling

and Forecasting U.S. Mortality." *Journal of the American Statistical Association* **87**, 659-675.

<https://doi.org/10.1080/01621459.1992.10475265>

Liu, Xiaoming. 2013. "Annuity Uncertainty with Stochastic Mortality and Interest Rates." *North American Actuarial Journal* **17**, 136-152. <https://doi.org/10.1080/10920277.2013.795481>

Pollard, J. H. 1971. "On Fluctuating Interest Rates." *Bulletin De l'Association Royale Des Actuaries Gelges* **66**, 68-94. <https://doi.org/10.2307/1426648>

Rabitti, Giovanni, and Emanuele Borgonovo. 2020. "Is Mortality or Interest Rate the Most Important Risk in Annuity Models? A Comparison of Sensitivity Analysis Methods." *Insurance: Mathematics and Economics* **95**, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2020.09.001>

Richards, S. J., and I. D. Currie. 2009. "Longevity Risk and Annuity Pricing with the Lee-Carter Model." *British Actuarial Journal* **15**, 317-365. <https://doi.org/10.1017/s1357321700005675>

Vasicek, Oldrich. 1977. "An Equilibrium Characterization of the Term Structure." *Journal of Financial Economics* **5**, 177-188. [https://doi.org/10.1016/0304-405X\(77\)90016-2](https://doi.org/10.1016/0304-405X(77)90016-2)

Wang, Nan, Russell Gerrard, and Steven Haberman. 2004. "The Premium and the Risk of a Life Policy in the Presence of Interest Rate Fluctuations." *Insurance: Mathematics and Economics* **35**, 537-551. <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2004.07.004>

İnternet kaynakları

- 1- <https://data.oecd.org/healthstat/life-expectancy-at-65.htm#indicator-chart>. (12.02.2024)
- 2- <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr> (11.12.2023)
- 3- <https://www.mortality.org> (11.12.2023)
- 4- <https://finance.yahoo.com/> (10.02.2024)



Stance Detection on Short Turkish Text: A Case Study of Russia-Ukraine War

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 17.10.2023

Kabul/Accepted: 08.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Türkçe Kısa Metinlerde Duruş Tespiti: Rusya-Ukrayna Savaşı Örneği

Serdar ARSLAN* , Eray FIRAT 

Çankaya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Abstract

In recent years, social media has emerged as a crucial source of information for gauging public sentiment on a variety of topics. As a result, the need for automated data extraction from these platforms has grown. Stance detection, a subtask in natural language processing, plays a pivotal role in this process by automatically determining users' opinions regarding specific subjects, events, or individuals. To address this, we developed a labeled Turkish dataset focused on determining users' stances on the Russia-Ukraine War using social media content. The dataset, comprising 8215 tweets from Twitter, was meticulously cleaned and annotated for two key targets: Russia and Ukraine. We evaluated several machine learning methods, including Support Vector Machines, Random Forest, k-Nearest Neighbor, XGBoost, Long-Short Term Memory (LSTM), and Gated Recurrent Unit (GRU), with word embeddings from GloVe and FastText. Additionally, we incorporated a transformer-based approach for stance detection. Given the dataset's imbalance between targets, we applied undersampling and oversampling techniques alongside these algorithms. Our experiment results indicate that BERT-based models outperformed all other methods, with LSTM and GRU producing similarly strong outcomes. The newly established Turkish corpus stands as a valuable resource in this field, with potential for future use in conjunction with transformer-based approaches. In summary, this study advances the field of stance detection research in the context of Turkish text.

Keywords BERT; Deep Learning; NLP; Stance Detection

Öz

Son yıllarda sosyal medya, çeşitli konulardaki halkın görüşlerini anlamak için önemli bir bilgi kaynağı haline gelmiştir. Bu nedenle, bu verilerden otomatik bilgi çıkarmak öneminin arttığı bir alan haline gelmiştir. Doğal dil işleme alanının alt görevlerinden biri olan görüş belirleme, otomatik bilgi çıkarma için kritik bir konudur. Duruş tespiti, kullanıcının belirli bir konu, olay veya kişi hakkındaki tutumunu otomatik olarak belirler. Bu çalışmada, Rusya-Ukrayna Savaşı'na yönelik sosyal medya kullanıcılarının tutumlarını belirleme görevine odaklanan Türkçe etiketli bir veri kümesi oluşturulmuş ve bu veri kümesinde çeşitli makine öğrenimi yöntemleri değerlendirilmiştir. Bu çalışma için 8215 tweet Twitter'dan toplandı ve temizlendi. Veri kümesi daha sonra Rusya ve Ukrayna olmak üzere iki hedefle etiketlendi. Stance Detection görevi için GloVe ve FastText kelime gömme ile Support Vector Machines, Random Forest, k-Nearest Neighbor, XGBoost, Long-Short Term Memory (LSTM) ve Gated Recurrent Unit (GRU) modelleri kullanılmıştır. Ayrıca, duruş tespiti için transformer tabanlı bir yaklaşım da kullanılmıştır. Veri kümesinin hedefler arasındaki dengesizliği dikkate alındığında, bu algoritmalarla birlikte örnek azaltma ve örnek artırma yöntemleri de kullanılmıştır. Deney sonuçları, BERT tabanlı modellerin diğer tüm modelleri geride bıraktığını göstermektedir. Bu sonuçların yanı sıra, LSTM ve GRU da BERT tabanlı modelin sonuçlarına oldukça benzer sonuçlar üretmiştir. Yeni oluşturulan Türkçe veritabanı, bu araştırma alanı için değerli bir kaynak olarak kabul edilebilir ve gelecekte transformer tabanlı yaklaşımlarla birlikte kullanma potansiyeline sahiptir. Özetle, bu çalışma, Türkçe metin bağlamında duruş tespiti araştırma alanını ilerletmektedir.

Anahtar Kelimeler BERT; Derin Öğrenme; Doğal Dil İşleme; Duruş Tespiti.

1.1. Introduction

Stance Detection is commonly regarded as a component of sentiment analysis. Its primary objective is to ascertain an individual's stance concerning a specific target, which can be an explicitly mentioned or implied entity, concept, event, idea, opinion, claim, subject, and more (Mohammad et al. 2016). In contrast to sentiment analysis, Stance Detection primarily centers on discerning a person's standpoint or perspective regarding an

evaluative subject, whether it entails supporting or opposing the topic. Stance Detection is intricately connected to various other Natural Language Processing (NLP) tasks that address its subproblems (Küçük and Can 2020).

The field of detecting stance in social media is relatively new in the realm of Natural Language Processing, and there is still ongoing exploration of the influence of

language and social interactions on a user's stance. Stance-taking has a well-established background in sociolinguistics, with the primary focus being the analysis of an author's viewpoint as expressed in their texts. Fundamentally, the objective of stance determination is to uncover the implicit perspective conveyed within an author's text by considering three key factors: linguistic actions, social interactions, and individual identity (ALDayel and Magdy 2021).

Automating the evaluation of stance has been suggested as a potential initial step in assisting human fact-checkers in identifying false claims (Riedel et al. 2018). Consequently, the Fake News Challenge initiative conducted a competition (FNC-1) to promote the development of algorithms designed to automatically analyze the positions taken by a news source on a specific issue (Pomerleau and Rao 2015). This challenge garnered significant attention from the Natural Language Processing (NLP) community, with participation from 50 teams representing both academia and industry. FNC-1 tasked participants with creating a system that assesses the stance toward a headline when provided with a news article title and its content. The potential stance labels included 'agree,' 'disagree,' 'discuss,' or 'unrelated.' However, it's worth noting that many researchers often simplify this to "Favor," "Against," or "None," frequently omitting the "Unrelated" tag.

As the use of social media platforms like Twitter continues to surge in popularity, the demand for proficient stance detection systems has grown significantly. The exploration of stance detection on social media is in its early stages, with uncertainties about the roles language and social interaction play in deducing a user's stance. Stance detection has a rich history in sociolinguistics, focusing on understanding the writer's perspective through their text. Primarily, the goal of stance detection is to deduce the implicit viewpoint from the writer's text, associating the stance with three key factors: linguistic acts, social interactions, and individual identity (ALDayel and Magdy 2021). These systems have become pivotal in comprehending users' viewpoints and sentiments concerning a wide range of topics. In particular, the ability to detect the stance of Turkish tweets holds great potential for gaining valuable insights into the attitudes and opinions of Turkish-speaking users on diverse issues.

The Stance Detection objective can be expressed through the following equation, involving 'T' for text or 'U' for user and 'G' for the stance tag. The core aim of Automatic Stance Detection is to automatically categorize the

author's stance towards a predefined target, assigning one of the available stance tags (ALDayel and Magdy 2021).

$$\text{Stance}(T, U|G) = \{\text{Favor}, \text{Against}, \text{None}\} \quad (1)$$

Datasets for stance detection have been predominantly available in the literature for English, and to a lesser extent, for languages like Spanish, Italian, Japanese, Arabic, Russian, Chinese, Catalan, English-Hindi, and Turkish. These datasets initially originated from online forums during the early stages of stance detection research and later transitioned to microblogs (Küçük and Can 2020).

Turkish, due to its complex inflectional and derivational structure, presents distinct challenges in various Natural Language Processing (NLP) tasks compared to languages with simpler morphologies. Previous NLP research on Turkish, benefiting from these unique linguistic characteristics, has paved the way for studies involving similar languages (Yıldırım et al. 2014). In contrast, stance detection research for Turkish is still in its infancy, with only a limited number of studies and datasets focusing on stance detection within the realm of social media and blog posts.

To bridge this gap, our study introduces a dataset consisting of 8215 tweets that capture users' stances on two aspects related to the Russia-Ukraine War. These tweets have been manually annotated for stance, categorizing them as 'favor' or 'against.' In general, in stance detection, the task is often to classify a given piece of text into one of three categories: "favor," "against," or "neutral" (Küçük and Can 2020). Each category represents the stance or opinion expressed in the text regarding a particular subject or topic. By removing the neutral class, our model simplifies the task and focuses on identifying polarized opinions. This can be suitable in scenarios where the goal is to discern between clear positive and negative sentiments or opinions. This is particularly relevant in our domain where neutral stances don't carry significant importance or where the primary interest lies in understanding and analyzing polarized viewpoints.

For the analysis of stance detection on this newly created Turkish dataset, we employed a variety of machine learning methods, including Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbor (KNN), Random Forest (RF), eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), Long Short-Term Memory (LSTM), Gated Recurrent Units (GRU), and Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT). A crucial aspect of text mining

studies is the effective representation of the text content, and thus, we incorporated word embedding models in all these methods.

This work makes several valuable contributions to the field of stance detection and natural language processing, including:

- **Creation of a Turkish-Labeled Dataset:** The study introduces a novel and manually annotated Turkish dataset specifically designed for stance detection in the context of the Russia-Ukraine conflict. This dataset, comprising over 8,000 tweets, fills a significant gap in Turkish NLP research, providing a valuable resource for future studies.
- **Performance Evaluation of Multiple Algorithms:** The research evaluates a wide range of machine learning algorithms, including Support Vector Machines, Random Forest, K-Nearest Neighbor, XGBoost, LSTM, GRU, and BERT, on the newly created Turkish dataset. This comparative analysis sheds light on the strengths and weaknesses of different models for stance detection tasks.
- **Exploration of Word Embeddings:** By incorporating both fastText and GloVe word embeddings, the study explores the impact of different textual representations on model performance. This offers insights into the choice of word embeddings for stance detection tasks.
- **Analysis of Imbalanced Data:** Stance detection often deals with imbalanced datasets, where one stance significantly outweighs the other. The research addresses this challenge by applying oversampling and undersampling techniques and evaluating their effects on classifier performance. This provides guidance on handling imbalanced data in stance detection tasks.
- **Benchmarking with BERT:** The study leverages state-of-the-art language model BERT for stance detection and demonstrates its exceptional performance in comparison to other machine learning algorithms. This underscores the potential of transformer-based approaches for stance detection on social media platforms.
- **Contributions to Non-English Languages:** The findings from this research have broader implications, especially for the study of stance detection in non-English languages. The insights and methodologies developed in this work can be applied to similar languages with complex morphologies.
- **Applications in Monitoring and Analysis:** The results of this study can be valuable for researchers, policymakers, and journalists interested in monitoring

and analyzing social media discourse, particularly related to the Russia-Ukraine conflict. It provides a data-driven approach to understanding public sentiments and attitudes.

In summary, this work contributes to both the practical and theoretical aspects of stance detection, particularly in non-English languages, and highlights the potential of advanced language models like BERT in addressing this challenging NLP task. Overall, the study contributes to the advancement of stance detection research using Turkish text and provides valuable insights into the performance of different machine learning algorithms on stance detection tasks.

Section 2 reviews recent studies related to the stance detection task. The proposed work for Turkish tweets is described in Section 3. The experimental results of the algorithms are compared and discussed in Section 4. Our concluding remarks and possible future work directions are presented in the last section.

2. Related Work

Turkish is characterized by its richness and complexity in terms of morphology, which leads to a distinct set of challenges in various NLP tasks when compared to languages with simpler morphological structures. Consequently, prior NLP research on Turkish has played a pioneering role in the exploration of similar languages that share these morphological complexities (Yıldırım et al. 2014). In contrast, stance detection studies for Turkish are currently an active and open research field, even though there have been only a limited number of studies specifically addressing stance detection within the context of social media and blog posts.

In (Küçük 2017), the author introduced a labeled Turkish stance dataset. This dataset focused on the popular sports clubs Galatasaray and Fenerbahçe in Turkey. Specifically, for these two targets, a dataset was created by collecting tweets, and it included the "Favor" and "Against" stance tags. The dataset was meticulously annotated by a single annotator, resulting in 700 target-tweet pairs for each target. Within these pairs, there were 175 tweets labeled as "Favor" and 175 tweets tagged as "Against." For feature extraction, the Support Vector Machine method was employed with a 10-fold cross-validation procedure, utilizing unigram and hashtag information. Remarkably, this approach demonstrated a high level of performance when compared to similar studies available in the literature.

In (Küçük and Can 2018), authors introduced a new version of the dataset presented in (Küçük 2017), which they labeled as "Version 1." This dataset was re-

annotated by a different individual. Subsequently, "Version 2" was created, comprising a total of 686 target-tweet pairs, by including tweets that were consistently tagged by two annotators with the same stance label. To further expand the dataset, an additional 400 tweets were collected. Of these, 379 tweets had matching stance tags as assigned by two different annotators, resulting in the creation of "Version 3," which contained a total of 1065 target-tweet pairs.

In their analysis, the Support Vector Machine method was applied with a 10-fold cross-validation technique, utilizing features derived from three different versions, including unigrams, bigrams, hashtags, links, emoticons (e.g., "i3," ":("), and entity names. Notably, the use of unigram and hashtag features was consistent across all three versions. However, the incorporation of links and emoticons did not significantly contribute to the model's performance. Furthermore, the inclusion of entity names, encompassing person, place, and organization names, was carried out manually using the Named Entity Recognition (NER) Tool. It was observed that the incorporation of entity names did not lead to a discernible improvement in the model's performance.

In (Polat, Güler Bayazıt, and Yildiz 2021), the authors aimed to create a dataset for stance detection in the Turkish language. The dataset was compiled from the well-known Turkish blog site "eksisozluk," which allows unrestricted word usage. This dataset encompasses various topics such as "E-Book," "Working from home," "Mask," "E-Cigarette," "Vaccine," and "Vegan." It consists of 5031 blog posts, distributed unevenly across these topics.

Various text representation methods were employed, including Bag of Words, Term Frequency – Reverse Document Frequency, and Word embedding. The authors conducted an analysis of stance detection results using a range of machine learning methods, such as Naive Bayes, Support Vector Machine, AdaBoost, XGBoost, Random Forest, and Convolutional Neural Networks. Performance evaluation was based on the Matthews Correlation Coefficient. The study found that the most favorable results were achieved with the XGBoost and Convolutional Neural Network methods.

Moreover, the authors applied the integrated gradients method to the features extracted by the Convolutional Neural Network model. This allowed them to analyze the contribution of these features to the prediction performance, providing valuable insights into the stance detection process.

In (Küçük and Arıcı 2022), the authors developed a Turkish dataset sourced from Twitter, focusing on the topic of COVID-19 Vaccination. The dataset was subjected to analysis for both sentiment analysis and stance detection.

To construct this dataset, data collection occurred on two separate dates. For the first part (Part-1), 300 tweets were gathered on December 18, 2020, while for the second part (Part-2), an additional 300 tweets were collected on July 18, 2021. The dataset underwent annotation by a single native Turkish annotator for both sentiment and stance classes, ensuring consistent labeling for analysis. The target of the stance detection task in this study is COVID-19 Vaccination. Following the annotation process, the Part-1 dataset was found to have 122 tweets annotated as "Favor," 123 as "Against," and 55 as "None." In the Part-2 dataset, there were 137 tweets annotated as "Favor," 122 as "Against," and 41 as "None." To carry out training and testing, SVM and Random Forest methods were employed, and a 10-fold cross-validation approach was used during the evaluation. This process resulted in a limited number of tweets available for training in each fold, which contributed to relatively lower performance rates. The feature set for stance detection included unigrams, hashtag usage, and emoticon usage. According to the results, the SVM learner outperformed the Random Forest learner, with SVM learners achieving similar performance rates on both the first and second parts of the dataset.

In (Glandt et al. 2021) authors used COVID-19 tweets to detect stance for four different targets by comparing state-of-art methods including BERT, GRU, BiLSTM, CNN and target-specific attention networks. They collected more than thirty thousand (30000) tweets and created an annotated dataset. Then they have established baselines using several supervised learning models.

The study in (Nababan, Mahendra, and Budi 2021) investigates the public's stance on the Job Creation Bill in Indonesia, which has sparked debates. Using keywords related to the bill, nearly 10,000 tweets were collected from Twitter and annotated with stance labels. The study employs Naive Bayes, Support Vector Machine, and Logistic Regression classifiers with both unigram and bigram features. The highest performance was achieved by the Logistic Regression classifier using unigram features, obtaining a micro F-1 score of 71.8% in the experiments.

The research in (Samih and Darwish 2021) focuses on user stance detection, determining a user's position on a given target, such as a topic or claim. Existing unsupervised classification methods have demonstrated high accuracy (>98%) for vocal Twitter users with numerous tweets on a target but struggle with less vocal users having only a few tweets. The paper presents two approaches to address this issue. In the first approach, user-level stance detection is enhanced by utilizing contextualized embeddings to represent tweets, capturing latent meanings in context. The second

approach involves expanding a user's tweets using their Twitter timeline tweets, even if not topically relevant. Unsupervised classification is then performed by clustering the user with others in the training set.

The paper presented in (Griminger and Klinger 2021) explores the manifestation of the intense social media campaigns and mutual accusations during the 2020 US Elections in online communication, particularly among supporters of candidates Biden and Trump. The study combines tasks of hateful/offensive speech detection

and stance detection, annotating 3000 Tweets from the campaign period. The annotations include expressions of stances (favorable, against, mixed, neutral), mentions without an opinion, and identification of offensive style. A BERT baseline classifier indicates high-quality detection of supporters (89% F1 for Trump, 91% F1 for Biden), while identifying those against a candidate is more challenging (79% F1 for Trump, 64% F1 for Biden). Detection of hate/offensive speech remains challenging (53% F1).



Figure 1. The overall architecture of the proposed system.

The study presented in (Li and Caragea 2019) addresses stance detection, which involves identifying whether the opinion holder is in favor of or against a given target. Recent advancements in stance detection have utilized attention mechanisms or sentiment information to enhance performance. The proposed approach in this paper introduces a multi-task framework that integrates a target-specific attention mechanism while treating sentiment classification as an auxiliary task. Additionally, the model incorporates guidance from a sentiment lexicon and a constructed stance lexicon for the attention layer.

The authors in (Allaway and McKeown 2020) introduce a novel dataset designed for zero-shot stance detection, encompassing a broader spectrum of topics and lexical variations compared to previous datasets. Additionally, a new model is proposed for stance detection, which implicitly captures topic relationships through generalized topic representations. The results demonstrate that this model enhances performance, especially in addressing challenging linguistic phenomena. Stance detection on social media has emerged as a distinct paradigm within opinion mining, especially relevant for various social and political

applications where sentiment analysis might fall short. In the literature there are a lot of studies which use supervised learning or unsupervised learning machine learning methodologies and a list of these studies can be found in (ALDayel and Magdy 2021).

3. Proposed Work

In this paper, our primary objective is to assess the accuracy of different models using the dataset we have generated. We conducted experiments involving multiple models and assessed their respective accuracies. The entire process is detailed in Figure 1.

3.1. Dataset collection

Turkey boasts one of the world's largest Twitter user bases, surpassing 16 million users as of June 2022. To perform stance detection in the context of Turkish-Twitter users, we gathered data related to the Russian-

Ukrainian War, considering Turkey's diplomatic relationships with both countries.

During the initial days of the war, topics related to "Rusya" (Russia) and "Ukrayna" (Ukraine) became trending topics in Turkey, generating approximately half a million tweets containing these keywords. Subsequently, we collected 13,655 tweets, preprocessed and assigned stances to them, categorizing them as "Favor" or "Against." Tweets that did not exhibit a clear stance were excluded from the labeling process. At the conclusion of this labeling process, we labeled 3,264 tweets related to Ukraine and 4,951 tweets related to Russia.

In adherence to our commitment to transparency and scientific integrity, we are open to sharing the dataset upon a reasonable request, ensuring that appropriate measures are in place to uphold data privacy and confidentiality.

Table 1. Sample tweets.

Tweet	Target	Stance
İşgalci Rusya hesap vereceksin! (EN) (Invading Russia will give account!)	Russia	Against
Rusya'nın operasyonu işgal değil NATO tehdidine karşı savunmadır. (EN) (Russia's operation is not an invasion, but a defense against the NATO threat.)	Russia	Favor
Komedyenden devlet başkanı seçersen, böyle komedi gibi devlet yönetimiyle karşılaşırısın. (EN) (If you choose a comedian for the head of state, you will encounter a state administration like comedy.)	Ukraine	Against
Savaşın her türlüsüne hayır. Ancak dünya burda iki yüzlülüğünü gösterdi, Rusya'ya tepki gösterenler bu yavruların anasını babasını yetim bırakan devletlerdir, Tüm dünya ,suan Ukrayna için kenetlendik ,cok güzel, inşallah birgün bu ,cocuklar için de bütün dünya kenetleniriz... (EN) (No to any kind of war. However, the world showed their hypocrisy here, those who reacted to Russia are the states that orphaned the parents of these puppies, The whole world is now united for Ukraine, it's very nice, I hope one day we will unite for these children as well...)	Ukraine	Favor

Table 2. Word count statistics.

Target	Word Count		
	Min	Max	Average
Russia	2	46	20.8
Ukraine	2	46	21.3

The dataset comprises tweets in which the authors unequivocally conveyed their stance. For each target, each tweet was labeled as either "Favor" or "Against" by four university graduates. Sample target-tweet pairs from the Turkish Stance Labeled Data Set are displayed in Table 1. There were no character limitations imposed on the collected tweets. Table 2 provides insights into the word count statistics for the tweets, including the word count of the shortest tweet, the average word count across

tweets, and the word count of the longest tweet for each target. Notably, the generated dataset exhibits an unbalanced class distribution for the targets, as illustrated in Figure 2, depicting the distribution of label numbers for each target.

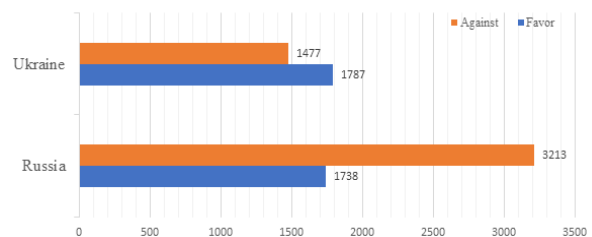


Figure 2. Number of Tweets.

3.2. Data preprocessing

In the classification process, data preparation and cleaning are essential steps to ensure the construction of word representation learning models that work effectively with noise-free and unproblematic text. We executed the preprocessing in two primary stages, both before and after labeling.

During the "before labeling" stage, we retained only Turkish tweets, eliminated duplicates, and removed hyperlinks. In the "after labeling" stage, we further refined the text by removing punctuation marks, numeric values, emojis, special characters, hashtags, extra spaces, and conjunction words. Additionally, all text was converted to lowercase.

It's worth noting that while stemming is commonly recommended for preprocessing in Turkish NLP tasks (Tunali and Bilgin 2012), it is not advised for embeddings. Word embeddings are dense vector representations of words designed to capture semantic and syntactic relationships between words. They are intended to work with the full forms of words rather than their stemmed versions (Jurafsky and Martin 2014).

3.3. Classifiers

In our stance detection process, we employed a variety of algorithms, including K-Nearest Neighbors (KNN), Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM), XGBoost, Long Short-Term Memory (LSTM), Gated Recurrent Unit (GRU), and BERT. However, these algorithms do not work directly with text data. To make the text data usable with classification algorithms, it must be transformed into numerical representations. This transformation was achieved by converting the text data from tweets into numerical vectors through the utilization of word embedding techniques.

3.3.1. Embedding Layer

Word embedding is a technique commonly employed to represent words as word vectors based on their diverse contextual meanings within sentences. Word vectors capture information from extensive text datasets, allowing words to be efficiently represented as continuous numerical vectors. These word vector models typically assign each word in a dictionary to a specific vector in a mathematical space.

GloVe (Pennington, Socher, and Manning 2014) is another word representation method that takes its name from the initials of the words "Global Vectors for Word Representation". It is the most used method after

Word2Vec (Mikolov et al. 2013) in natural language processing. It was developed by Pennington et al at Stanford University. GloVe is a method that trains on global word-to-word counts, thus allowing statistics to be used more effectively. The GloVe model produces a word space model with 75% accuracy on the analog dataset.

fastText (Bojanowski et al. 2017) is developed by Facebook in 2016. Instead of giving individual words as input to the neural network, it splits words into "n-grams" based on several letters. For example, for the word "fast", trigram is "fas" and "ast". In the N-gram expression, n represents the degree of repetition. In other words, the n expression here provides that we will divide by how many times. It allows us to understand how much of a word or letter. FastText's word vector is the sum of all these n-gram vectors. After the training is complete, we will have the word vectors for all the n-grams given in the training set.

While GloVe treats each word as the smallest unit to train on, fastText uses ngram characters as the smallest unit. The main advantage of using fastText is that it generates better word embeddings for rare words, or even words not seen (Out of Vocabulary) during training because the n-gram character vectors are shared with other words. GloVe.

3.3.2 Machine Learning Algorithms

K-Nearest Neighbor (KNN) is a supervised machine learning algorithm that can be used for text classification. The algorithm is a non-parametric method that relies on the similarity between the features of the training data and the new input data to make a classification decision. In KNN, the user chooses the number of neighbors (k) to consider when making a prediction for a new observation (Cover and Hart 1967). The algorithm then calculates the distance between the new observation and all training observations and selects the k nearest neighbors based on this distance measure. The most common distance measure used in KNN is the Euclidean distance, but other measures such as Manhattan distance and cosine distance can also be used.

Support Vector Machines (SVM) is a supervised machine learning algorithm that can be used for classification, regression, and outlier detection tasks. The basic idea behind SVM is to find the hyperplane that maximizes the margin between the closest data points from different classes, such that the classification error is minimized (Cortes and Vapnik 1995).

Random Forest (RF) is a machine learning algorithm that uses an ensemble of decision trees to make predictions (Breiman 2001). The algorithm randomly selects a subset of features and a subset of the data to create multiple decision trees. Each tree is trained on a different set of data and features, and the final prediction is based on the majority vote of all the trees.

XGBoost is a popular machine learning algorithm that uses a gradient boosting framework to make predictions (Chen and Guestrin 2016). The algorithm iteratively trains a series of decision trees to improve the accuracy of the predictions. Each tree is trained to correct the errors of the previous tree, and the final prediction is a weighted sum of the predictions from all the trees.

3.3.3. Deep Learning Algorithms

Long Short-Term Memory (LSTM) is a type of recurrent neural network (RNN) that is designed to overcome the vanishing gradient problem in traditional RNNs (Hochreiter and Schmidhuber 1997). The vanishing gradient problem occurs when the gradient of the error function with respect to the weights of the network becomes very small, which makes it difficult to update the weights and learn long-term dependencies. One of the main advantages of LSTM is its ability to handle long-term dependencies and sequential data (Hochreiter and Schmidhuber 1997). The architecture of LSTM allows it to selectively remember or forget information from previous time steps, which is especially useful for tasks such as speech recognition, language translation, and sentiment analysis.

GRU is a type of recurrent neural network (RNN) and simpler alternative to the LSTM architecture (Cho et al. 2014). Like LSTM, GRU is designed to overcome the vanishing gradient problem in traditional RNNs by allowing the network to selectively forget or remember information from previous time steps. The key difference between GRU and LSTM is the number of gates. While LSTM has three gates (input, output, and forget), GRU has only two gates (update and reset). The update gate controls the amount of new information that is added to the current hidden state, while the reset gate determines the amount of previous information that is discarded.

3.3.4. Transformers

Transformers represent a neural network architecture used for various natural language processing tasks. They are built on the self-attention mechanism (Vaswani et al.

2017), which enables the network to selectively focus on different segments of the input sequence while processing. The central concept in transformers involves calculating an attention weight matrix that indicates the relative importance of each input token in relation to all other tokens. This matrix is then used to weigh the input embeddings and generate the output sequence.

Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) (Devlin et al. 2019) is a pre-trained transformer-based language model designed for a wide range of natural language processing tasks. It is bidirectional, meaning it considers both the left and right context of each token during training. BERT has demonstrated state-of-the-art performance on various benchmarks and has become a popular choice for NLP tasks. There is also a Turkish BERT model called BerTurk, which is pre-trained on datasets like the Oscar Corpus, Opus Corpora, and Wikipedia dump. The model comprises 12 transformer layers, and it comes in different versions, including those with 32K and 128K vocabulary sizes, as well as cased and uncased variants.

3.4. Evaluation

In literature, recall (eq.2), precision (eq.3), and accuracy (eq.4) obtained from confusion matrix (Table 3), are used as common metrics to evaluate the performance of the models. However, the class imbalance has a large effect on measurements and dominant class has negatively affects accuracy. Therefore, f1 score (eq.5), which is the harmonic mean of precision and recall is commonly used to compare results in studies on unbalanced dataset.

Table 3. Confusion matrix.

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

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (3)$$

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (4)$$

$$F1\ Score = 2 * \frac{Precision*Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

3.5. Experiments

The tweets in our dataset were converted into vector representations using two different word embeddings: fastText and GloVe. We used GloVe embeddings with 200

dimensions and fastText embeddings with 300 dimensions.

Table 4. XGBoost hyperparameters.

Parameter	Value
learning rate	0,1
max depth	7
n_estimators	80
eval_metric	auc

In our experiments, we applied various traditional machine learning algorithms, including K-Nearest Neighbors (KNN), Random Forest (RF), and Support Vector Machine (SVM) to work with these word embeddings. For KNN, we utilized the Euclidean distance metric, commonly preferred in text classification tasks. Default parameters of the scikit-learn library (Pedregosa et al. 2011) were used for the other algorithms. Furthermore, we implemented an XGBoost model using both fastText and GloVe embeddings to transform the tweets into vector representations. The XGBoost model was fine-tuned with pre-optimized hyperparameters, which are detailed in Table 4 of our study. In our study, we developed two LSTM models and two GRU models, each utilizing two different word embeddings: fastText and GloVe. We employed single-layer LSTM and single-layer GRU architectures, both with

a 128-hidden layer. The dropout rate was set at 0.5, although it had no significant impact on our results. These models were compiled with the ADAM optimizer, using a learning rate of 0.001 and binary cross-entropy as the loss function. The final output layer contained a single neuron with sigmoid activation. The models were trained with a batch size of 64 and early stopping criteria.

In the latter part of our study, we incorporated the Bert Model. The Bert model consists of two stages: pre-training and fine-tuning. During the pre-training phase, the model learns from unsupervised text data through various pre-training tasks, such as the masked language model and predictions of the next sentence. In the fine-tuning phase, the Bert model is initialized with parameters from the pre-training stage and adjusts these parameters using labeled data from downstream tasks. We applied Grid Search mechanism for parameter selection and the parameters with best results have been used. The architectural design of the Bert model includes an encoder with 768 hidden size, 12 self-attention heads, and 12 transformer blocks. Bert produces sequence representations for input sequences of up to 512 tokens. We utilized the 128K uncased BERTurk model with a learning rate of 5e-5 and a batch size of 32 for training, conducting four epochs.

Table 5. Experiment results.

Classifier	Embeddings	Russia		Ukraine	
		Accuracy	F1 Score	Accuracy	F1 Score
KNN	fastText	0.632	0.639	0.593	0.564
	Glove	0.588	0.597	0.640	0.610
RFC	fastText	0.696	0.639	0.760	0.759
	Glove	0.672	0.585	0.749	0.746
SVM	fastText	0.721	0.686	0.809	0.809
	Glove	0.700	0.645	0.767	0.767
XGBoost	fastText	0.717	0.693	0.782	0.782
	Glove	0.691	0.651	0.771	0.769
LSTM	fastText	0.713	0.712	0.752	0.752
	Glove	0.680	0.687	0.807	0.807
GRU	fastText	0.683	0.684	0.755	0.755
	Glove	0.687	0.685	0.807	0.807
BERT		0.784	0.787	0.872	0.870

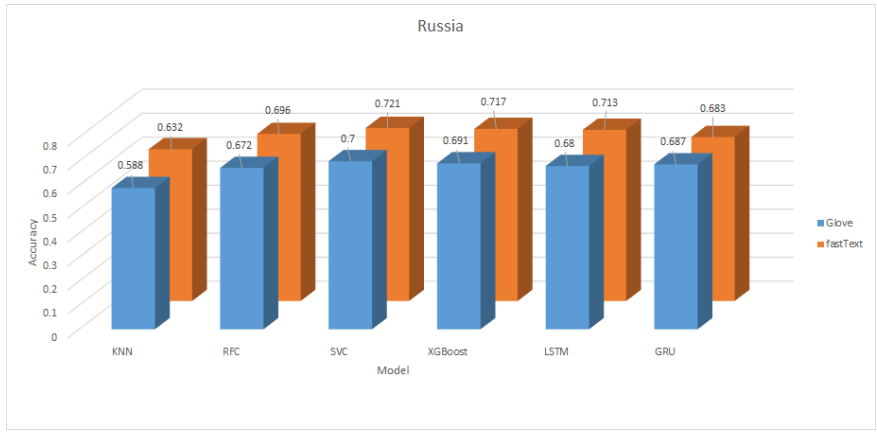


Figure 3. Glove and fastText embeddings accuracy results of models for Russia data set (except BERT).

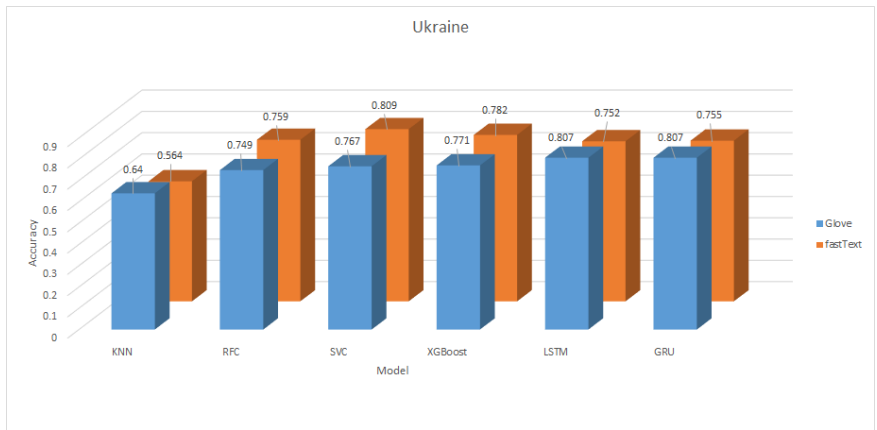


Figure 4. Glove and fastText embeddings accuracy results of models for Ukraine data set (except BERT).

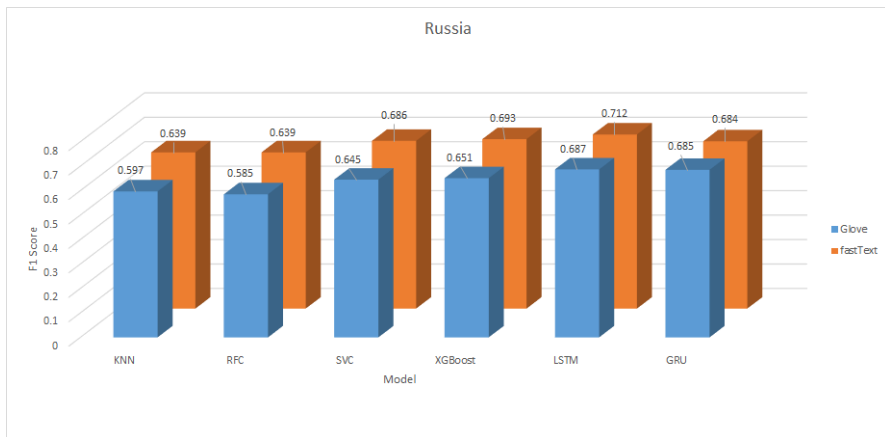


Figure 5. Glove and fastText embeddings F1 score results of models for Russia data set (except BERT).

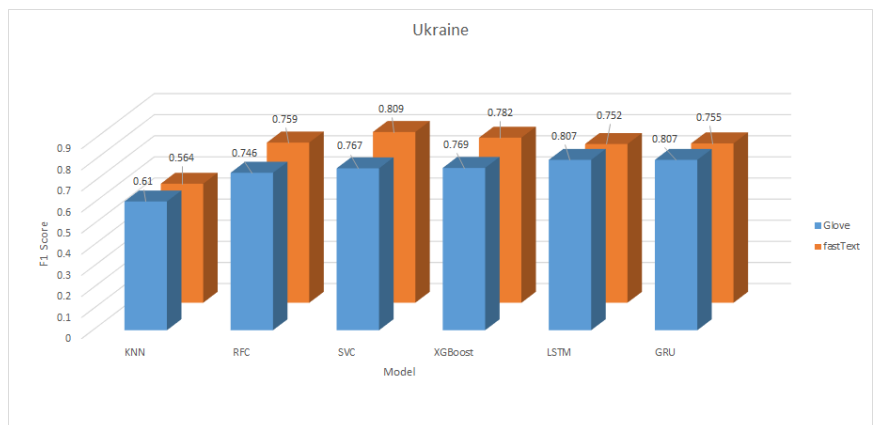


Figure 6. Glove and fastText embeddings F1 score results of models for Ukraine data set (except BERT).

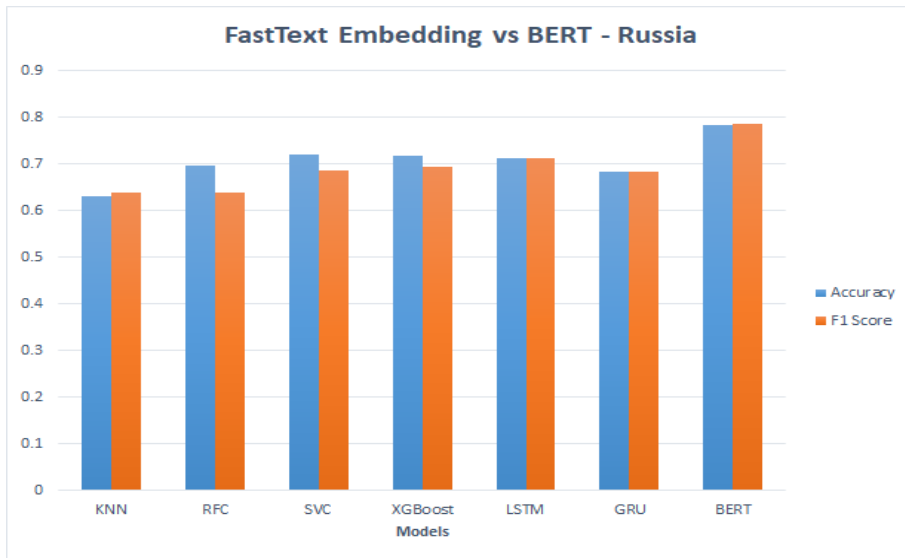


Figure 7. Comparison of models for Russia data set using fastText embedding.

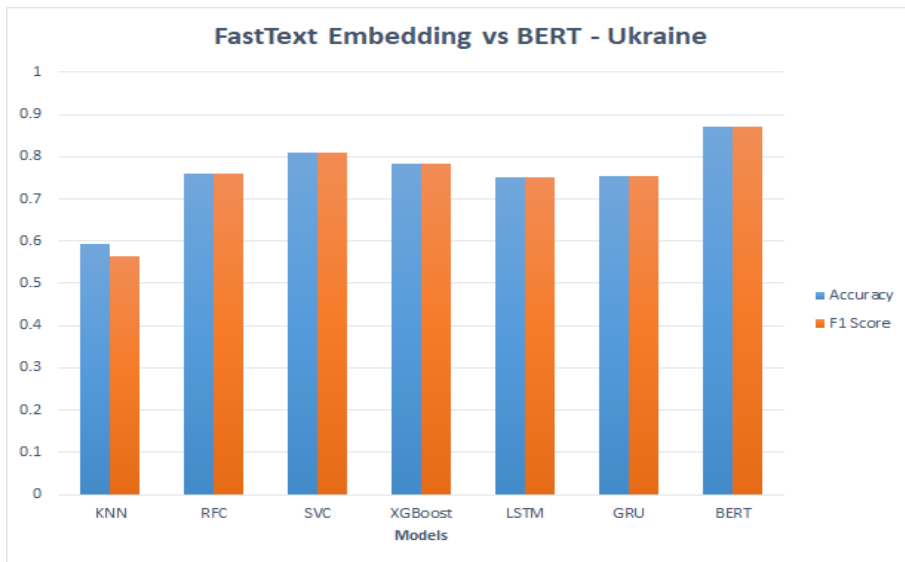


Figure 8. Comparison of models for Ukraine data set using fastText embedding.

The study's results, presented in Table 5, display the accuracy and F1 scores of various classifiers trained on two distinct datasets, one for Russia and another for Ukraine. These classifiers were trained using two different word embedding techniques: fastText and GloVe. The models employed included K-Nearest Neighbors (KNN), Random Forest Classifier (RFC), Support Vector Machine (SVM), XGBoost, Gated Recurrent Unit (GRU), Long Short-Term Memory (LSTM), and BERT. The effects of embedding method on results are demonstrated in Figure 3 – 6. The BERT models are not included in these figures, since we are comparing fastText and GloVe embeddings. Figure 7 and Figure 8 show the comparison results of BERT with other models which use fastText embedding. Similarly Figure 9 and Figure 10 show the comparison

results of BERT with other models which use GloVe embedding.

One notable observation is that the classifiers achieved superior performance on the Ukraine dataset compared to the Russia dataset. This discrepancy could be attributed to the Ukraine dataset's more balanced data distribution during training, which benefits the models. In terms of classification models, Support Vector Machine (SVM) outperformed the other models for both targets. This outcome aligns with prior studies on stance detection, where SVM consistently demonstrated strong performance across various languages and domains. The success of SVM can be attributed to its simplicity, effectiveness in handling high-dimensional data, and resistance to overfitting.

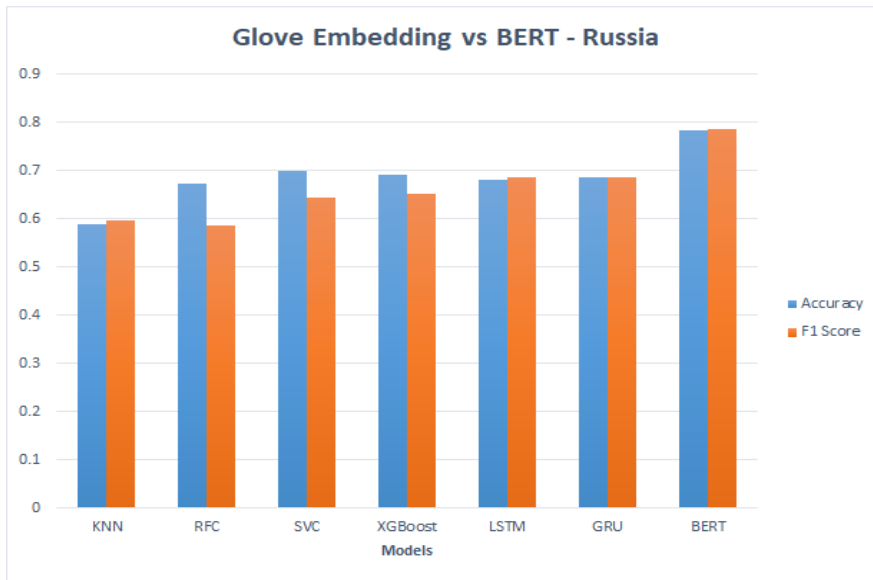


Figure 9. Comparison of models for Russia data set using Glove embedding.

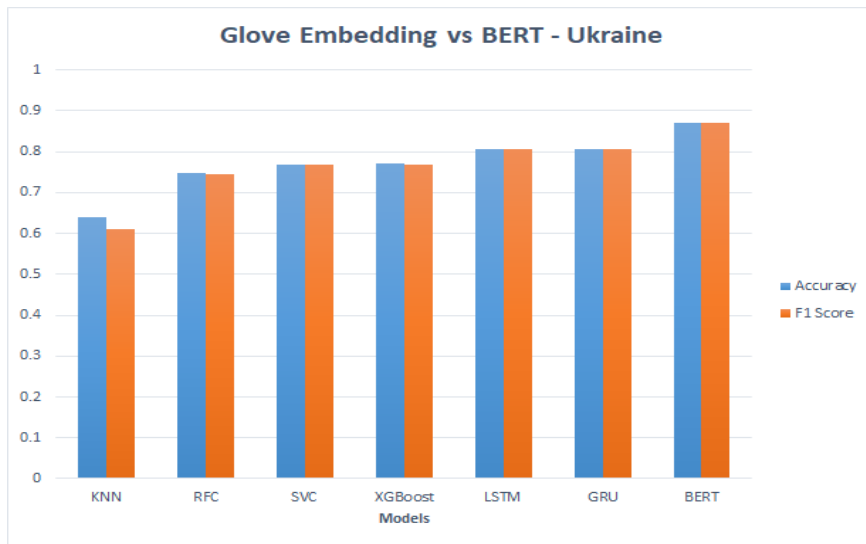


Figure 10. Comparison of models for Ukraine data set using Glove embedding.

Ultimately, the BERT model, a cutting-edge language model grounded in transformer architecture, outperformed all other models by attaining the highest accuracy and F1-score for both targets. This outcome aligns with recent research highlighting BERT's efficacy in a range of natural language processing tasks (Devlin et al. 2019). BERT, as a pre-trained language model, is amenable to fine-tuning for specific applications, including stance detection, and excels in capturing the contextual information within tweets. Due to the dataset's inherent imbalance and the outcomes of our initial experiments, we decided to conduct supplementary experiments involving oversampling and undersampling techniques. We applied the Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) (Chawla et al. 2002) for oversampling and the NearMiss technique for undersampling. Oversampling seeks to balance the

class distribution by generating synthetic samples for the minority class to align with the majority class's sample count. In contrast, undersampling reduces the number of samples in the majority class to match the minority class's count.

We employed the same models as in the initial experiments on both the oversampled and undersampled datasets, evaluating their performance using the same metrics. The results, as presented in Table 6, indicate that the oversampling technique enhanced the performance of most models for both targets, whereas the undersampling technique did not yield significant improvements. Figure 11 and Figure 12 demonstrate the performance comparison of BERT with fastText embedded models using undersampling and oversampling methods. Figure 13 and Figure 14 show the same metrics for Glove embedding.

Table 6. Experiment results with Oversampling and Undersampling.

Classifier	Embeddings	Russia		Ukraine	
		Accuracy	F1 Score	Accuracy	F1 Score
KNN oversampling	fastText	0.573	0.576	0.599	0.581
	Glove	0.557	0.561	0.625	0.606
KNN undersampling	fastText	0.552	0.547	0.602	0.583
	Glove	0.531	0.520	0.641	0.626
RFC oversampling	fastText	0.712	0.681	0.754	0.754
	Glove	0.699	0.657	0.754	0.751
RFC undersampling	fastText	0.662	0.668	0.745	0.746
	Glove	0.655	0.662	0.744	0.744
SVM oversampling	fastText	0.728	0.732	0.805	0.805
	Glove	0.715	0.720	0.775	0.775
SVM undersampling	fastText	0.732	0.737	0.803	0.803
	Glove	0.694	0.700	0.763	0.764
XGBoost oversampling	fastText	0.712	0.699	0.773	0.773
	Glove	0.705	0.690	0.762	0.762
XGBoost undersamplin	fastText	0.679	0.685	0.761	0.762
	Glove	0.661	0.668	0.768	0.769
LSTM oversampling	fastText	0.697	0.699	0.781	0.781
	Glove	0.680	0.687	0.795	0.796
LSTM undersampling	fastText	0.667	0.671	0.766	0.765
	Glove	0.668	0.673	0.790	0.790
GRU oversampling	fastText	0.680	0.681	0.796	0.797
	Glove	0.674	0.680	0.819	0.820
GRU undersampling	fastText	0.655	0.659	0.761	0.761
	Glove	0.686	0.690	0.786	0.787
BERT oversampling		0.774	0.776	0.813	0.808
BERT undersampling		0.740	0.746	0.835	0.834

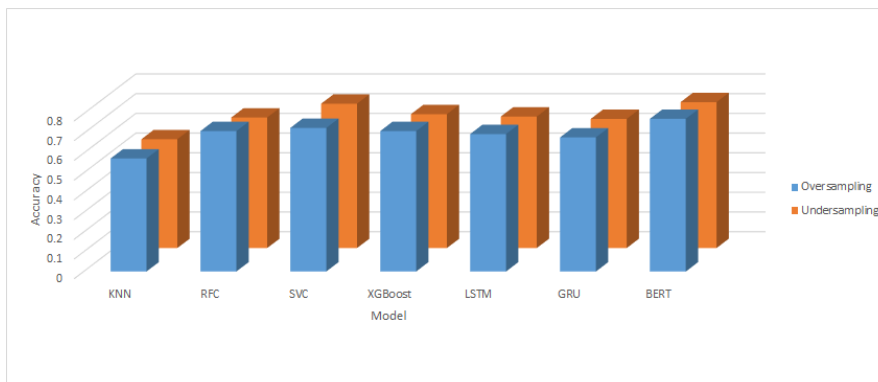


Figure 11. Comparison of models for Russia data set using fastText embedding and oversampling/undersampling.

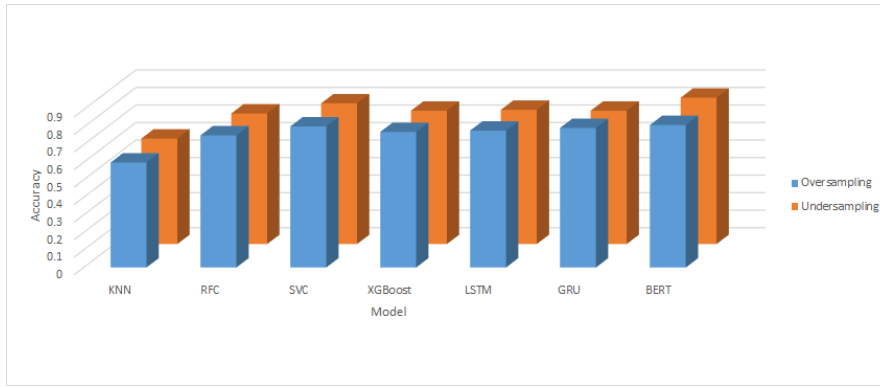


Figure 12. Comparison of models for Ukraine data set using fastText embedding and oversampling/undersampling.

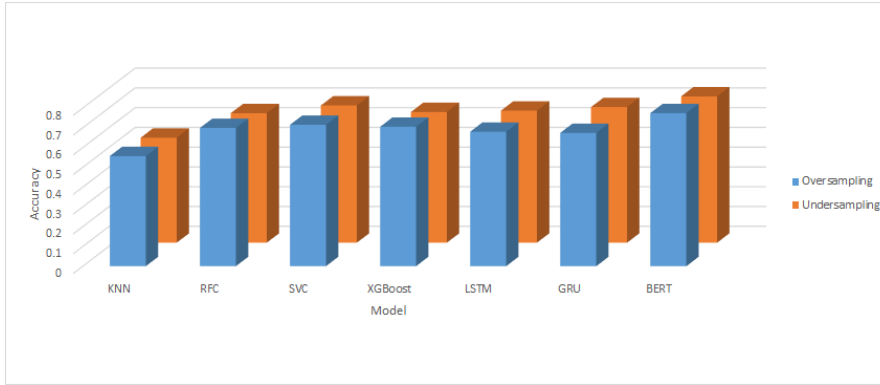


Figure 13. Comparison of models for Russia data set using Glove embedding and oversampling/undersampling.

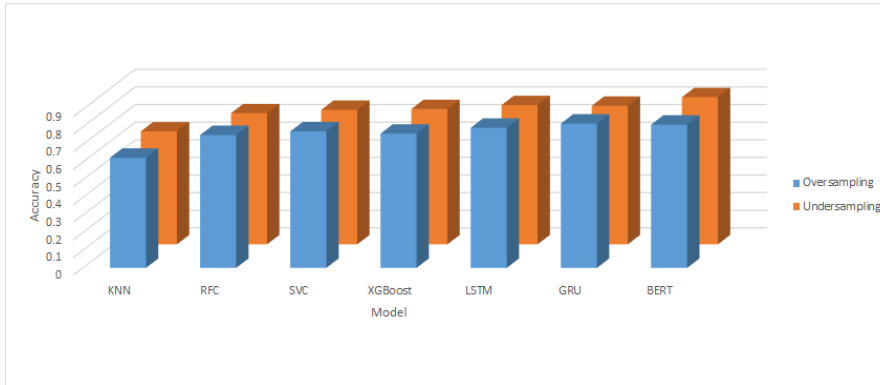


Figure 14. Comparison of models for Ukraine data set using Glove embedding and oversampling/undersampling

When analyzing the impact of oversampling and undersampling on classifier performance, we observed diverse effects. Some models exhibited improvements in accuracy and F1-score, while others experienced a decline in performance due to these techniques. For instance, the K-Nearest Neighbor (KNN) classifier using GloVe embeddings with undersampling achieved higher accuracy and F1-score for Ukraine, while the same classifier using GloVe embeddings with undersampling resulted in lower accuracy and F1-score for Russia. In contrast, the Random Forest classifier with undersampling, utilizing either GloVe or fastText embeddings, consistently exhibited a decrease in accuracy and F1-score for both countries. Conversely, the

Support Vector Machine (SVM) classifier with oversampling, using either GloVe or fastText embeddings, consistently demonstrated improvements in accuracy and F1-score for the Russia target. It's essential to recognize that the effectiveness of oversampling and undersampling methods can be influenced by the specific dataset and classifier used. As a result, it is advisable to conduct experiments with both techniques to determine which one yields the best performance for a given task.

4. Discussion

In our study, we aimed to develop a robust stance detection model for newly generated Turkish tweets concerning the Russia-Ukraine conflict. Understanding

social media users' perspectives on this matter is of great interest to researchers, policymakers, and journalists. However, this task comes with its challenges, primarily due to the imbalanced dataset where one stance dominates the other. To tackle this challenge, we explored various machine learning algorithms and techniques to create an effective and efficient model.

We conducted experiments with six distinct machine learning algorithms, including support vector machines, random forest, k-nearest neighbor, XGBoost, LSTM, and GRU, utilizing word embeddings from fastText and GloVe. To address the dataset's imbalance, we applied both undersampling and oversampling methods. Our experimental findings revealed that support vector machines with fastText and undersampled data delivered the best performance in detecting the stance of tweets related to Russia, achieving an F1 score of 0.738. In the case of tweets concerning Ukraine, support vector machines with fastText also outperformed other models, boasting an F1 score of 0.809. Notably, we observed that LSTM and GRU exhibited performance very close to support vector machines when detecting the stance of tweets related to Ukraine.

Additionally, we assessed the performance of the recently introduced state-of-the-art BERT model on our dataset. By fine-tuning the pre-trained BERT model on our data, we observed a substantial enhancement in performance when compared to other machine learning algorithms. BERT achieved the highest performance for both targets, achieving an impressive F1 score of 0.787 for Russia and 0.870 for Ukraine, surpassing the performance of other models significantly. These results emphasize the potential of fine-tuned BERT as a promising approach for stance detection on social media platforms. Therefore we can conclude that BERT, being a transformer-based model, has shown remarkable success in understanding contextual information in language, making it particularly effective in tasks like stance detection. BERT excels in capturing contextual information in text, considering the entire context of a sentence rather than relying solely on word embeddings or fixed-size context windows. This is crucial in stance detection task where the meaning may depend on the overall context of the statement.

Moreover, BERT is pre-trained on a large corpus, learning rich representations of language. This pre-training allows it to capture complex linguistic patterns and relationships, making it highly effective in this study without requiring extensive task-specific labeled data.

Additionally, BERT's architecture allows for fine-tuning on specific tasks, making it adaptable to the nuances of

stance detection in Turkish tweets. This flexibility is crucial in adjusting the model to the characteristics of the target dataset.

Finally, BERT utilizes attention mechanisms that enable it to focus on relevant parts of the input sequence, effectively capturing dependencies between words. This attention mechanism is particularly advantageous in understanding the nuanced language often present in social media and tweets.

5. Conclusion

In recent times, social media has become an indispensable source for understanding public sentiments across various domains, necessitating automated methods for extracting relevant data from these platforms.

Stance detection, a crucial aspect of natural language processing, assumes a central role in this endeavor by automatically discerning users' viewpoints on specific subjects, events, or personalities. To contribute to this area, we curated a labeled dataset in Turkish, focusing on capturing users' stances pertaining to the Russia-Ukraine War through social media discourse. This meticulously curated dataset comprises 8215 tweets sourced from Twitter, subjected to thorough cleaning and annotation with respect to two focal points: Russia and Ukraine.

Our study involved the evaluation of diverse machine learning methodologies, encompassing Support Vector Machines, Random Forest, k-Nearest Neighbor, XGBoost, alongside recurrent neural network architectures such as Long-Short Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Unit (GRU), utilizing word embeddings from GloVe and FastText.

Additionally, we explored the effectiveness of a transformer-based approach for stance detection. Given the inherent imbalance within the dataset across different targets, we employed both undersampling and oversampling techniques in conjunction with these algorithms.

Our experimental findings underscored the superior performance of BERT-based models over alternative methods, with LSTM and GRU models also yielding notable results. The establishment of this Turkish corpus signifies a significant contribution to the realm of stance detection research, particularly concerning Turkish text, and holds promise for future investigations, especially when combined with transformer-based methodologies. In essence, this study represents a stride forward in advancing stance detection research within the context of Turkish language analysis.

One limitation of this work is nature of the data set. Stance annotation can be subjective, leading to potential disagreement among annotators. It's essential to assess and address the inter-annotator agreement to understand the reliability of the dataset. Due to this subjectivity of the topic and also manual annotations, imbalanced datasets can pose challenges, especially if one stance is significantly more prevalent than the other. While this study addresses this through oversampling and undersampling, it's crucial to explore additional techniques or data augmentation methods.

Another future work can be generating the model for different data sets in different domains. Our dataset is focused on the Russia-Ukraine conflict. Stance detection models trained on this specific domain may not generalize well to other topics or domains. Creating or using more diverse datasets may enhance the models' generalizability.

Although BERT demonstrates impressive performance, it's essential to consider that the optimal model choice may vary based on factors such as dataset size, computational resources, and task-specific characteristics. In instances where data is limited, simpler models like SVM or traditional machine learning classifiers might yield satisfactory results.

As a result, BERT's exceptional performance in stance detection for Turkish tweets is consistent with its success across diverse NLP tasks. It highlights the capability of transformer-based models to grasp intricate language structures and contextual nuances, particularly in contexts requiring a deep understanding of nuanced opinions and sentiments, such as social media text.

To conclude, this study demonstrates the feasibility and effectiveness of stance detection on newly generated Turkish tweets related to the Russia-Ukraine conflict, even with an imbalanced dataset. Our research sheds light on the effectiveness of various machine learning algorithms and techniques for stance detection tasks, particularly in non-English languages. These findings can provide valuable insights for researchers, policymakers, and journalists who are interested in monitoring and analyzing social media discourse related to the Russia-Ukraine conflict.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, investigation, writing – review and editing and supervision.

Author-2: Conceptualization, investigation, methodology and software, data curation and writing – original draft.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data Availability Statement

Datasets are available on request. The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

6. References

- ALDayel, Abeer, and Walid Magdy. 2021. Stance Detection on Social Media: State of the Art and Trends. *Information Processing and Management* **58(4)**:102597. <https://www.doi.org/10.1016/j.ipm.2021.102597>.
- Allaway, Emily, and Kathleen McKeown. 2020. Zero-Shot Stance Detection: A Dataset and Model Using Generalized Topic Representations. *EMNLP 2020 - 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, Proceedings of the Conference* 8913–31. <https://www.doi.org/10.18653/v1/2020.emnlp-main.717>.
- Bojanowski, Piotr, Edouard Grave, Armand Joulin, and Tomas Mikolov. 2017. "Enriching Word Vectors with Subword Information."
- Breiman, Leo. 2001. Random Forests. *Machine Learning* **45(1)**:5–32. <https://www.doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Chawla, N. V, K. W. Bowyer, L. O. Hall, and W. P. Kegelmeyer. 2002. {SMOTE}: Synthetic Minority Over-Sampling Technique. *Journal of Artificial Intelligence Research* **16**:321–57. <https://www.doi.org/10.1613/jair.953>.
- Chen, Tianqi, and Carlos Guestrin. 2016. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, KDD '16*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 785–794.
- Cho, Kyunghyun, Bart van Merriënboer, Çağlar Gülçehre, Dzmitry Bahdanau, Fethi Bougares, Holger Schwenk, and Yoshua Bengio. 2014. Learning Phrase Representations Using RNN Encoder-Decoder for Statistical Machine Translation. BT - Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP 2014, October 25-29, 2014, Doha, Qatar, A Meeting of SIGDAT,. 1724–1734.
- Cortes, Corinna, and Vladimir Vapnik. 1995. Support-Vector Networks. *Machine Learning* **20(3)**:273–97.

- <https://www.doi.org/10.1007/BF00994018>.
- Cover, T., and P. Hart. 1967. Nearest Neighbor Pattern Classification. *IEEE Transactions on Information Theory* **13(1)**:21–27.
<https://www.doi.org/10.1109/TIT.1967.1053964>.
- Devlin J., Chang MW., Lee K., Toutanova K. 2019. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, , Minneapolis, Minnesota. Association for Computational Linguistics, **1**, 4171–4186.
<https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423>
- Glandt K., Khanal S., Li y., Caragea D., Caragea C., 2021. Stance Detection in COVID-19 Tweets. *ACL-IJCNLP 2021 - 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing, Proceedings of the Conference* 1596–1611.
<https://www.doi.org/10.18653/v1/2021.acl-long.127>
- Grimminger, L., Klinger R., 2021. Hate Towards the Political Opponent: A Twitter Corpus Study of the 2020 US Elections on the Basis of Offensive Speech and Stance Detection. *WASSA 2021 - Workshop on Computational Approaches to Subjectivity, Sentiment and Social Media Analysis, Proceedings of the 11th Workshop* 171–180.
- Hochreiter, S., Schmidhuber J., 1997. Long Short-Term Memory. *Neural Comput.* **9(8)**:1735–80.
<https://www.doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
- Jurafsky, D., Martin J., 2014. *Speech and Language Processing*. Vol. 3.
- Küçük, D., 2017. “Stance Detection in Turkish Tweets.” *CEUR Workshop Proceedings* **1914**:3–6.
<https://www.doi.org/10.475/123>.
- Küçük, D, Can F., 2018. Stance Detection on Tweets: An SVM-Based Approach.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.08910>
- Küçük, D., Can f.,. 2020. Stance Detection: A Survey. *ACM Comput. Surv.* **53(1)**.
<https://www.doi.org/10.1145/3369026>
- Küçük, Doğan, and Nursal Arıcı. 2022. Sentiment Analysis and Stance Detection in Turkish Tweets About COVID-19 Vaccination.371–87.
- Küçük D., Arıcı N., 2022, Sentiment Analysis and Stance Detection in Turkish Tweets About COVID-19 Vaccination, In Handbook of Research on Opinion Mining and Text Analytics on Literary Works and Social Media, Arizona: IGI-Global, 371-387.
- Li, Y., Caragea C., 2019. Multi-Task Stance Detection with Sentiment and Stance Lexicons. *EMNLP-IJCNLP 2019 - 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and 9th International Joint Conference on Natural Language Processing, Proceedings of the Conference*, 6299–6305.
<https://www.doi.org/10.18653/v1/d19-1657>.
- Mikolov, T., .Chen K, Corrado G., Dean J., 2013. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. *1st International Conference on Learning Representations, ICLR 2013 - Workshop Track Proceedings*, 1–12.
- Mohammad S., Kiritchenko S., Sobhani P., Zhu X., Cherry C., 2016. A Dataset for Detecting Stance in Tweets. *Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation ({LREC}'16)*. Portorož, Slovenia: European Language Resources Association (ELRA), 3945–3952.
- Nababan, AH., Mahendra R., Budi I., 2021. Twitter Stance Detection towards Job Creation Bill. *Procedia Computer Science* **197(2021)**:76–81.
<https://www.doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.120>.
- Pedregosa, F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderolas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay E., 2011. Scikit-Learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research* **12(85)**, 2825–2830.
- Pennington, J., Socher R., Manning C., 2014. GloVe: Global Vectors for Word Representation. *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing ({EMNLP})*. Doha, Qatar: Association for Computational Linguistics. 1532–1543
- Polat, K.K, Bayazit N.G., Yildiz O.T., 2021. Türkçe Duruş Tespit Analizi. *European Journal of Science and Technology*, **(23)**, 99–107.
<https://www.doi.org/10.31590/ejosat.851584>.
- Pomerleau, D., Rao D., 2015. Fake News Challenge. 2015 <http://fakenewschallenge.org/>. Retrieved (<http://www.fakenewschallenge.org/>).
- Riedel, B., Augenstein I., Spithourakis G.P., Riedel S., 2018. A Simple but Tough-to-Beat Baseline for the Fake News Challenge Stance Detection Task. ArXiv: 1707.03264
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.03264>
- Samih, Y., .Darwish K., 2021. A Few Topical Tweets Are Enough for Effective User Stance Detection. *EACL 2021 - 16th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics, Proceedings of the Conference*, 2637–46.
<https://www.doi.org/10.18653/v1/2021.eacl->

main.227.

- Tunali, V., Bilgin T.T., 2012. Examining the Impact of Stemming on Clustering Turkish Texts. *2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, 1–4.
- Vaswani, A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I., 2017. "Attention Is All You Need." in *Advances in Neural Information Processing Systems*, **30.**, 1-11
- Yıldırım, E., Çetin F.S., Eryiğit G., Temel T., 2014. The Impact of NLP on Turkish Sentiment Analysis. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, **7(1)**:43–51.

Biological Activities of Extracts of Red and Yellow Hawthorn Fruits in Different Solvents

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 14.09.2023

Kabul/Accepted: 06.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Kırmızı ve Sarı Alıç Meyvelerinin Farklı Çözücülerdeki Ekstraktlarının Biyolojik Aktiviteleri

İlker ATİK^{1*}, Ayşe Janseli DENİZKARA², Gökhan AKARCA², Azize ATİK¹

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksekokulu, Gıda Teknolojisi Programı, Afyonkarahisar, Türkiye

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

#This manuscript was presented as an oral presentation at the 6th International Anatolian Agriculture, Food, Environment and Biology Congress (TARGID 2022) held in Kütahya/Turkey between 07-09/October/2022 and this manuscript is the improved version of the abstract of the paper published in the congress abstract book.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu çalışmada Afyonkarahisar il'inde doğal ortamda yetişen alıç meyvelerinden etanol, metanol ve aseton çözümleri kullanılarak farklı ekstraktlar elde edilmiştir. Bu ekstraktların önceden belirlenmiş olan hedef mikroorganizmalar üzerine antibakteriyel ve antifungal aktiviteleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre en yüksek antibakteriyel aktivite kırmızı alıç etanol ekstraktında 12.06 mm zon çapı ile *Listeria monocytogenes* üzerinde tespit edilmiştir. En yüksek antifungal aktivite ise sarı alıç etanol ekstraktında 17.22 mm zon çapı ile *Aspergillus flavus* üzerinde tespit edilmiştir. Bunun yanında en düşük minimum inhibitör konsantrasyon (bakteriyel) değeri kırmızı alıç etanol ekstraktında 46.87 µg/mL ile *Listeria monocytogenes* üzerinde belirlenmiştir. En düşük minimum inhibitör konsantrasyon (fungal) değeri ise sarı alıç etanol ekstraktında 35.15 µg/mL ile *Aspergillus flavus* üzerinde gözlemlenmiştir. En düşük minimum bakterisidal konsantrasyon değeri 93.75 µg/mL ile kırmızı alıç etanol ekstraktında *Staphylococcus aureus* üzerinde tespit edilirken, en düşük fungisidal konsantrasyon değeri 23.44 µg/mL ile sarı alıç etanol ekstraktında hem *Aspergillus flavus*, hem de *Penicillium notatum* üzerinde tespit edilmiştir. Çalışma sonuçları sarı alıç ve kırmızı alıç özellikle etanol ekstraktlarının yüksek antibakteriyel ve antifungal etkilere sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Antibakteriyel; Antifungal; Ekstrakt; *Listeria monocytogenes*; *Aspergillus flavus*.

Abstract

In this study, different extracts were obtained from hawthorn fruits growing in the natural environment in Afyonkarahisar Province, using ethanol, methanol, and acetone solvents. The antibacterial and antifungal activities of these extracts on predetermined target microorganisms were examined. According to the data obtained as a result of the study, the highest antibacterial activity was detected on *Listeria monocytogenes* in the ethanol extract of red hawthorn with a zone diameter of 12.06 mm. The highest antifungal activity was detected in the ethanol extract of yellow hawthorn on *Aspergillus flavus* with a zone diameter of 17.22 mm. In addition, the lowest minimum inhibitory concentration (bacterial) value was determined on *Listeria monocytogenes* in the ethanol extract of red hawthorn with 46.87 µg/mL. The lowest minimum inhibitory concentration (fungal) value was observed on *Aspergillus flavus* in the ethanol extract of yellow hawthorn with 35.15 µg/mL. The lowest minimum bactericidal concentration value was detected on *Staphylococcus aureus* at 93.75 µg/mL in the ethanol extract of red hawthorn, while the lowest fungicidal concentration value was detected on both *Aspergillus flavus* and *Penicillium notatum* at 23.44 µg/mL in the ethanol extract of yellow hawthorn. The study results showed that especially ethanol extracts of yellow and red hawthorn have high antibacterial and antifungal effects.

Keywords: Hawthorn; Antibacterial; Antifungal; Extract; *Listeria monocytogenes*; *Aspergillus flavus*

1. Introduction

Hawthorn (*Crataegus* spp.) is a fruit in the Roseaceae family. It is a plant species that can grow spontaneously in many regions of Turkey, especially on mountainsides. It has a structure in the form of a bush or small tree, generally varying between 5 and 10 m in height (Ahmadipour *et al.* 2019). It is reported that hawthorn varieties, which can have different colors depending on the environment in which they grow, mostly have yellow, red, and dark purple colors (Polatçı and Taşova 2017).

Hawthorn is a fruit with high nutritional value. It is rich in sugar, vitamin C, and mineral substances such as Ca, P, K, Mg, and Fe (Tüysüz *et al.* 2021). It can be used in various ways. It can be consumed directly, fresh or dried, or after being turned into processed products such as jam, marmalade, molasses, vinegar, and wine (Çalışkan *et al.* 2018, Türkhan *et al.* 2018). The hawthorn plant, especially its fruit, leaves, and flowers, have been used among the public for therapeutic purposes since ancient times (Çoklar and Akbulut 2016, Caliskan and Karaman 2018, Rüzgar and Yazıcı 2022). The variety and amount of

biochemical substances found in the fruit are effective in having many positive effects on the human health. Bioactive compounds such as chlorogenic acid, epicatechin, and hyperoside in the structure of hawthorn make the fruit a powerful source of antioxidants and provide free radical scavenging activity (Altınbaşak and Çelik 2021).

Previous studies have shown that hawthorn and its products have antimicrobial, antioxidant, and anti-inflammatory effects. It has also been found to have positive effects on high blood pressure, high cholesterol, and cardiovascular diseases (Kaya *et al.* 2019). When the literature was examined, no study was found on the effect of extracts obtained from different hawthorn species with the help of different solvents. The aim of this study was to determine the effects of extracts obtained with the use of different solvents on predetermined target pathogenic bacteria and spoilage molds.

2. Materials and Methods

2.1. Material

The yellow (*Crataegus tanacetifolia*) and red (*Crataegus monogyna*) hawthorn fruits used in the study were obtained from the rural areas of Büyükkalecik-Afyonkarahisar, Türkiye (38°40'50''N, 30°29'20''E, Altitude: 1501) in October 2022.

2.2. Solvent extraction

Yellow and red hawthorns used in the study were dried in the laboratory at room temperature for two days. Then, the dried fruits were weighed as 150 g each, and 400 ml of 80% (v/v) each solvent (ethanol, methanol, acetone) was added. Then, it was shaken in a dark room at 120 rpm using a shaker (WiseShake® SHO-2D) for 24 hours. At the end of the period, the mixtures were filtered through sterilizing paper (Whatman, Grade 54, Diameter 55 mm) and taken into a rotary evaporator (Heidolph Hei-VAP value), and the ethanol and extract parts were separated from each other at the rate of 100 rpm and the temperature of 40 °C.

2.3. Microorganisms used in the study

In this study, both antibacterial and antifungal activities of the extracts were determined. For this reason, *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538), *Listeria monocytogenes* (ATCC 51774) and *Salmonella Enteritidis* (ATCC 13076) were used as test bacteria, while *Aspergillus flavus* (ATCC 204304), *Aspergillus niger* (ATCC 16888), *Penicillium notatum* (ATCC 9478), and *Penicillium chrysogenum* (ATCC 10106) were used as test molds.

2.4 Preparation of discs containing hawthorn extracts

Extracts obtained from two different hawthorn varieties using different solvents were taken into separate 100 µL petri dishes (Sterile, 90 x 15, Firatmed, Turkey) using a sterile-tipped automatic pipette (Research Plus, Eppendorf). Blank antibiogram discs (Bioanalyse 316010001) were placed on them. For the discs to impregnate the extracts, the petri dishes were kept in the refrigerator (Arçelik, 554271, Turkey) at 4°C for 60 minutes with their lids closed. At the end of the specified period, the discs were dried in a laminar flow cabinet (Cryste, Puricube 1200).

2.5. Determination of antibacterial and antifungal activities in discs containing extracts

The methods specified by Akarca (2019) were used to determine the antibacterial activities, while the methods specified by Alastruey-Izquierdo *et al.* (2015) were used to determine the antifungal activities with some minor modifications.

Young cultures grown on specific media were used to determine antimicrobial activities. For this purpose, the following media were used for each microorganism in determining the antibacterial activity, respectively. For *E. coli*: Chromocult TBX Agar (Merck 1.16122), for *S. aureus*: Baird Parker Agar (Merck 1.05406), for *L. monocytogenes*: Oxford Agar (Merck 1.07004), for *S. Enteritidis*: Brilliant Green Phenol Red Lactose Sucrose Agar (Merck 1.10747). Bacteria were incubated in an incubator (Incucell MMM, Germany) at 37±0.1°C for 16 – 20 hours (*L. monocytogenes* in a 5 % CO² environment). To determine antifungal activity, mold strains were subjected to incubation periods of 5-7 days at 25°C on Sabouraud 2 % Dextrose Agar (Merck 1.07315). At the end of the incubation period, the cultures were transferred with a sterile loop and suspended in Ringer's solution. In both analyses, the density of the suspended strains was adjusted to 0.5 McFarland Standard using a densitometer (Biosan, 1B, Turkey). The density-adjusted inoculums were taken with the help of transport swap (Firatmed, Turkey) and homogeneously inoculated onto the freshly prepared Muller Hinton Agar (Merck 1.05437) surface at 25°C for antibacterial activity analysis. On the other hand, for the determination of antifungal activity, again, the inoculums were homogeneously inoculated onto the surface of Muller Hinton Agar, this time modified with 2 % glucose and 0.5 mg/L methylene blue at 25°C. Then, 10 minutes were waited for the inoculations to be absorbed by the media. (Bauer *et al.* 1966, Akarca 2019, Akarca and Tomar 2019). Then, 100 µL of the extract was impregnated and dried into each blank antibiogram disk

(Bio-Disk 316010001, Turkey) and placed on the surface of the media at a distance so that the zones that would form would not touch each other. Petri dishes were then incubated (bacteria at $37\pm 0.1^\circ\text{C}$ for 16 – 20 hours, molds at $25\pm 0.1^\circ\text{C}$ for 72 – 96 hours). At the end of the period, The diameters of the zones formed in all petri dishes were measured with the help of a digital caliper (Mitutoyo, 500-181-30, Japan) under sufficient sunlight.

2.6. Statistical analysis

The data obtained within the scope of the study were evaluated using the SPSS V 23.0.0 statistical package program. The study was conducted in double replication and double parallel, and the analysis of variance technique was used to evaluate the data obtained. The level of differences was determined by the Duncan test ($p < 0.05$).

Table 1. Antibacterial activity of yellow and red hawthorn extracts on selected pathogen bacteria (zone diameter, mm)

	Yellow Hawthorn					
	Methanol	ABE	Ethanol	ABE	Acetone	ABE
<i>E. coli</i>	6.02±0.01 ^D	-	9.15±0.91 ^A	++	7.32±0.29 ^{BC}	-
<i>S. aureus</i>	7.02±0.01 ^D	-	10.28±0.30 ^B	++	9.21±0.23 ^C	++
<i>L. monocytogenes</i>	6.02±0.01 ^D	-	18.5±0.52 ^A	+++	6.45±0.07 ^{CD}	-
<i>S. Enteritidis</i>	9,06±0.19 ^A	++	7.82±0.71 ^B	-	6.81±0.37 ^{BC}	-
	Red Hawthorn					
	Methanol	ABE	Ethanol	ABE	Acetone	ABE
<i>E. coli</i>	8.48±0.68 ^{AB}	+	7.77±0.33 ^{BC}	-	6.89±0.22 ^{CD}	-
<i>S. aureus</i>	8.39±0.37 ^C	+	11.36±0.57 ^A	+++	8.74±0.22 ^C	+
<i>L. monocytogenes</i>	7.795±0.87 ^C	-	12.06±0.87 ^B	+++	7.78±0.35 ^C	-
<i>S. Enteritidis</i>	6.505±0.45 ^C	-	7.85±0.32 ^B	-	6.78±0.48 ^{BC}	-

ABE: Anti Bacterial Effect, A - D (→): Values with the different capital letters in the same line for each analysis differ significantly, ($p < 0.05$). 6-8(-): Resistant, 8-9(+): Moderately Sensitive, 9-11(++): Sensitive, 11≥ (+++): Ultrasensitive.

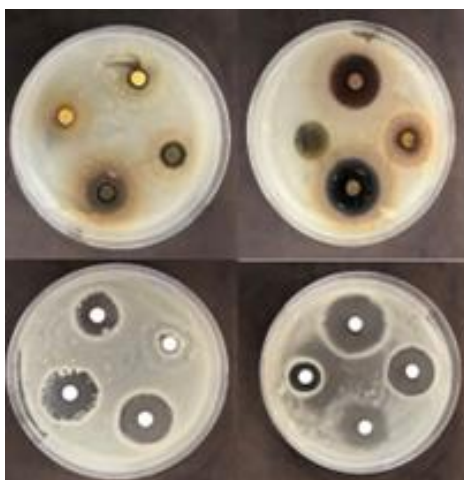


Figure 1. Antibacterial inhibition zones of yellow and red hawthorn extracts

3. Results and Discussions

3.1. Antibacterial activities of yellow and red hawthorn extracts

The antibacterial activities of yellow and red hawthorn extracts obtained using methanol, ethanol and acetone on selected pathogenic bacteria have been shown in Table 1 and Picture 1.

3.2. MIC (Bacterial) values of yellow and red hawthorn extracts

MIC (bacterial) values of yellow and red hawthorn extracts obtained using methanol, ethanol and acetone

on selected pathogenic bacteria have been shown in Table 2.

3.3. MBC values of yellow and red hawthorn extracts

MBC values of yellow and red hawthorn extracts obtained using methanol, ethanol and acetone on selected pathogenic bacteria have been shown in Table 3.

3.4. Antifungal activities of yellow and red hawthorn extracts

The antifungal activities of yellow and red hawthorn extracts obtained using methanol, ethanol and acetone have been shown in Table 4.

Table 2. MIC (bacterial) values ($\mu\text{g/mL}$) of yellow and red hawthorn extracts on selected pathogen bacteria

	Yellow Hawthorn		
	Methanol	Ethanol	Acetone
<i>E. coli</i>	750.00 \pm 0.00 ^A	562.50 \pm 265.16 ^A	750.00 \pm 0.00 ^A
<i>S. aureus</i>	750.00 \pm 0.00 ^A	140.63 \pm 66.29 ^C	375.00 \pm 0.00 ^B
<i>L. monocytogenes</i>	750.00 \pm 0.00 ^A	93.75 \pm 0.00 ^B	750.00 \pm 0.00 ^A
<i>S. Enteritidis</i>	750.00 \pm 0.00 ^A	750.00 \pm 0.00 ^A	750.00 \pm 0.00 ^A
	Red Hawthorn		
	Methanol	Ethanol	Acetone
<i>E. coli</i>	562.50 \pm 265.16 ^A	562.50 \pm 265.16 ^A	750.00 \pm 0.00 ^A
<i>S. aureus</i>	375.00 \pm 0.00 ^B	70.31 \pm 33.15 ^C	375.00 \pm 0.00 ^B
<i>L. monocytogenes</i>	562.50 \pm 265.16 ^A	46.87 \pm 0.00 ^B	750.00 \pm 0.00 ^A
<i>S. Enteritidis</i>	750.00 \pm 0.00 ^A	750.00 \pm 0.00 ^A	750.00 \pm 0.00 ^A

A - C (\rightarrow): Values with the different capital letters in the same line for each analysis differ significantly ($p < 0.05$).

Table 3. MBC values ($\mu\text{g/mL}$) of yellow and red hawthorn extracts on selected pathogen bacteria

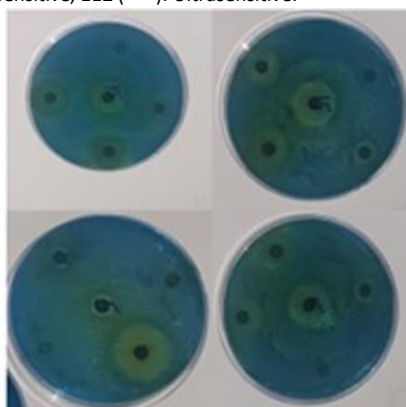
	Yellow Hawthorn		
	Methanol	Ethanol	Acetone
<i>E. coli</i>	1000.00 \pm 0.00 ^A	500.00 \pm 0.00 ^{AB}	750.00 \pm 0.00 ^{AB}
<i>S. aureus</i>	750.00 \pm 353.55 ^A	187.50 \pm 88.38 ^B	375.00 \pm 0.00 ^{AB}
<i>L. monocytogenes</i>	1000.00 \pm 0.00 ^A	125.00 \pm 0.00 ^D	750.00 \pm 0.00 ^B
<i>S. Enteritidis</i>	1000.00 \pm 0.00 ^A	750.00 \pm 353.55 ^{AB}	750.00 \pm 0.00 ^{AB}
	Red Hawthorn		
	Methanol	Ethanol	Acetone
<i>E. coli</i>	750.00 \pm 353.55 ^{AB}	375.00 \pm 176.78 ^B	750.00 \pm 353.55 ^{AB}
<i>S. aureus</i>	375.00 \pm 176.77 ^{AB}	93.75 \pm 44.19 ^B	375.00 \pm 176.78 ^{AB}
<i>L. monocytogenes</i>	500.00 \pm 0.00 ^C	125.00 \pm 0.00 ^D	375.00 \pm 176.77 ^C
<i>S. Enteritidis</i>	1000.00 \pm 0.00 ^A	500.00 \pm 0.00 ^B	1000.00 \pm 0.00 ^A

A - D (\rightarrow): Values with the different capital letters in the same line for each analysis differ significantly ($p < 0.05$).

Table 4. Antifungal activities of yellow and red hawthorn extracts on selected molds (zone diameter, mm)

	Yellow Hawthorn					
	Methanol	AFE	Ethanol	AFE	Acetone	AFE
<i>A. flavus</i>	10.15 \pm 0.68 ^{BC}	++	17.22 \pm 0.43 ^A	+++	10.18 \pm 0.31 ^{BC}	++
<i>A. niger</i>	8.74 \pm 0.05 ^C	+	15.21 \pm 0.43 ^A	+++	8.69 \pm 0.11 ^C	+
<i>P. notatum</i>	9.60 \pm 0.46 ^{BC}	++	16.76 \pm 0.44 ^A	+++	9.88 \pm 0.53 ^{BC}	++
<i>P. chrysogenum</i>	8.41 \pm 0.51 ^C	+	11.46 \pm 0.44 ^A	+++	12.58 \pm 0.63 ^A	+++
	Red Hawthorn					
	Methanol	AFE	Ethanol	AFE	Acetone	AFE
<i>A. flavus</i>	9.27 \pm 0.72 ^C	++	10.68 \pm 0.48 ^B	++	11.18 \pm 0.23 ^B	+++
<i>A. niger</i>	7.69 \pm 0.43 ^C	-	11.07 \pm 0.57 ^B	+++	7.97 \pm 0.55 ^C	-
<i>P. notatum</i>	9.13 \pm 0.46 ^C	++	10.28 \pm 0.04 ^B	++	9.10 \pm 0.15 ^C	++
<i>P. chrysogenum</i>	8.87 \pm 0.02 ^{BC}	+	9.36 \pm 0.22 ^{BC}	++	9.87 \pm 0.61 ^B	++

AFE: Anti Fungal Effect, A - C (\rightarrow): Values with the different capital letters in the same line for each analysis differ significantly, ($p < 0.05$). 6-8(-): Resistant, 8-9(+): Moderately Sensitive, 9-11(++): Sensitive, 11 \geq (+++): Ultrasensitive.

**Figure 2.** Antifungal inhibition zones of yellow and red hawthorn extracts

3.5. MIC (Fungal) values of yellow and red hawthorn extracts

MIC (fungal) values of yellow and red hawthorn extracts obtained using methanol, ethanol and acetone on selected molds have been shown in Table 5.

3.6. MFC values of yellow and red hawthorn extracts

MFC values of yellow and red hawthorn extracts obtained using methanol, ethanol and acetone on selected molds have been shown in Table 6.

4. Discussion

4.1. Antibacterial activities of yellow and red hawthorn extracts

The highest antibacterial activity on *E. coli*, one of the bacteria used in the study, was detected in the ethanol extract of yellow hawthorn with a zone diameter of 9.15 mm. The highest antibacterial activity on *S. aureus* was detected in the ethanol extract of red hawthorn with a zone diameter of 11.36 mm. The highest antibacterial activity on *L. monocytogenes* was detected in the ethanol extract of yellow hawthorn with a zone diameter of 18.5 mm, while the highest antibacterial activity on *S. Enteritidis* was detected in the methanol extract of yellow hawthorn with a zone diameter of 9.06 mm ($p < 0.05$).

Table 5. MIC (fungal) values ($\mu\text{g/mL}$) of yellow and red hawthorn extracts on selected molds

	Yellow Hawthorn		
	Methanol	Ethanol	Acetone
<i>A. flavus</i>	562.50±265.16 ^A	35.15±16.57 ^C	375.00±0.00 ^{AB}
<i>A. niger</i>	750.00±0.00 ^A	70.31±33.15 ^C	281.25±132.58 ^B
<i>P. notatum</i>	281.25±132.58 ^{AB}	58.59±49.72 ^B	140.63±66.29 ^{AB}
<i>P. chrysogenum</i>	187.50±0.00 ^A	93.75±0.00 ^A	70.31±33.15 ^A
	Red Hawthorn		
	Methanol	Ethanol	Acetone
<i>A. flavus</i>	375.00±0.00 ^{AB}	117.19±99.44 ^{BC}	70.31±33.15 ^C
<i>A. niger</i>	750.00±0.00 ^A	46.87±0.00 ^C	375.00±0.00 ^B
<i>P. notatum</i>	562.50±265.16 ^A	70.31±33.15 ^B	562.50±265.16 ^A
<i>P. chrysogenum</i>	281.25±132.58 ^A	281.25±132.58 ^A	281.25±132.58 ^A

A - C (→): Values with the different capital letters in the same line for each analysis differ significantly, ($p < 0.05$).

Table 6. MFC values ($\mu\text{g/mL}$) of yellow and red hawthorn extracts on selected molds

	Yellow Hawthorn		
	Methanol	Ethanol	Acetone
<i>A. flavus</i>	187.50±88.38 ^{AB}	23.44±11.05 ^B	375.00±176.77 ^A
<i>A. niger</i>	750.00±353.55 ^{AB}	46.87±22.10 ^C	187.50±88.39 ^C
<i>P. notatum</i>	562.50±437.50 ^A	23.44±11.05 ^A	93.75±44.20 ^A
<i>P. chrysogenum</i>	125.00±0.00 ^A	62.50±0.00 ^A	46.88±22.10 ^A
	Red Hawthorn		
	Methanol	Ethanol	Acetone
<i>A. flavus</i>	375.00±176.77 ^A	78.13±66.29 ^B	46.88±22.10 ^B
<i>A. niger</i>	1000.00±0.00 ^A	31.25±0.00 ^C	375.00±176.78 ^{BC}
<i>P. notatum</i>	750.00±353.55 ^A	62.50±0.00 ^A	625.00±530.33 ^A
<i>P. chrysogenum</i>	187.50±88.39 ^A	156.25±132.58 ^A	187.50±88.39 ^A

A - C (→): Values with the different capital letters in the same line for each analysis differ significantly, ($p < 0.05$).

In addition, it was determined that *E. coli* was sensitive to the ethanol extract of yellow hawthorn. In contrast, it was resistant to methanol and acetone extracts of yellow hawthorn. Furthermore, *E. coli* was moderately sensitive to the red hawthorn extract, while it was resistant to ethanol and acetone extracts of red hawthorn. It was determined that *S. aureus* was sensitive to both ethanol

and acetone extracts of yellow hawthorn and resistant to methanol extract. At the same time, it was extremely sensitive to ethanol extract of red hawthorn and moderately sensitive to methanol and acetone extracts. It was observed that *L. monocytogenes* was extremely sensitive to ethanol extracts of both yellow and red hawthorn and resistant to other extracts. It was observed

that *S. Enteritidis* was sensitive only to the methanol extract of yellow hawthorn and was resistant to the other extracts. In a similar study, it was determined that the ethanol extract of hawthorn fruit had a bactericidal effect, especially on Gram-positive bacteria. Antibacterial activity was detected on *L. monocytogenes* with a zone diameter of 17 mm (Tadić *et al.* 2008). In a different study, it was reported that gold nanoparticles derived from the aqueous extract of hawthorn fruit showed a strong antibacterial effect (Baran *et al.* 2021). In a study examining the antibacterial properties of aqueous extracts of different plum varieties in the *Rosaceae* family, it was stated that all plum extracts except the Cancur plum showed antibacterial activity against the tested bacteria (Murathan *et al.* 2020). Bioactive compounds such as polyphenols found in the extracts are effective on antibacterial activity. (Ghendov-Mošanu *et al.* 2018). Antibacterial activity against Gram-negative bacilli is demonstrated by apigenin, vitexin, and saponarin flavones, while flavonoid compounds with two or three hydroxyl groups in the A or B rings show antibacterial effects against Gram-positive bacteria (Kostic *et al.* 2012).

4.2. MIC (Bacterial) and MBC values of yellow and red hawthorn extracts

Among the extracts of yellow hawthorn obtained using different solvents, the lowest MIC (bacterial) and MBC values were detected against *L. monocytogenes* in the ethanol extract as 93.75 µg/mL and 125.00 µg/mL ($p < 0.05$). Among the red hawthorn extracts, the lowest MIC (bacterial) value was 46.87 µg/mL against *L. monocytogenes* in the ethanol extract, while the lowest MBC value was 93.75 µg/mL against *S. aureus* again in the ethanol extract. ($p < 0.05$). In their study, Tadić *et al.* (2008) determined the MIC (bacterial) and MBC values of hawthorn fruit ethanol extract as 151 µg/mL and 187 µg/mL for both *L. monocytogenes* and *S. aureus*. It has been thought that location is effective in the difference between studies.

4.3. Antifungal activities of yellow and red hawthorn extracts

In this study, the highest antifungal activity on *A. flavus*, *A. niger* and *P. notatum* was determined in the ethanol extract of yellow hawthorn with zone diameters of 17.22, 15.21 and 16.76 mm, respectively ($p < 0.05$). Unlike the others, the highest antifungal activity on *P. chrysogenum* was detected in the acetone extract of yellow hawthorn with a zone diameter of 12.58 mm ($p < 0.05$). However, it has been determined that *A. flavus* was ultrasensitive to the ethanol extract of yellow hawthorn and the acetone

extract of red hawthorn, while it was sensitive to the other extracts of yellow and red hawthorns. *A. niger* was ultrasensitive to the ethanol extracts of both yellow and red hawthorn, moderately sensitive to the methanol and acetone extracts of yellow hawthorn, resistant to the methanol and acetone extracts of red hawthorn. It was observed that *P. notatum* was ultrasensitive only to the ethanol extract of yellow hawthorn and sensitive to all other extracts. It has been determined that *P. chrysogenum* was ultrasensitive to the both ethanol and acetone extracts of yellow hawthorn, sensitive to the ethanol and acetone extracts of red hawthorn, moderately sensitive to the methanol extracts of both yellow and red hawthorns.

In a study examining the antimicrobial properties of ethyl acetate extracts of various species of Hawthorne (*Crataegus* spp.) (*Rosaceae*), the strongest antifungal effect was detected on *P. notatum* (Güven *et al.* 2006).

4.4. MIC (Fungal) and MFC values of yellow and red hawthorn extracts

Among the extracts of yellow hawthorn obtained using different solvents, the lowest MIC (fungal) value of 35.15 µg/mL was detected against *A. flavus* in the ethanol extract ($p < 0.05$). The lowest MIC (fungal) value among red hawthorn extracts was detected against *A. niger* in the ethanol extract, with 46.87 µg/mL ($p < 0.05$). The lowest MFC values were determined against *A. flavus* and *P. notatum* with a value of 23.44 µg/mL in the ethanol extract of the yellow hawthorn, while it was determined against *A. niger* with a value of 31.25 µg/mL in the ethanol extract of the red hawthorn ($p < 0.05$).

The hawthorn fruit itself and the products obtained from this fruit have been used in the treatment of various diseases among the public for many years. In this study, it was tried to determine the antimicrobial activities of extracts obtained from two different hawthorn varieties with the help of different solvents. The results obtained showed that the hawthorn extracts have antimicrobial activity. Especially in recent years, the increasing demand of consumers for natural foods has led to greater emphasis on using natural additives in industrially produced foods. The results of this study will lead to new studies aimed at extending the shelf life of foods by adding these kinds of products to industrially processed foodstuffs.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, investigation, supervision and writing – review and editing.

Author-2: Formal analysis, Data curation

Author-3: Methodology, conceptualization, investigation, supervision

Author-4: Data curation, Writing – original draft,

Declaration of Competing Interest

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

Data Availability Statement

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

5. References

- Ahmadipour, B., Kalantar, M., Hosseini, S.M., Rehman, Z.U., Farmanullah, F., Kalantar, M.H., Yang, L., 2019. Hawthorn (*Crataegus oxyacantha*) Flavonoid Extract as An Effective Medicinal Plant Derivative To Prevent Pulmonary Hypertension and Heart Failure in Broiler Chickens. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, **25(3)**, 321-328.
<https://doi.org/10.9775/kvfd.2018.20930>.
- Akarca, G., 2019. Composition and Antibacterial Effect on Food Borne Pathogens of *Hibiscus sarrattensis* L. Calyces Essential Oil. *Industrial Crops and Products*, **137**, 285-289.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.043>.
- Akarca, G., Tomar, O., 2019. Siyah (*Ficus carica*) ve Beyaz (*Ficus alba*) İncirlerden Elde Edilen İncir Sütlerinin Antibakteriyel ve Antifungal Etkileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **17**, 1069-1074.
<https://doi.org/10.31590/ejosat.652029>.
- Alastruey-Izquierdo, A., Melhem, M.S., Bonfietti, L.X., Rodriguez-Tudela, J.L., 2015. Susceptibility Test for Fungi: Clinical and Laboratorial Correlations in Medical Mycology. *Rev Inst Med Trop Sao Paulo*, **57(19)**, 57-64.
<https://doi.org/10.1590/s0036-46652015000700011>.
- Altınbaşak, M., Çelik, İ., 2021. Evaluation of Antioxidant and Protective Role of Hawthorn Fruit Lyophilized Extract Against Carbon Tetrachloride Toxicity in Rat. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, **10(2)**, 42-47.
<https://doi.org/10.46810/tdfd.850150>.
- Baran, A., Hatipoğlu, A., Baran, M.F., Aktepe, N., 2021. Alıç (*Crataegus monogyna*) Meyve Özütünden Altın Nanopartiküllerin Sentezlenmesi ve Antimikrobiyal Aktivitelerinin Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **32**, 974-978.
<https://doi.org/10.31590/ejosat.1040122>.
- Bauer, A.W., Kirby, W.M.M., Sherris, J.C., Turck, M., 1966. Antibiotic Susceptibility Testing By A Standardized Single Disk Method. *Am J Clin Pathol*, **36**, 493-496.
- Caliskan, O., Karaman, H., 2018. Effects of Different Grafting Methods and Times on Grafting Success and Plant Development in Sarı Alıç Hawthorn Genotype (*Crataegus azarolus* L.). *Journal of Agricultural, Food and Environmental Sciences, JAFES*, **72(1)**, 198-202.
- Çalışkan, O., Gündüz, K., Bayazit, S., 2018. Sarı Alıç (*Crataegus azarolus* L.) Genotipinin Morfolojik, Biyolojik ve Meyve Kalite Özelliklerinin İncelenmesi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **35** (Ek Sayı), 69-74.
<https://doi.org/10.13002/jafag4504>.
- Çoklar, H., Akbulut, M., 2016. Alıç (*Crataegus orientalis*) Meyvesinin Antioksidan Aktivitesi ve Fenolik Bileşiklerinin Ekstraksiyonu Üzerine Farklı Çözgenlerin Etkisi. *Derim*, **33(2)**, 237-248.
<https://doi.org/10.16882/derim.2016.267908>.
- Ghendov-Moşanu, A., Cojocari, D., Balan, G., Sturza, R., 2018. Antimicrobial Activity of Rose Hip and Hawthorn Powders on Pathogenic Bacteria. *Journal of Engineering Sciences*, **25(4)**, 100-107.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.2576764>.
- Güven, K., Yücel, E., Cetintaş, F., 2006. Antimicrobial Activities of Fruits of *Crataegus*. and *Pyrus*. Species. *Pharmaceutical Biology*, **44(2)**, 79-83.
<https://doi.org/10.1080/13880200600591253>.
- Kaya, C., Topuz, S., Bayram, M., Kola, O., 2019. Alıç Marmelatı Üretiminde Farklı Tatlandırıcı Kullanımının Ürün Özelliklerine Etkisi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, **8(3)**, 180-192.
- Kostić, D.A., Velicković, J.M., Mitić, S.S., Mitić, M.N., Randelović, S.S., 2012. Phenolic Content, and Antioxidant and Antimicrobial Activities of *Crataegus oxyacantha* L (Rosaceae) Fruit Extract from Southeast Serbia. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, **11(1)**, 117-124.
<http://dx.doi.org/10.4314/tjpr.v11i1.15>.
- Murathan, Z.T., Arslan, M., Erbil, N., 2020. Analyzing Biological Properties of Some Plum Genotypes Grown in Turkey. *International Journal of Fruit Science*, **20**, 1729-1740.
<https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1830917>.
- Polatçı, H., Taşova, M., 2017. The Effect on Drying Characteristics and Colour Values of Hawthorn Fruit of Temperature Controlled Microwave Drying Method.

Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, **5(10)**, 1130–1135.
<https://doi.org/10.24925/turjaf.v5i10.1130-1135.1201>

Rüzgar, H., Yazıcı, Ş., 2022. Alıç Meyvesinden Sanayiye Uygun Alıç Püresi Üretimi. *Gıda*, **47(3)**, 447-456.
<https://doi.org/10.15237/gida.GD21100>.

Tadić, V.M., Dobrić, S., Marković, G.M., Đorđević, S.M., Arsić, I.A., Menković, N.R., Stević, T., 2008. Anti-Inflammatory, Gastroprotective, Free-Radical-Scavenging, and Antimicrobial Activities of Hawthorn Berries Ethanol Extract. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **56(17)**, 7700-7709.
<https://doi.org/10.1021/jf801668c>.

Türkhan, A., Kaya, E.D., Yılmaz, İ., 2018. Alıç (*Crataegus monogyna*) Meyvesinden Polifenol Oksidaz Enziminin Kısmi Saflaştırılması ve Karakterizasyonu. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **22(3)**, 1048-1054.
<https://doi.org/10.16984/saufenbilder.334811>.

Tüysüz, B., Çakır, Ö., Dertli, E., 2021. Bazı Yabani Meyve Türlerinin Antioksidan Kapasitesi, Toplam Fenolik Madde İçeriği ve Fenolik Asit Profilinin Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **21**, 191-197.
<https://doi.org/10.31590/ejosat.818925>.

Sürdürülebilir Ulaşım Planlamasında CBS Tabanlı Otopark Uygunluk Analizi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 25.07.2023

Kabul/Accepted: 06.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

GIS-Based Car Parking Suitability Analysis in Sustainable Transportation Planning

Arif Çağdaş AYDINOĞLU^{1,2*}, Süleyman ŞİŞMAN¹, Mesube Azize ŞAŞMAZ¹, Selin Nur AKIN¹

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

² Gebze Teknik Üniversitesi, Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Son zamanlarda çalışma hayatı ve günlük yaşam biçimlerindeki değişimler daha fazla insanın şehirlere yönelmesine neden olmuştur. Artan nüfus, araç sayısındaki hızlı artışı da paralelinde getirmiş olup şehir içi ulaşım sistemlerini olumsuz etkilemiştir. Bu yüzden sürdürülebilir kentsel ulaşımında büyük öneme sahip otoparkların eksik olması ve uygun olmayan konumlara planlanmasından dolayı problemler meydana gelmektedir. Araçların durağan trafik olarak bilinen otoparklarda zamanının çoğunu geçirdiği göz önüne alındığında, uygun otopark konumlarının belirlenmesi ile trafik sıkışıklığı ve araçların hareket kabiliyeti optimize edilmektedir. Araç sahipliği ve birim alandaki nüfusun fazla olduğu metropoliten alanlarda ulaşımın sorunsuz sağlanması açısından bu durum büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada sürdürülebilir ulaşım planlaması için otopark uygunluk analizinde Ulaşım, Ekonomi&Finans ve Potansiyel Çekim Özellikleri kriter gruplarında 23 kriter belirlenmiştir. Kriter ağırlıkları için ilgili sektör paydaşlarının katıldığı anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Anketler Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinden En İyi-En Kötü (Best Worst Method-BWM) tekniği ile analiz edilmiş olup, kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. İstanbul'un Pendik ve Tuzla ilçeleri ile Kocaeli'nin Gebze, Çayırova ve Darıca ilçeleri çalışma alanı olarak belirlenmiş olup, çalışma alanında kriterlere ilişkin veriler elde edilmiştir. Veriler yakınlık, eğitim, bulanık mantık ve ağırlıklı bindirme gibi coğrafi analiz teknikleri ile değerlendirilerek Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı uygunluk analizi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle Pendik ilçesinde 5 farklı konumda toplam 18.38 km², Tuzla ilçesinde 4 farklı konumda toplam 8.55 km² ve Gebze ilçesinde 6.51 km² bölgesel uygun alanlar tespit edilmiştir. Sonuçlar kentlerde otoparkların uygun yerlere konumlandırılmasında etkin karar-destek mekanizması olarak değerlendirilebilir. Uygun yerlere planlanmış otoparklar trafik sıkışıklığı ve çevreye salınan karbon emisyonlarının azaltılmasıyla kentsel yaşam kalitesinin artırılmasına katkı sağlayabilir.

Abstract

Recently, changes in working life and daily lifestyles have caused more people to move to cities. The increasing population brought the rapid increase in the number of vehicles in parallel and negatively affected the urban transportation systems. Therefore, problems occur due to the lack of car parking areas, which are of great importance in sustainable urban transportation, and their planning in unsuitable locations. Considering that cars spend most of their time in car parking areas known as static traffic, traffic congestion and mobility of cars are optimized by determining suitable parking locations. This situation is of great importance in terms of car ownership and ensuring fluently transportation in metropolitan areas where the population per unit area is high. In this study, 23 criteria were determined in the criteria groups of Transportation, Economy & Finance and Potential Attraction Properties for sustainable transportation planning in the car parking suitability analysis. For criterion weights, a survey was conducted with participation of relevant sector stakeholders. The surveys were analyzed using the Best Worst Method (BWM) technique, one of the Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) techniques, and criterion weights were calculated. Pendik and Tuzla districts of Istanbul and Gebze, Çayırova and Darıca districts of Kocaeli were determined as the study area, and data representing criteria were obtained in the study area. Geographic Information Systems (GIS)-based suitability analysis was performed by evaluating data with geographical analysis techniques such as proximity, slope, fuzzy logic and weighted overlay. Thus, a total of 18.38 km² in 5 different locations in Pendik, a total of 8.55 km² in 4 different locations in Tuzla and 6.51 km² in Gebze were determined as zonal suitable areas. The results can be considered as effective decision support mechanism for locating parking areas in suitable locations in cities. Car parking areas planned in suitable locations can contribute to improving the quality of urban life by reducing traffic congestion and carbon emissions released into environment.

Anahtar Kelimeler: En İyi-En Kötü Yöntemi (BWM); Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS); Bulanık Mantık; Otopark Uygunluk Analizi.

Keywords: Best Worst Method (BWM); Geographic Information Systems (GIS); Fuzzy Logic; Car Parking Suitability Analysis

1. Giriş

Günümüzde metropoliten şehirlerdeki artan nüfus ile plansız ve yoğun yapı stoğu oluşmuş olup, bu durum ulaşım planlamada çeşitli sorunlarının başlamasına neden olmuştur (Mohomed *et al.* 2022, Toan 2022). Birleşmiş Milletler (BM)'nin Dünya Şehirleri 2022 Raporu'na göre, dünya nüfusunun önümüzdeki 30 yılda artış eğiliminde olacağı ve 2050 yılı itibari ile nüfusun %68'inin şehirlerde yaşayacağı ön görülmektedir (UN-Habitat 2022). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayınlanan 2022 yılı kent-kır nüfus istatistiklerine göre ülkemiz nüfusunun %67,9'u yoğun, %17,3'ü orta yoğun olarak sınıflandırılan kentlerde yaşamaktadır (TÜİK 2023). Bu durumun bir sonucu olarak, özellikle İstanbul ve Kocaeli gibi büyük şehirlerde trafik, hava ve çevre kirliliği, ulaşım gibi birçok alanlarda önemli planlama sorunları ortaya çıkmaktadır (Babaei *et al.* 2023, Bibri and Krogstie 2017, D'Alpaos and Andreolli 2020). Şehirler kaynaklarını daha etkin kullanabileceği, bilgi ve iletişim teknolojilerinden yararlanabileceği, şehirlerde yaşayan insanların yaşam kalitesini artırma odaklı bilgi sistemi çözümlerine ihtiyaç duymaktadır (Bovkir *et al.* 2023, Hollands 2008, Neirotti *et al.* 2014).

Son zamanlarda çalışma hayatı ve günlük yaşam biçimlerinde meydana gelen değişimler, daha fazla insanın şehirlere yönelmesi ile yoğun kentleşmeye sebep olmuştur (Ari 2022, Zhang *et al.* 2022). Artan kent nüfusuna paralel olarak, trafiğe çıkan araç sayılarındaki hızlı artış ile şehir içi ulaşım sistemlerini olumsuz etkilemiştir. Bu bağlamda gündeme gelen sürdürülebilir ulaşım kavramı BM Üst Düzey Danışma Grubu tarafından "Karbon gazı salınımı, diğer emisyonları ve çevresel etkileri en aza indirirken güvenli, uygun fiyatlı, erişilebilir, verimli ve dayanıklı bir şekilde insanların ve malların hareketliliği için hizmet ve altyapı sağlanması" olarak tanımlanmıştır (İPA 2023, UN 2023). Sürdürülebilir ulaşım; ulaşım sistemlerine etkin erişiminin sağlanması, gelişmiş güvenlik, azaltılmış çevre ve iklim değişikliği ile mücadele, gelişmiş dayanıklılık ve daha fazla verimlilik hedefleri ile sürdürülebilir şehirler ve toplulukların inşasının da merkezinde yer almaktadır (GMR 2022, UN-Interagency Report 2021).

Metropoliten şehirlerin birçoğunda sürdürülebilir kentsel ulaşım için önemli bir konu olan otoparkların eksikliği ve uygun olmayan konumlara planlanmasından dolayı sorunlar yaşanmaktadır. Araçlar gün içinde durağan trafik olarak bilinen otoparklarda zamanının çoğunu geçirmektedir. Bu kapsamda otoparklar için uygun konumların analitik olarak belirlenmesi, trafik yükünü ve marjinal paklanmayı azaltır ve araçların hareket

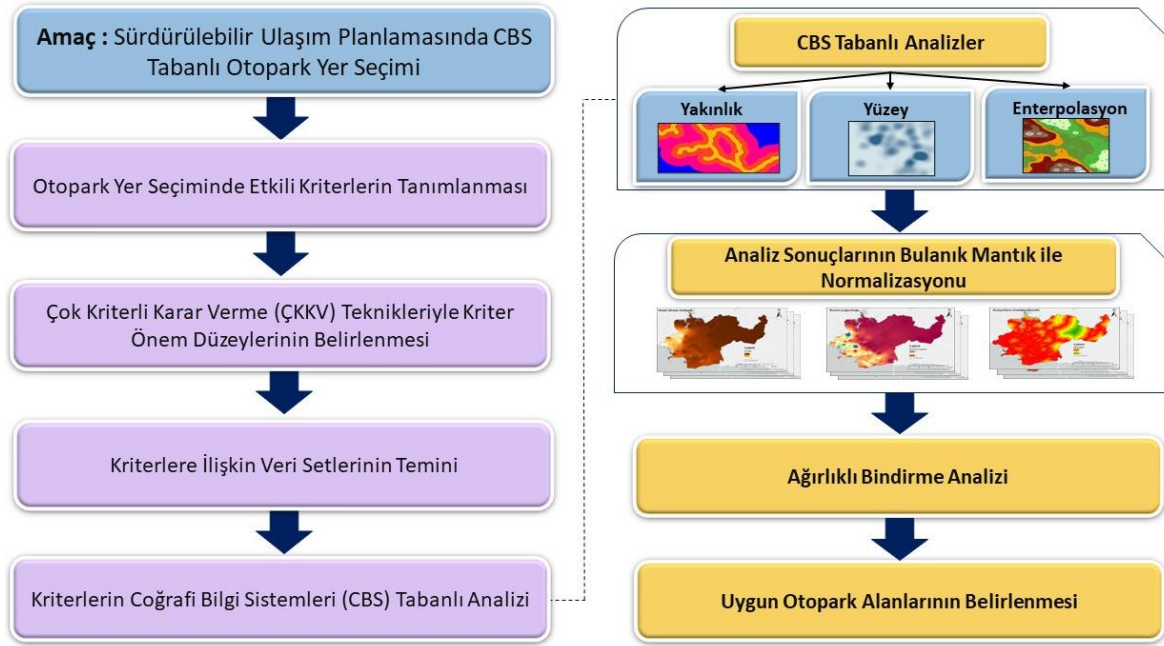
kabilyetini iyileştirir (Levy and Benenson 2015). Özellikle araç sahipliği oranlarının yüksek olduğu metropoliten alanlar göz önüne alındığında, bu durum ulaşımının aksamadan yerine getirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle otopark alanlarının planlanması şehirlerde sürdürülebilir ulaşımın temel konuları arasında yer almaktadır (Golias 2002, Hosseinlou *et al.* 2012, İSPARK 2016, Karimi *et al.* 2009). Kent içinde doğru ve uygun yerlere konumlandırılmış otoparklar ile trafik sıkışıklığının azaltılmasıyla, havaya salınan araç kaynaklı karbon emisyonlarının azaltılması kentsel hava kalitesinin artırılmasına önemli katkılar sağlayabilmektedir.

Otopark alanları için uygun konumlarının belirlenmesi, farklı kriterler ve bunların göreceli önemi ile doğrudan ilişkilidir. Otopark alanları için uygun konumların geleneksel yaklaşımlarla belirlenmesi otoparkların aktif seyahat, potansiyel çekim merkezleri ve yoğun caddelerden uzakta konumlandırılmasına neden olmakta ve bu da trafik yükleri üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Dehghani and Soltani, 2023, Demir *et al.* 2021). Dolayısıyla uygun otopark yerlerinin analizinde çok sayıda kriterin eş zamanlı değerlendirilebildiği analitik analiz yaklaşımlarına gereksinim duyulmaktadır. Bu kapsamda Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Teknikleri kullanarak çok sayıda kriter eş zamanlı değerlendirilebilmektedir.

ÇKKV ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), otopark alanları için uygun konumu belirlemek için birden fazla temel parametreyi aynı anda analiz etme yeteneğine sahiptir. Literatürde bazı araştırmalar, CBS tabanlı ÇKKV teknikleri ile otopark alanı seçimi problemlerine odaklanmıştır. Örneğin, Krasić ve Lanović (2013) otopark yer seçiminde etkili kriterleri Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) tekniği ile ağırlıklandırmışlardır. Hosseinlou *vd.* (2012) ise benzer şekilde AHP tekniği ile kriter ağırlıklarını belirlemiş olup, kriterlerin coğrafi analiz sonuçları ve ilgili ağırlıkları CBS entegre bulanık cebirsel toplam yaklaşımı kullanarak birleştirmişlerdir. Diğer taraftan uygun otopark alanlarını belirlemek için Demir (2016)-Bulanık AHP (BAHP), Alinia *vd.* (2015)- Jelokhani-niaraki ve Malczewski (2015) Ordered Weighted Average (OWA), Palevičius *vd.* (2013)-Complex Proportional Assessment (COPRAS), Farzanmanesh *vd.* (2010) ise Bulanık Mantık gibi teknikleri CBS entegre biçimde kullanmışlardır. Fakat bu çalışmalarda kullanılan otopark yer seçim kriterlerine ilişkin ağırlıklandırma işlemi belirli bir meslek grubu ya da literatüre dayalı olarak belirlenmiştir. Kriterler farklı meslek disiplinlerinden uzmanlar ve ilgili sektör paydaşları ile bütüncül olarak yeterli düzeyde değerlendirilmemiştir

Bu çalışmada, yüksek nüfus ve farklı ulaşım fonksiyonlarının bir arada olması nedeniyle seçilen test bölgesi, İstanbul ilinin Tuzla ve Pendik ilçeleri ile Kocaeli ilinin Gebze, Darıca ve Çayirova ilçelerini kapsamaktadır.

Çalışma alanı dahilinde temin edilen verilerin Şekil 1'deki iş sürecine göre CBS entegre biçimde değerlendirilmesiyle yeni tesis edilecek otoparklar için olası en uygun konumlar belirlenmiştir.



Şekil 1. Çalışma iş akışı süreci.

2. Materyal ve Metot

2.1. Otopark Uygunluk Analizinde Etkili Kriterlerin Belirlenmesi

Sürdürülebilir şehirler için uygun otopark alanlarının belirlenmesi, doğrudan farklı parametreler ve bunların göreceli önemi ile ilgilidir. Otopark yer seçimi için uygun alanların belirlenmesi çok sayıda kriterle bağlı olup, bu kriterlerin eş zamanlı analiziyle en uygun alanların tespiti yapılabilmektedir. Çalışma kapsamında şehirlerde sürdürülebilir ulaşım planlamada otopark yer seçiminde etkili unsurlar Ulaşım, Ekonomi/Finans ve Potansiyel Çekim Özellikleri ana kategorileri altında detaylı literatür taramaları sonucunda Şekil 2'de ifade edilen 3 ana kriter grubunda toplam 23 kriter ile tanımlanmıştır (Aydınoglu and Iqbal 2021, Demir et al. 2021, Karimi et al. 2009, Li et al. 2009, Öztürk vd., 2020, Sisman and Aydinoglu 2020).

Ulaşım Özellikleri kriter grubu mevcut yolların ve farklı ulaşım fonksiyonlarına yakınlık gibi kriterlerin yeni yapılacak otopark alanlarına etkisini ifade etmektedir. Bu kriter grubu içerisinde tanımlanan kriterler göz önüne alındığında; yeni otopark alanları anayollara, otoyollara, otobüs duraklarına, raylı sistem istasyonlarına, deniz ulaşım istasyonlarına ve hava alanlarına yakın olmalıdır. Ayrıca yeni otopark alanları trafik yoğunluğunun yüksek ve yol eğiminin düşük olduğu yerlerde olmalıdır.

Ekonomi/Finans Özellikleri kriter grubu mevcut otoparkların kapasite ve ücretleri, bölgedeki araç sahipliği gibi ekonomi ve finans odaklı kriterlerin yeni yapılacak otopark alanlarına etkisini ifade etmektedir. Bu kriter grubu içerisinde tanımlanan kriterler göz önüne alındığında; yeni otopark alanları arsa maliyetinin düşük, otomobil sahipliği ve otopark ücretlerinin yüksek, otopark kapasitelerinin düşük olduğu ve mevcut otoparklardan uzak yerlerde olmalıdır.

Potansiyel Çekim Özellikleri Kriter grubu ise mevcuttaki nüfus ve konut yoğunluğunun yanı sıra eğitim, sağlık, alışveriş, kültürel tesisler gibi sosyal donatı unsurlarının yeni otopark alanları için olası etkisini ifade etmektedir. Bu kriter grubu içerisinde tanımlanan kriterler göz önüne alındığında; yeni otopark alanları nüfus yoğunluğu, konut ve iş yeri yoğunluğunun yüksek olduğu yerlerde olmalıdır. Ayrıca yeni otopark alanları kültürel tesislere, eğitim tesislerine, sağlık tesislerine kamu/idari tesislere, spor tesislerine, alışveriş tesislerine ve yeşil alanlara yakın yerlerde olmalıdır.

2.2. En İyi-En Kötü (BWM) Tekniği

En İyi-En Kötü (Best Worst Method-BWM) tekniği Razi (2015) tarafından ortaya atılan bir ÇKKV tekniğidir. Diğer ÇKKV tekniklerine kıyasla bu teknik, uygunluk analizleri

gibi çok kriterli karar problemlerinde daha az matematiksel işleme sonuçlar elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu teknikte en karar vericilerin kriterler arasındaki karşılaştırmaları ile kriter önem düzeylerini ifade eden ağırlık değerleri belirlenmektedir (Mi et al. 2019). Yönteminin çalışma süreci beş adımda ifade edilmektedir (Razei, 2015):

1. Adım: Tekniğin çalışma süreci söz konusu karar probleminin belirlenmesi ve karar sürecinde değerlendirmeye kriterlerinin $(C_i = c_1, c_2, \dots, c_n)$ tanımlanmasıyla başlamaktadır.

2. Adım: Karar vericiler/uzmanlar tarafından en iyi/önemli ve en kötü/önemsiz kriter belirlenir.

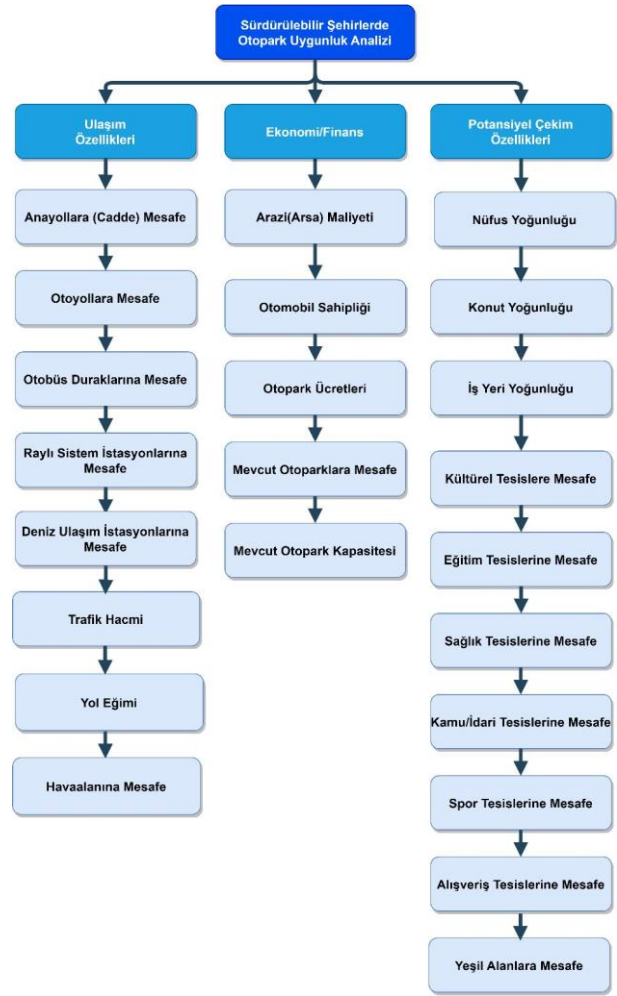
3. Adım: En iyi/önemli kriter Çizelge 1’de tanımlanan 1-9 arasındaki ölçek değerleri kullanılarak diğer kriterlerle karşılaştırılır (Akyuz et al. 2023). Karşılaştırmada en iyi/ en önemli kritere eşit düzeyde önem içeren kriter 1 değeri ile tanımlanırken, en iyi/en önemli kriterin diğer kriterden çok daha önemli olması durumunda 9 değeri ile tanımlanmaktadır. Bu durum Eşitlik 1’de verilen karşılaştırma vektörü ile ifade edilmektedir. Eşitlikte a_{Bj} “B” en iyi/önemli kriterinin “j” kriterine göre tercih edilme durumunu göstermektedir.

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (1)$$

4. Adım: En kötü/en az önemli kriter Çizelge 1’de tanımlanan 1-9 arasındaki ölçek değerleri kullanılarak diğer kriterlerle karşılaştırılır. Karşılaştırmada kullanılan 1 değeri kriterlerin eşit derecede önemsiz olduğunu belirtirken, 9 değeri ise en az öneme sahip kriterin diğer kriterden çok daha önemsiz olduğunu ifade etmektedir. Bu durum Eşitlik 2’de verilen karşılaştırma vektörü ile ifade edilmektedir. Eşitlikte a_{jW} “W” en kötü/önemsiz kriterinin “j” kriterine göre tercih edilme durumunu göstermektedir.

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T \quad (2)$$

5. Adım: En iyi ve en kötü kriter karşılaştırma vektörleri yardımıyla her bir kriter için optimum ağırlık katsayıları $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ hesaplanır. En iyi kriterin sırasıyla tüm kriterlere ve tüm kriterlerin en kötü kritere oranlanmasıyla $a_{Bj} = w_B / w_j$ ve $a_{jW} = w_j / w_W$ değerleri elde edilir. Maksimum mutlak farkların minimize edildiği Eşitlik 3’teki model kullanılarak kriter ağırlık katsayıları ve tutarlılık göstergesi (ξ^*) hesaplanır. Ayrıca $\sum_j w_j = 1$ ve $w_j \geq 0$ şartları tüm j kriterleri için yerine getirilmelidir.



Şekil 2. Otopark yer seçiminde etkili kriterlerin tanımlanması.

Çizelge 1. Önem düzeyi karşılaştırma ölçeği (Saaty, 2008).

Önem Düzeyi	Önem Derecesi	Açıklama
1	Eşit	İki kriter birbirine göre eşit önemli/önemsizdir.
3	Orta derece	Kriterlerden biri diğerinden daha önemli/önemsizdir.
5	Güçlü	Kriterlerden biri diğerinden biraz daha önemli/önemsizdir.
7	Çok önemli	Kriterlerden biri diğerine göre çok önemli/önemsizdir.
9	Son derece	Kriterlerden biri diğerine göre son derece önemli/önemsizdir.
2, 4, 6, 8	Ara değerler	Kriterler arası karşılaştırmada ara değerleri ifade eder.

$$\min \xi$$

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi \quad (3)$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi$$

Ardından Çizelge 2’de belirtilen ilgili Tutarlılık Endeks Değerleri (TED) ve ξ^* değeri kullanılarak Eşitlik 4 yardımıyla karşılaştırmaların Tutarlılık Oranı (ξ) hesaplanır.

$$\text{Tutarlılık Oranı } (\xi) = \frac{\xi^*}{\text{TED}} \quad (4)$$

Çizelge 2. Tutarlılık Endeks Değerleri tablosu (Razei, 2016).

a _{BW}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TED	0.00	0.44	1.00	1.63	2.30	3.00	3.73	4.47	5.23

Tutarlılık oranı (ξ), 0-1 arasında bir değer almaktadır. Karşılaştırmaların tutarlı olabilmesi için bu oran “0” değerine yakın olmalıdır (Rezaei 2016, Uyan and Ertunc, 2023). Eğer sonuçlar tutarsız olarak belirlenirse, 3 ve 4’üncü adımdaki karşılaştırmalar tekrar edilerek kriter ağırlık katsayıları yeniden hesaplanır.

2..3 Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Tekniği

Bulanık Mantık, teorisi ile Zadeh (1965) tarafından ortaya atılmış, daha sonra Kaufmann ve Gupta (1988) ve Zimmerman (2001) tarafından gerçek dünya probleminin daha iyi tanımlanmasına olanak tanıyan kısmi üyelik kavramı geliştirilmiştir. Bulanık mantık tekniğinde her bir konuma 0-1 arasında üyelik değeri atanmaktadır. Burada 1 değeri belirlenen bir ilgili kriterin belirli bir kümeye tam üyeliğini (uygun yer olma durumunu) ifade ederken, 0 değeri üye olmamayı (uygun yer olmama durumu) belirtmektedir. Bu tür bir analiz bir kriterin bir kümenin ne kadar parçası olduğunun belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Bovkir and Aydinoglu 2018, Ustaoglu *et al.* 2023). Bu kapsamda üyelik tanımı, uygulama gereksinimlerine göre değişmekte olup doğrusal, doğrusal olmayan, sürekli, sürekli olmayan, simetrik veya asimetrik olabilmektedir. Her bir kriter için özelliklerine göre farklı bulanık üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu kapsamda Şekil 3’te temsili gösterimleri verilen Lineer, Gauss ve Sigmoidal üyelik fonksiyonları en sık kullanılan fonksiyonlar arasında yer almaktadır (Ustaoglu and Kabadayı 2021). Bu çalışma kapsamında otopark uygunluk analizi kriterlerinin yapısı göz önüne alınarak coğrafi analizlerinin normalize edilmesinde Lineer Üyelik Fonksiyonu kullanılmıştır.

3. Uygulama

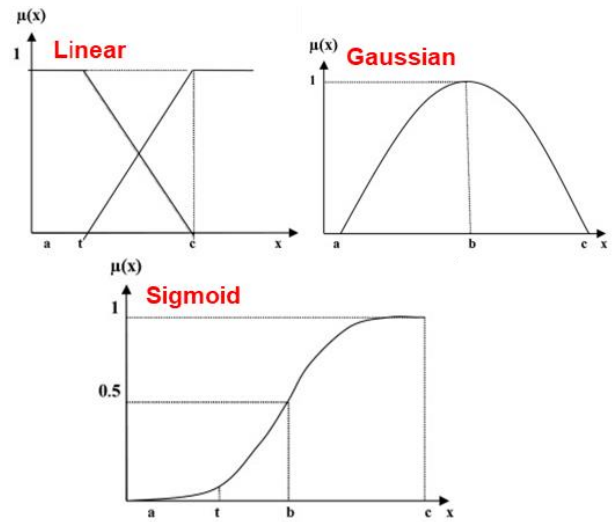
3.1. Çalışma Alanının Belirlenmesi ve Veri setlerinin Elde Edilmesi

İstanbul ilinin Anadolu yakasında bulunan Pendik ve Tuzla ilçeleri, Kocaeli ilinin batısında bulunan Gebze, Çayırova ve Darıca ilçeleri çalışma alanı olarak belirlenmiştir (Şekil

3). Çalışma alanında yer alan en büyük ilçe Gebze, en küçük ilçe ise Darıca olmakla birlikte 790 km²’dir.

2022 yılı itibarıyla yapılan nüfus istatistiklerine göre Çayırova 150.792, Darıca 225.602, Gebze 396.200, Tuzla 287.793 ve Pendik 751.104 nüfusa sahiptir (TÜİK 2023a). 5 ilçeyi kapsayan çalışma alanı sahip olduğu yüksek nüfusun yanı sıra, raylı sistemler, hava, deniz ve kara gibi farklı ulaşım sistemlerini bir arada bulundurmaktadır. Bu yüzden bu bölge otopark uygunluk analizi için potansiyel test bölgesi olarak değerlendirilebilir.

Tanımlanan kriterleri temsil eden veriler farklı veri kaynakları üzerinden elde edilerek, bir veri tabanında uygulamaya hazır bir duruma getirilmiştir. Bu kapsamda yol ağı veri seti, Open Street Map (OSM) Açık Veri Portalı üzerinden temin edilmiştir (OSM 2023). Trafik hacmi, otobüs durakları, raylı sistem istasyonlarının konumlarına ilişkin veriler İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Açık Veri Portalı üzerinden elde edilmiştir (İBB Açık Veri Portalı 2023). Eğim analizi için Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verisi Google Earth Pro uygulaması üzerinden elde edilmiştir.



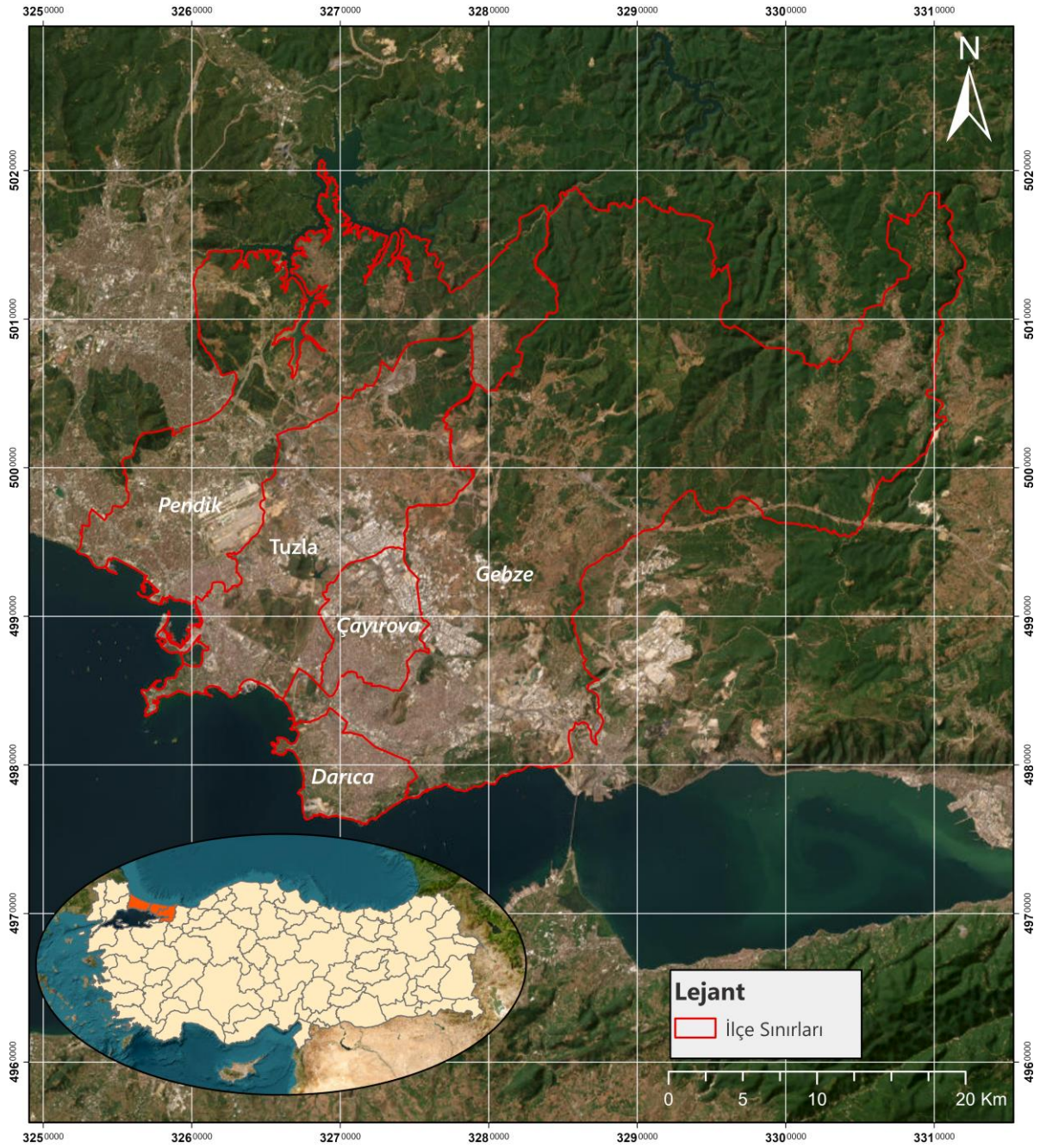
Şekil 3. Bulanık mantık üyelik fonksiyonları.

Mevcut otoparklar, otopark kapasite ve ücretleri, deniz ulaşım istasyonları, kültürel tesisler, eğitim tesisleri, sağlık tesisleri, kamu/idari tesisleri, spor tesisleri, alışveriş tesisleri, yeşil alanlar ve havaalanlarına ilişkin coğrafi veriler ile iş yeri ve konut yoğunluğu verileri İBB ve Kocaeli Büyükşehir Belediyesi (KBB)’nden temin edilmiştir. Nüfus (TÜİK 2023a) ve otomobil sahipliği (TÜİK 2023b) verileri TÜİK platformu üzerinden elde edilmiştir.

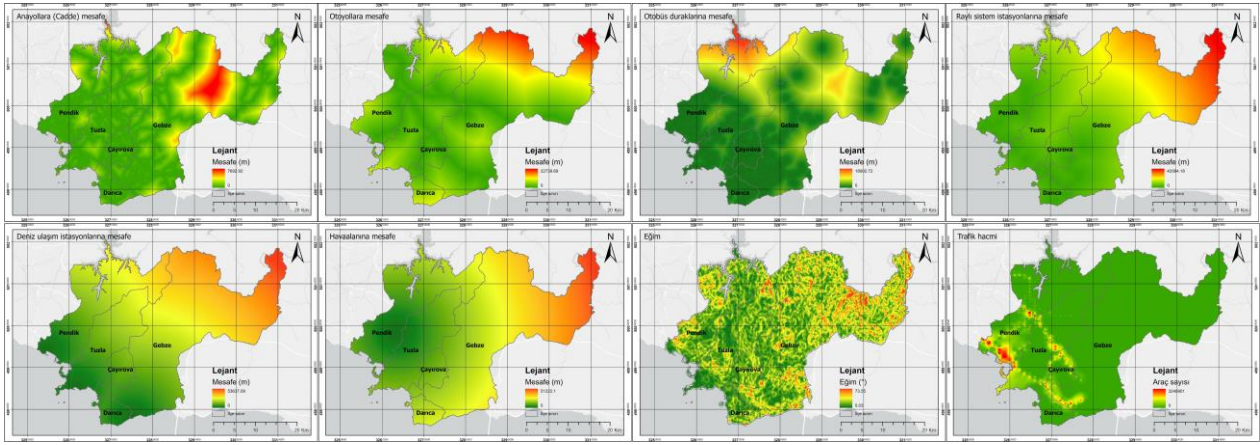
3.2 Otopark Uygunluk Kriterlerinin Coğrafi Analizleri

Çalışma alanında yer alan en Çalışma alanı otopark uygunluk için Şekil 2’de tanımlanan 23 kriteri temsil eden coğrafi veriler CBS ortamında yakınlık, yoğunluk, eğim gibi çeşitli coğrafi analiz teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerin tamamı ArcGIS Pro 3.0 CBS yazılımında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5’te ulaşım özellikleri, Şekil 6’da ekonomi/Finans Özellikleri, Şekil 7’de

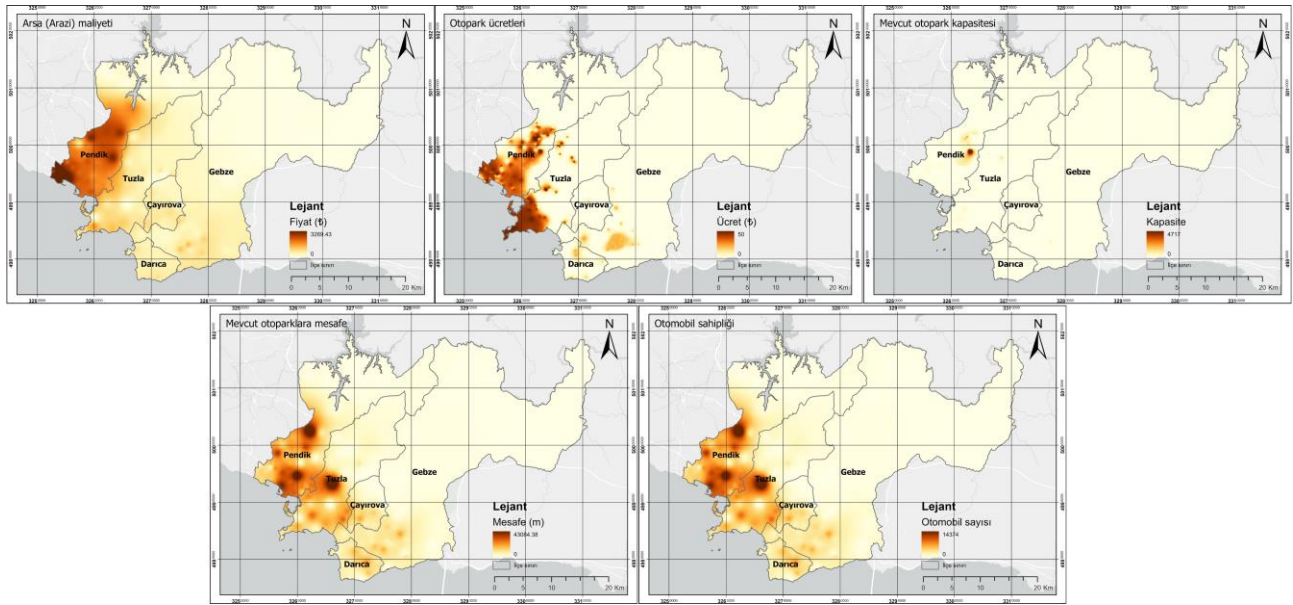
potansiyel çekim özellikleri kriterlerinin coğrafi analizlerine ilişkin sonuçlar verilmiştir. Coğrafi analizleri yapılan kriterlerin tamamı Bulanık Mantık-Linear Üyelik fonksiyonu kullanılarak normalize edilmiş olup, 0-1 aralığında standart bir forma dönüştürülmüştür. Bulanık mantık ile linear üyeliklerin tanımlanmasında kullanılan üyelik alt ve üst değerleri her bir kriter için Çizelge 3’te verilmiştir.



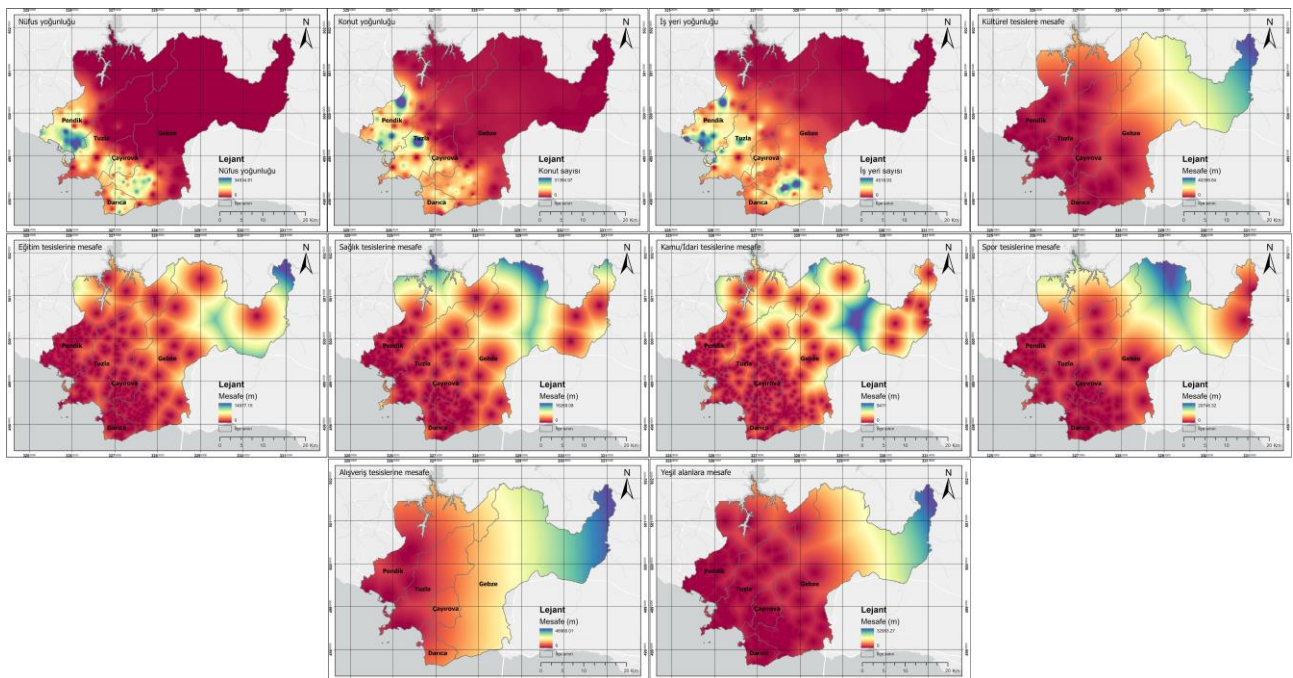
Şekil 4. Çalışma alanının belirlenmesi.



Şekil 5. Ulaşım Özellikleri kriterlerinin coğrafi analizleri



Şekil 6. Ekonomi/Finans Özellikleri kriterlerinin coğrafi analizleri.



Şekil 7. Potansiyel Çekim Özellikleri kriterlerinin coğrafi analizleri.

Çizelge 3. Bulanık lineer üyelik parametre alt ve üst değerlerinin belirlenmesi.

Kriter Grubu	Kriterler	Alt Değer	Üst Değer
Ulaşım Özellikleri	Anaarterlere(Caddelere) Mesafe	0	7662.92
	Otoyollara Mesafe	0	22739.69
	Otobüs Duraklarına Mesafe	0	18002.72
	Raylı Sistem İstasyonlarına Mesafe	0	42994.18
	Deniz Ulaşım İstasyonlarına Mesafe	0	53637.09
	Trafik Hacmi	0	3240901
	Yol Eğimi	0.3	73.55
Ekonomi /Finans Özellikleri	Havaalanına Mesafe	0	51222.1
	Arazi (Arsa)Maliyeti	0	3269.43
	Otopark Ücretleri	0	50.00
	Mevcut Otopark Kapasitesi	0	4717
	Mevcut Otoparklara Mesafe	0	43084.38
	Otomobil Sahipliği	0	14374
	Nüfus Yoğunluğu	0	34934.81
	Konut Yoğunluğu	0	31394.97
	İş Yeri Yoğunluğu	0	4518.93
	Kültürel Tesislere Mesafe	0	40399.84
Potansiyel Çekim Özellikleri	Eğitim Tesislerine Mesafe	0	14977.15
	Sağlık Tesislerine Mesafe	0	15269.08
	Kamu/İdari Tesislere Mesafe	0	9411.00
	Spor Tesislerine Mesafe	0	20746.32
	Alışveriş Tesislerine Mesafe	0	48965.01
	Yeşil Alanlara Mesafe	0	32953.27

3.3 Kriterler Önem Düzeylerinin Belirlenmesi

Otopark uygunluk analizinde belirlenen kriterlerin ağırlıklarının bulunması amacıyla doğrudan ulaşım ilişkili konular üzerine çalışan akademisyenlerin ve sektör çalışanlarının katıldığı toplam 20 kişi ile anket çalışması yürütülmüştür. Akademisyen olarak harita mühendisliği, inşaat mühendisliği, şehir ve bölge planlama bölümlerinden doktor öğretim üyesi, doçent ve profesörlerden oluşan 10 kişiye anket yapılmıştır. Sektör çalışanı olarak da kentsel ulaşım planlama, kentsel

ulaştırma sistemleri, şehir ve bölge planlama gibi konularda çalışan harita mühendisi, şehir ve bölge plancısı, mimar gibi lisans ve yüksek lisans mezunu 10 kişiye anket yapılmıştır. Her katılımcı için kriter ağırlıkları BWM tekniğiyle değerlendirilmiştir. BWM tekniği ile kriter ağırlıklarının hesaplama süreci bir katılımcının ana kriter grupları için karşılaştırmaları üzerinden örnek olarak açıklanmıştır:

1. Adım: İlk adımda değerlendirmeye alınacak karar kriterler belirlenmiştir. Bu örnekte Ulaşım, Ekonomi/ Finans ve Potansiyel Çekim Özellikleri olmak üzere 3 kriter belirlenmiştir.

2. Adım: Karar vericiler tarafından en iyi ve en kötü kriterler belirlenmiştir. Bu örnekte ulaşım özellikleri kriteri en iyi kriter olarak belirlenirken, ekonomi/ finans özellikleri en kötü kriter olarak tanımlanmıştır.

Kriterler	En İyi Kriter	En Kötü Kriter
Ulaşım Özellikleri	X	
Ekonomi/ Finans Özellikleri		X
Potansiyel Çekim Özellikleri		

3. Adım: En iyi kriter olarak belirlenen ulaşım özellikleri kriteri Çizelge 1'de ifade edilen karşılaştırma ölçeği kullanılarak diğer kriterler ile karşılaştırılmıştır.

En İyi Kriter Karşılaştırma	Ulaşım Özellikleri	Ekonomi/ Finans Özellikleri	Potansiyel Çekim Özellikleri
Ulaşım Özellikleri	1	4	2

4. Adım: En kötü kriter olarak belirlenen ekonomi/finans özellikleri kriteri Çizelge 1'de ifade edilen karşılaştırma ölçeği kullanılarak diğer kriterler ile karşılaştırılmıştır.

En Kötü Kriter Karşılaştırma	Ulaşım Özellikleri	Ekonomi/ Finans Özellikleri	Potansiyel Çekim Özellikleri
Ekonomi/Finans Özellikleri	4	1	3

5. Adım: BWM tekniğinin matematiksel modeli kullanılarak her bir kriter için kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Ardından karşılaştırmaların tutarlığı için Tutarlılık oranı (ξ) değeri hesaplanmıştır. Tutarlılık Oranı (ξ) 0 değerine oldukça yakın olduğu için karşılaştırmaların tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Kriterler	Kriter Ağırlıkları (w)
Ulaşım Özellikleri	0.5625
Ekonomi/Finans Özellikleri	0.1250
Potansiyel Çekim Özellikleri	0.3125
$\xi = 0.0625 - \sum w = 1.00$	

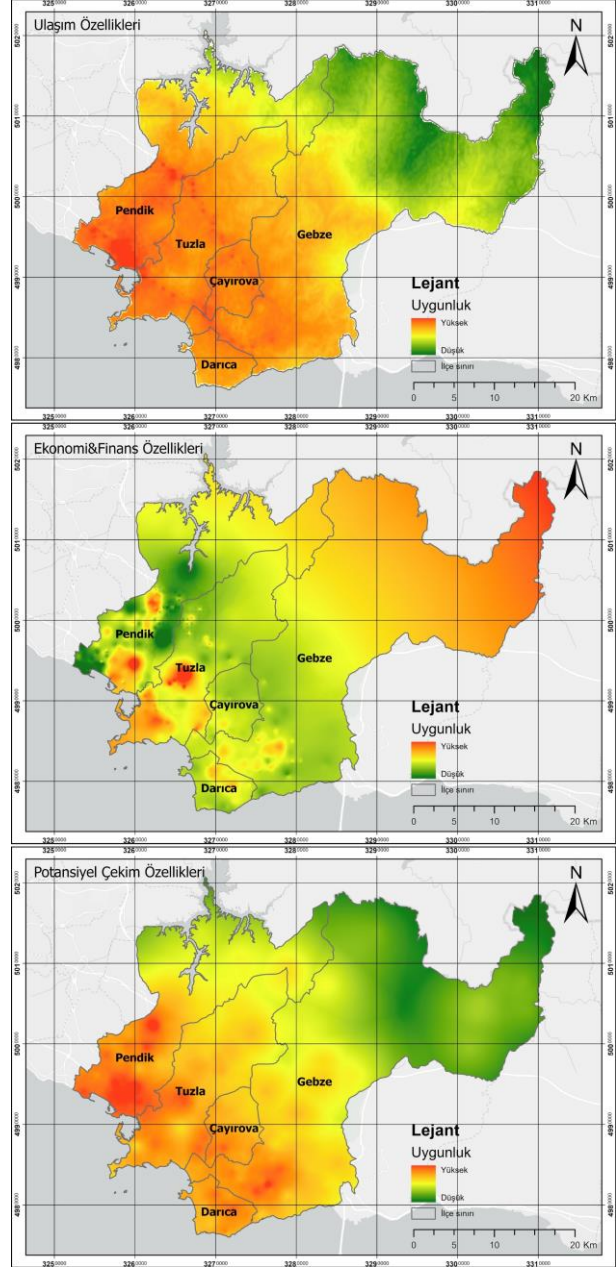
3.4 Otopark Uygunluk Haritalarının Üretilmesi

Ulaşım, Ekonomi/Finans Kriter ve Potansiyel Çekim Özellikleri kriterlerinin Bulanık Mantık yaklaşımıyla normalize edilmiş analiz sonuçları ilgili kriter ağırlıkları ile CBS ortamında kullanılarak ağırlık bindirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle Şekil 7’de görüldüğü gibi her bir ana kriter grup uygunluklarını temsil eden analiz sonuç haritaları üretilmiştir. Ana kriter gruplarının analiz sonuçları değerlendirildiğinde, Ulaşım özellikleri grubu açısından Gebze ilçesinin kuzey tarafının ormanlık alanlar olmasından dolayı otopark uygunluğunun düşük olduğu fakat Pendik ilçesinin sahil kesiminin uygunluğunun daha yüksek olduğu görülmüştür. Ekonomi/Finans özellikleri grubu açısından değerlendirildiğinde Tuzla ve Pendik ilçelerinden bölgesel olarak otopark uygunluğunun yüksek olduğu alanlar gözlemlenmiştir. Potansiyel çekim özellikleri grubu açısından değerlendirildiğinde ise tüm ilçelerde uygun yerler gözlemlenirken, özellikle Pendik ilçesinin güneyinde çok yüksek uygunluk değerine sahip alanlar olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 7).

Ana kriter gruplarına ilişkin uygunluk analiz sonuçları da ilgili grup ağırlıkları ile birlikte değerlendirilerek, çalışma alanı otopark uygunluk analiz sonuç haritası üretilmiştir (Şekil 8). Üretilen sonuç harita irdelendiğinde tüm ilçelerde belirli alanlarda uygun yerler tespit edilmiştir. Ancak en uygun yerler doğrudan nüfusun ve çeşitli donatı unsularının yoğun olduğu yerlerde gözlemlenmiştir. Özellikle Pendik ilçesinin güneydoğusu, Tuzla ilçesinin güney ve batı kesimleri, Gebze ilçesinin güneybatısında bölgesel olarak uygun alanlar gözlemlenmiştir (Şekil 8). Otopark uygunluk analiz sonuçlarındaki yüksek uygunluk değerine sahip alanlar Urban Atlas Kentsel Arazi Sınıfları ile CBS tabanlı çakıştırılmıştır. Bu bağlamda çalışma alanında toplam 10 alternatif otopark alanı bölgesel olarak belirlenmiştir (Şekil 8). Uygun otopark alanlarının ilçelere göre dağılımı incelendiğinde ise; Pendik ilçesinde 5 farklı konumda toplam 18.38 km², Tuzla ilçesinde 4 farklı konumda toplam 8.55 km² ve Gebze ilçesinde 6.51 km² alan bölgesel uygun alanlar olarak tespit edilmiştir.

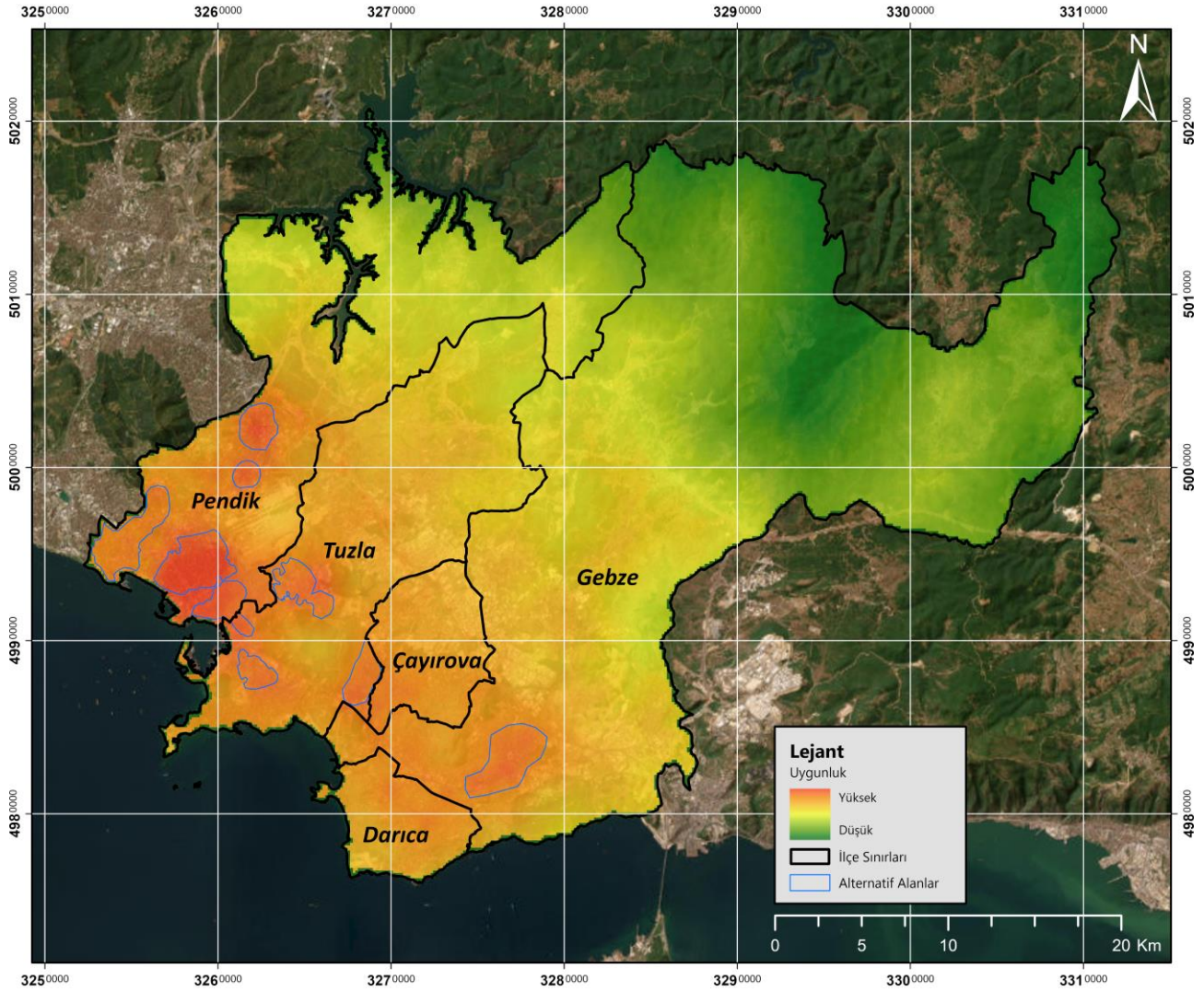
4. Sonuçlar ve Tartışma

Nüfus artışına paralel olarak son zamanlarda gittikçe kalabalıklaşan şehirlerde, trafikteki araç sayılarındaki önemli ölçüdeki artış ulaşım sistemlerini olumsuz biçimde etkilemiştir.



Şekil 7. Ulaşım, Ekonomi/Finans Kriter ve Potansiyel Çekim Özellikleri grup uygunluk analiz sonuçları.

Bu nedenle sürdürülebilir kent içi ulaşım ve etkin trafik yönetiminin bir parçası olarak değerlendirilen otoparkların kentlerde doğru yerlere konumlandırılması büyük önem arz etmektedir. Uygun yerlerde hizmet veren otopark alanları trafik yükünü ve marjinal paklanmayı azaltarak araçların hareket kabiliyetini iyileştirebilmektedir.



Şekil 8. Çalışma alanı otopark uygunluk analiz sonuçları.

Otopark alanları gibi kamu hizmetlerinin tahsisi, park verimliliğini artırmak ve ekstra maliyetten kaçınmak için doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi gereken karmaşık çok kriterli bir karar verme problemidir. Bu çalışma kapsamında şehirlerde sürdürülebilir ulaşım planlaması için ÇKKV Teknikleri ile İstanbul ilinin Tuzla ve Pendik ilçeleri ile Kocaeli ilinin Gebze, Çayırova ve Darıca ilçelerini kapsayan çalışma alanında CBS tabanlı otopark uygunluk analizi gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki benzer otopark yer seçimi çalışmalarında göre daha fazla kriter değerlendirmeye alınmıştır. Örneğin Demir vd. (2021) arazi kullanımı, finans ve ulaşım kategorilerinde toplam 18 kriteri değerlendirirken, bu çalışmada Ulaşım, Ekonomi&Finans ve Potansiyel Çekim Özellikleri kategorilerinde 23 kriter değerlendirmeye alınmıştır. Kriterlere ait önem düzeylerini tespit edebilmek için akademisyenler ve ilgili sektör paydaşlarının katılımıyla bir anket çalışması yürütülmüştür. Anketler ile kriter ağırlıklarını hesaplayabilmek için farklı ÇKKV teknikleri kullanılabilmektedir. Örneğin Dehghani ve Soltani (2023) BAHF tekniği ile Yılmaz ve Baykoc (2022) ise AHP tekniği

ile otopark yer seçiminde etkili kriterlerin ağırlıklarını hesaplamışlardır. Bu çalışmada ise daha yeni bir ÇKKV tekniği olan En İyi-En Kötü (BWM) tekniği ile kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Tanımlanan kriterlerin her biri ilgili coğrafi analiz teknikleri ile değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarının normalize edilmesinde ise CBS tabanlı farklı yaklaşımlar kullanılabilmektedir. Örneğin Ozturk ve Kilic-Gul (2020) otopark yer seçimi coğrafi analiz sonuçlarını Yeniden Sınıflandırma (Reclassify) analizi ile 1-10 aralığında standart bir duruma getirmişlerdir. Bu çalışmada literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak analiz sonuçları Bulanık Mantık yaklaşımıyla normalize edilerek tüm analizler standart bir duruma (0-1 aralığına) getirilmiştir. Ardından normalize edilmiş sonuçlar ve ilgili kriter ağırlıkları kullanılarak CBS tabanlı ağırlıklı bindirme analizi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle çalışma alanı için otopark uygunluk haritası üretilmiştir. Nüfusun ve çeşitli donatı alanlarının yoğun olarak hizmet verdiği, farklı ulaşım fonksiyonlarını içerisinde barındıran yerler uygun alanlar yerler olarak tespit edilmiştir. Özellikle Pendik ilçesinin güneydoğusu, Tuzla ilçesinin güney ve batı

kesimleri, Gebze ilçesinin güneybatısında bölgesel olarak uygun alanlar gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarındaki yüksek uygunluk değerine sahip olarak tespit edilen alanlar Urban Atlas Kentsel Arazi Sınıfları ile birlikte bütüncül biçimde değerlendirilmiştir. Böylelikle çalışma alanında toplamda 33.44 km² alana sahip 10 alternatif otopark alanı bölgesel olarak belirlenmiştir.

Kent ve ulaşım planlaması sürecinde yerel yönetimler, diğer paydaşlarla koordinasyon halinde alternatif otopark alanlarını CBS ve ÇKKV tekniklerini hibrit biçimde kullanarak belirleyebilir. Bu şekilde yerel yönetimler politika ve yatırımlarına da bağlı olarak alternatif alanlarının en etkin biçimde planlamasını gerçekleştirebilir. Sürdürülebilir şehirler ve toplumların inşası için uygun alanlara tesis edilecek otoparklar ile otomobil kullanımının yüksek olduğu şehirlerde kentsel ulaşımının kolaylaştırılması sağlanabilir. Ayrıca trafik sıklığının azaltılarak çevreye salınan karbon salınımlarının azalması sonucunda kentsel hava kalitesinin artırılmasına da katkı sağlayabilir. Bu çalışma kapsamında uygun otopark alanlarını belirleyebilmek için önerilen yaklaşım, kentsel alanlarda çeşitli yer seçimi ve yatırım planlama aktiviteleri için de uyarlanabilir. Şehir yetkililerinin rasyonel, makul, ekonomik ve çevre dostu kararlar alması için etkili bir karar destek mekanizması sağlayabilir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma/inceleme ve düzenleme
Yazar 2: Metodoloji, Yazma – orijinal taslak, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak, Yazma/inceleme ve düzenleme
Yazar 3: Analizler, Yazma – orijinal taslak, Görselleştirme
Yazar 4: Analizler, Yazma – orijinal taslak, Görselleştirme

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında ara ve sonuç çıktı olarak üretilen veriler makalede harita olarak sunulmuştur, araştırma amaçlı üretilen veri setleri ayrıca paylaşılmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında kullanılan coğrafi verilerin temini konusunda Kocaeli Büyükşehir Belediyesi (KBB) Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı, Akıllı Şehirler ve Kent Bilgi Sistemleri Şube Müdürlüğü'ne, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Ulaşım Daire Başkanlığı, Ulaşım Planlama Müdürlüğü'ne ve anketlere katılım sağlayan İSPARK İstanbul Otopark İşletmeleri Tic. AŞ çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

5. Kaynaklar / References

- Akyuz, G., Yalpir, Ş., Ertunc, E., 2023. Determining the Suitability of Lands for Agricultural Use with the Best-Worst Method. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **23(4)**, 1045-1055. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1229833>
- Alinia, K., Yarahmadi, A., Zarin, J. Z., Yarahmadi, H. and Lak, S. B., 2015. Parking lot site selection: An opening gate towards sustainable GIS-based urban traffic management, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **43**, 801-813. <https://doi.org/10.1007/s12524-014-0415-3>
- Ari, Y. 2022. A Statistical Approach to Urbanization: The Case of Turkey. In *Promoting Statistical Practice and Collaboration in Developing Countries* (pp. 431-445). Chapman and Hall/CRC.
- Aydinoglu, A. C. and Iqbal, A. S., 2021. Determining parking demand and locating parking areas using geographic analytics methods, *Journal of Urban Planning and Development*, **147(1)**, 05020035. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.000065](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.000065)
- Babaei, A., Khedmati, M., Jokar, M. R. A., Tirkolae, E. B., 2023. Sustainable transportation planning considering traffic congestion and uncertain conditions. *Expert Systems with Applications*, **227**, 119792. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119792>
- Bibri, S. E. and Krogstie, J., 2017. The core enabling technologies of big data analytics and context-aware computing for smart sustainable cities: a review and synthesis, *Journal of Big Data*, **4**, 1-50. <https://doi.org/10.1186/s40537-017-0091-6>
- Bovkir, R., Aydinoglu, A.C., 2018. Providing land value information from geographic data infrastructure by using fuzzy logic analysis approach. *Land use policy*, **78**, 46-60. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.06.040>
- Bovkir, R., Ustaoglu, E., Aydinoglu, A.C., 2023. Assessment of Urban Quality of Life Index at Local Scale with Different Weighting Approaches. *Social Indicators Research*, **165(2)**, 655-678. <https://doi.org/10.1007/s11205-022-03036-y>
- D'Alpaos, C. and Andreolli, F., 2020. Urban quality in the city of the future: A bibliometric multicriteria assessment model, *Ecological Indicators*, **117**, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106575>

- Dehghani, A., Soltani, A., 2023. Site Selection of Car Parking With the GIS-Based Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 1-26.
<https://doi.org/10.1142/S0219622023500293>
- Demir, S., 2016. Use of the spatial multiple criteria decision making techniques in the selection of car parking area, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 106.
- Demir, S., Basaraner, M. and Gumus, A. T., 2021. Selection of suitable parking lot sites in megacities: A case study for four districts of Istanbul, *Land use policy*, **111**, 105731.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105731>
- Farzanmanesh, R., Naeeni, A. G. and Abdullah, A. M., 2010. Parking site selection management using Fuzzy logic and Multi Criteria Decision Making, *Environment Asia*, **3(3)**, 109-116.
- Golias, J., Yannis, G. and Harvatis, M., 2002. Off-street parking choice sensitivity, *Transportation Planning and Technology*, **25(4)**, 333-348.
<https://doi.org/10.1080/0308106022000019620>
- Hollands, R. G., 2008. Will the real smart city please stand up? Intelligent, progressive or entrepreneurial? *City*, **12(3)**, 303-320.
<https://doi.org/10.1080/13604810802479126>
- Hosseinelou, M. H., Balal, E., Massahi, A. and Ghiasi, I., 2012. Developing optimal zones for urban parking spaces by Arc GIS and AHP, *Indian Journal of Science and Technology*, **5(11)**, 3618-3622.
- İSPARK, 2016. İstanbul Otopark Ana Planı. İstanbul Otopark İşletmeleri Tic. A.Ş (İSPARK), 1. Baskı, İstanbul.
- Jelokhani-Niaraki, M. and Malczewski, J., 2015. A group multicriteria spatial decision support system for parking site selection problem: A case study, *Land Use Policy*, **42**, 492-508.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.09.003>
- Karimi, V., Ebadi, H. and Ahmady, S., 2009. Modeling of parking site selection by using GIS with emphasis on weighting and integrating layers, *Journal of Faculty of Eng*, **38(3)**, 11-21.
- Kaufmann, A., Gupta, M.M., 1988. Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science. North-Holland, Amsterdam.
- Krasić, D. and Lanović, Z., 2013. Park & Ride facility planning, *Građevinar*, **65(2)**, 111-121.
- Levy, N., Benenson, I. 2015. GIS-based method for assessing city parking patterns. *Journal of Transport Geography*, **46**, 220-231.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.06.015>
- Li, L. B., Wang, M. and Wu, B., 2009. Study on the location parking index based on function division of parking space, In ICCTP 2009: Critical Issues In Transportation Systems Planning, Development and Management, 1-8.
[https://doi.org/10.1061/41064\(358\)176](https://doi.org/10.1061/41064(358)176)
- Mi, X., Tang, M., Liao, H., Shen, W., Lev, B., 2019. The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next?. *Omega*, **87**, 205-225.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.01.009>
- Mohamed, A. A., Kronenberg, J., Łaszkiwicz, E., 2022. Transport infrastructure modifications and accessibility to public parks in Greater Cairo. *Urban Forestry & Urban Greening*, **73**, 127599.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127599>
- Neirotti, P., De Marco, A., Cagliano, A. C., Mangano, G. and Scorrano, F., 2014. Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts, *Cities*, **38**, 25-36.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.12.010>
- Ozturk, D. and Kılıç-Gul, F., 2020. GIS-based multi-criteria decision analysis for parking site selection, *Kuwait Journal of Science*, **47(3)**, 2-14.
- Palevičius, V., Paliulis, G. M., Venckauskaite, J. and Vengrys, B., 2013. Evaluation of the requirement for passenger car parking spaces using multi-criteria methods, *Journal of Civil Engineering and Management*, **19(1)**, 49-58.
<https://doi.org/10.3846/13923730.2012.727463>
- Rezaei, J., 2015. Best-worst multi-criteria decision-making method, *Omega*, **53**, 49-57.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- Rezaei, J., 2016. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, **64**, 126-130.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001>
- Saaty, T. L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal Of Services Sciences*, **1(1)**, 83-98.

<https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>

Sisman, S. and Aydinoglu, A. C., 2020. *Using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques in the smart cities*. 5th International Conference on Smart City Applications. Karabük, Türkiye, 383-389.

Toan, T.D., 2022. Smart Planning and Management Solutions for Smart Mobility. In *CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure: Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures*, Springer Singapore. 1397-1405.

Ustaoglu, E., Kabadayı, M.E., 2021. Reconstruction of Residential Land Cover and Spatial Analysis of Population in Bursa Region (Turkey) in the Mid-Nineteenth Century. *Land*, **10(10)**, 1077. <https://doi.org/10.3390/land10101077>

Ustaoglu, E., Sisman, S., Aydinoglu, A.C., 2021. Determining agricultural suitable land in peri-urban geography using GIS and Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) techniques. *Ecological Modelling*, **455**, 109610. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109610>

Yilmaz, C., Baykoc, O. F. 2022. A Decision Support System for Parking Lot Location Problems in Metropolises: A Case Study in Istanbul. In *International Conference on Management Science and Engineering Management*, Cham: Springer International Publishing, 124-135.

Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, **8**, 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

Zhang, H., Chen, M., Liang, C. 2022. Urbanization of county in China: Spatial patterns and influencing factors. *Journal of Geographical Sciences*, **32(7)**, 1241-1260. <https://doi.org/10.1007/s11442-022-1995-4>

Zimmermann, H.J., 2001. *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, 4th edition. Springer, New York, 514 .

İnternet Kaynakları

- 1- GMR, 2022. Global Mobility Report 2022: Tracking Sector Performance (GMR). https://www.sum4all.org/data/files/global_mobility_report_2022_04052023_final.pdf, (06.12.2023)
- 2- İBB Açık Veri Portalı, 2023. İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Açık Veri Portalı. <https://data.ibb.gov.tr/>, (10.07.2023)
- 3- İPA, 2023. Kent Gündemine Bakış: İstanbul'da Sürdürülebilir Ulaşım Doğru. İstanbul Planlama Ajansı (İPA). <https://ipa.istanbul/yayinlarimiz/genel/istanbulda-surdurulebilir-ulasima-dogru/>, (06.12.2023)
- 4- OSM, 2023. Open Street Map (OSM). <https://www.openstreetmap.org/>, (10.07.2023)
- 5- TÜİK, 2023. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). 2022 Yılı Kent-Kır Nüfus İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Kent-Kir-Nufus-Istatistikleri-2022-49755>, (05.12.2023)
- 6- TÜİK, 2023a. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). Nüfus ve Demografi İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109>, (10.07.2023)
- 7- TÜİK, 2023b. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). Ulaştırma ve Haberleşme İstatistikleri, illere Göre Motorlu Kara Taşıtları Sayısı. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=ulasirma-ve-haberlesme-112&dil=1>, (16.08.2023)
- 8- UN, 2023. United Nations (UN)- World Sustainable Day. <https://www.un.org/en/observances/sustainable-transport-day>, (06.12.2023)
- 9- UN-Habitat, 2022. World Cities Report 2022. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf, (05.12.2023)
- 10- UN-Interagency Report, 2021. Sustainable Transport, Sustainable Development. Interagency Report For Second Global Sustainable Transport Conference. https://sdgs.un.org/sites/default/files/2021-10/Transportation%20Report%202021_FullReport_Digital.pdf, (06.12.2023)



The Use of Unmanned Aerial Vehicles in the 3D Documentation of Historical and Cultural Heritage: The Case of Ceyhan Kurtkulağı Caravanserai

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 10.11.2023

Kabul/Accepted: 08.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Tarihi ve Kültürel Mirasın 3 Boyutlu Olarak Dokümantasyonunda İnsansız Hava Araçlarının Kullanımı: Ceyhan Kurtkulağı Kervansarayı Örneği

Enis ARSLAN^{1*}, Alihsan ŞEKERTEKİN²

¹ Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Çanakkale, Türkiye

² Iğdır University, Department of Architecture and Town Planning, Iğdır, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Abstract

Detailed documentation of historical and cultural heritage is a necessity for further analysis, interpretation, and physical reconstruction. Usage of The Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in this role have been increasing day by day. As a result of its important contributions to the production of three-dimensional (3D) terrain models, it has reached an important point in the discipline of surveying engineering. Especially in 3D modeling and documentation of historical and cultural heritage, UAVs are advantageous tools in terms of time and cost when compared to the classical methods. The aim of this study is to generate a 3D model of the Kurtkulağı Caravanserai, located in the Kurtkulağı town of Ceyhan District of Adana, using UAV (DJI Phantom 4 RTK) and to reveal the importance of UAV in the documentation of this historical structure. In this context, according to a planned flight on the UAV, following the capture of the images of the caravanserai in a multiview aspect, a metric 3D model was produced using photogrammetric methods. Root Mean Square Errors (RMSEs) in X, Y, Z coordinates were calculated based on the Ground Control Points (GCPs) and corresponding model coordinates. The RMSEs for X, Y, Z coordinates were calculated 0.019m, 0.025m, and 0.033m, respectively.

Keywords: UAV, Cultural Heritage, 3D Model, Photogrammetry, Kurtkulağı Caravanserai, Ceyhan

Öz

Tarihi ve kültürel mirasın ayrıntılı bir şekilde belgelenmesi, daha fazla analiz, yorum ve yeniden yapım için bir zorunluluktur. İnsansız Hava Araçları'nın (İHA) bu rolde kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Üç boyutlu (3D) arazi modellerinin üretimine sağladığı önemli katkılar sonucunda, harita mühendisliği disipliniinde önemli bir noktaya ulaşmıştır. Özellikle tarihi ve kültürel mirasın 3D modellemesi ve dokümantasyonunda, klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında İHA'lar zaman ve maliyet açısından avantajlı araçlardır. Bu çalışmanın amacı, Adana'nın Ceyhan ilçesine bağlı Kurtkulağı kasabasında bulunan Kurtkulağı Kervansarayı'nın İHA (DJI Phantom 4 RTK) kullanarak 3D modelini geliştirmek ve bu tarihi yapının dokümantasyonunda İHA'nın önemini ortaya koymaktır. Bu bağlamda, İHA ile planlanan bir uçuşa göre kervansarayın çoklu görüntü açısından fotoğrafları alındıktan sonra, fotogrametrik yöntemlerle metrik bir 3D model oluşturulmuştur. X, Y, Z koordinatlarındaki Karesel Ortalama Hata (KOH), Yer Kontrol Noktalarına (YKN) ve karşılık gelen model koordinatlarına göre hesaplanmıştır. Buna göre X, Y, Z koordinatları için KOH sırasıyla 0,019m, 0,025m ve 0,033m olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Keywords İHA, Kültürel Miras, 3B Model, Fotogrametri, Kurtkulağı Kervansarayı, Ceyhan

1. Introduction

Nowadays, documentation of historical and cultural heritage is becoming more important. Detailed 3D modeling and documentation of heritage is a necessity for further analysis, interpretation, and physical reconstruction (Barsanti et al., 2014; Murthy and Grussenmeyer, 2017). In the literature, distance-based

techniques like Terrestrial Laser Scanning (TLS) or photogrammetry-based image processing techniques like Structure from Motion (SfM) are used in realizing these works (Remondino et al., 2012). Image-based approaches are advantageous for easy acquisition and low-cost tools (i.e., a camera, a computer, a tool for scaling and directing). On the other side, using low-cost tools can

affect the accuracy and quality of the work (Murtiyoso and Grussenmeyer, 2017).

The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in documentation of historical and cultural heritage has been frequently encountered in national and international studies, especially in recent years. Yakar et. al. (2015) studied on 3D modeling with surface and photogrammetric measurements of Bezariye Han in Konya. Besides, UAVs are used in 3D modeling of Kalender Baba and Kesikbaş Tomb (Mirdan and Yakar, 2017). Mahmod and Yılmaz (2018) generated a 3D model of Aksaray University Campus Mosque with UAV images using two different heights and two different accuracy values. The accuracy of the model was calculated over 24 ground control points using the terrestrial measurement technique. Murtiyoso and Grussenmeyer (2017) created reference points with a terrestrial laser scanner (TLS) for the Rohan Palace façade and St-Pierre-le-Jeune Catholic church, and they made laser scanner surveys and compared the dense matching results from UAVs by testing them with different software solutions. Karachaliou et al. (2019) used the UAVs for Historic Building Information Modeling (HBIM) to compose the 3D model of "Averof's Museum of Neohellenic Art" located in Metsovo, Greece. Orthoimages of the facades and architectural designs of both the exterior and interior parts of the building were obtained by UAV photogrammetry techniques. Korumaz et al. (2014) worked on the 3D modeling of the Harzburger Hof hotel in Bad Harzburg, Germany, which was damaged in a fire. In that study, 11 control points were utilized, four of which were on the building. Pictures were obtained using two different UAVs and a terrestrial laser scanner survey was also carried out. These two types of data were used in the creation of the 3D model. As seen from the previous literature, UAV photogrammetry is a unique technique to effectively model any structure, and thus this study focuses on using the UAV data for 3D modelling of a historical structure, namely, Kurtkulağı Caravanserai. The aim of this study is to model Kurtkulağı Caravanserai in 3D by using UAV and photogrammetric techniques for the protection, documentation, and restoration of historical and cultural heritage. Even though identical 3D modeling of historical structures were carried out in Türkiye (Yakar et. al., 2015; Erdoğan et al., 2021; Şenol et al., 2021), the lack of any cultural heritage's 3D model is a kind of threat in case of a damage due to the natural disasters or unforeseen events. Therefore, the original contribution of this study is not only the visual representation of the caravanserai but also to provide 3D

metric information, which is crucial for the preservation, documentation, and potential restoration of this valuable heritage.

Kurtkulağı Caravanserai is a historic Ottoman caravanserai located in Adana Province, Turkey. It was built by the Ottoman Empire in the 18th century on the Adana-Aleppo part of the Silk Road. Thus, it has both historical and cultural representativeness. The geographic location and one of the aerial photos of the caravanserai is given in Figure 1.



Figure 1. Location of Kurtkulağı Caravanserai and one of its aerial photos.

2. UAVs in 3D Modelling

There is an increasing use of UAVs in civilian applications. UAVs provide close range images for various areas thanks to ongoing developments in versatile sensor technology and an advance in computing power (Murtiyoso et al., 2017). There are many classifications for UAVs. They can be lighter-than-air, fixed-wing, or rotary-wing platforms. Lighter-than-air platforms are low-cost solutions, but they are hard to control in windy conditions. Fixed-wing UAVs have limited payload and large-scale imaging capabilities. On the other hand, rotary-wing UAVs have a bigger payload specification and more robustness for wind effects but low surface coverage when compared to fixed-wing types (Murtiyoso and Grussenmeyer, 2017). UAVs can also be classified according to their usage areas. Considering that UAVs can be used in photogrammetric applications, it is also important whether they have a built-in camera or not. With a built-in camera, focal length and sensor size gain importance. In the case of low values of these two features, closer flight is required for better image quality. In this case, there is no need to purchase a camera and gimbal system. In other cases, separate camera and gimbal systems can be added to

UAVs. Adding a DSLR camera, for example, allows images to be taken at a higher resolution (Federman et al., 2017). The selection of the type and model of an UAV depends on the dimensions of the study site. The UAV used in this study is a Phantom 4 Real Time Kinematic (RTK) model that is used to acquire all the aerial images (Figure 2). Many companies and researchers employ the Phantom 4 RTK for daily mapping and surveying operations. This is because the Phantom 4 RTK is a small, dependable, and affordable drone. With its high precision mapping capability, the Phantom 4 RTK helps to provide a balance of quality and speed, cutting survey time to a matter of hours while maintaining precise metadata.



Figure 2. Courtesy of Phantom 4 RTK (DJI, 2023)

Phantom is a rotary wing platform manufactured by the company DJI. Phantom 4 is a low-cost, lightweight (take-off weight: 1,391g), compact, and accurate low altitude mapping solution. It is equipped with a 1" CMOS with effective 20 megapixels (MP) camera and an RTK module. Ground sample distance (GSD) is 2.74 cm at 100 meters of flight altitude. The Phantom 4 supports both automatic and manual flight modes. With multiple planning modes, it is an ideal UAV for 2D and 3D Photogrammetry. RTK horizontal and vertical positioning accuracies are 1cm+1ppm and 1.5cm+1ppm, respectively. As external hardware, a backup battery and a smart control unit are used to perform the flight.

3. 3D Modelling Methodology with UAVs

The documentation process of historical and cultural heritage requires the use of large multimedia data sets, including photographs, photographic panoramas, corrected photographs, orthophotos, technical drawings, different 3D models, including point clouds, and other data such as videos, reports, images, and texts. Basically, this process can be considered under five main headings: (1) planning documentation, (2) data collection, (3) data processing, (4) data management, and (5) data distribution (Korumaz et al., 2014). All these steps involve the diverse and intensive use of digital technologies. In this case, choosing the appropriate technology,

procedure, and workflow is always difficult and depends on the size and complexity of the study and the level of accuracy required (Korumaz et al., 2014). Figure 3 represents the work-flow chart showing the basic steps in data acquisition and processing with the UAV (Nex and Remondino, 2014). The main steps in the workflow include mission planning, image acquisition, image triangulation, and feature extraction such as orthoimage, Digital Surface Model (DSM), and 3D model.

3.1 Mission Planning

A flight plan and measurements of GCPs are required to make a typical image-based observations with an UAV. At this stage, in addition to the flight plan, it is recommended to create a subcategory that includes the safety procedures of the relevant country and the flight log (i.e., flight pattern, time of flight, battery life, wind speeds, temperature, etc.) (Federman et al., 2017). While creating the flight plan, Ground Sample Distance (GSD) should be calculated. It is to determine how much area a pixel value on the GSD image corresponds to on the surveying object. GSD can be calculated with the following formula:

$$GSD = \frac{\text{Pixel Size}}{\text{Focal Length}} \times \text{Distance to object} \quad (1)$$

The fact that the GSD is 3 mm means that a pixel in the camera corresponds to 3 mm on the object. For the most ideal resolution, the "Distance to Object" value should be selected as the minimum distance from the camera to the object. Considering the camera focal length value used in similar flights, the flight should be planned by considering the closest GSD value at the most inaccessible points. The camera angle should be determined by defining the flight altitude, the dimensions of the object, and the areas that create obstacles (Federman et al., 2017). Flight modes are also a user-selectable option. There are three types of flight modes: manual, assisted, or autonomous (Nex and Remondino, 2014). The flight pattern can also be chosen as circular or linear to provide optimum overlap. (Aicardi et al., 2016). In this study, manual and autonomous flight modes were used. In autonomous flight, nadir images of the Caravanserai were taken in 3D photogrammetry mode. On the other hand, in manual flights, nadir images of the Caravanserai were taken.

3.2 Image Acquisition

For the overlapping image acquisitions, the higher overlapping ratio will result in higher accuracy in the

modeling. By using a spatial intersection point of view, it will be best practice to take the images with a wide overlapping area. Coordinate and dimensional features should be measured for later georeferencing and 3D

model construction (Murtiyoso and Grussenmeyer, 2017).

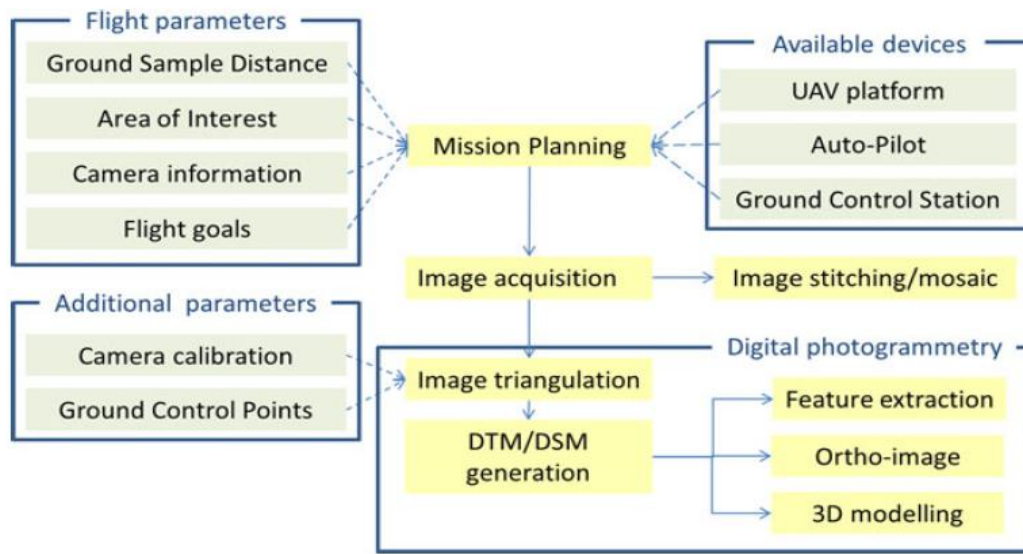


Figure 3. UAV Image Acquisition Workflow (Nex and Remondino, 2014)

After acquisition, images can be used for mosaicking purposes or as inputs to the photogrammetric process. There are some protocols and procedures that standardize the calibration and documentation of image acquisition. Some examples are: (International Committee for Documentation of Cultural Heritage (CIPA) (Grussenmeyer et al., 2017), Tools and Acquisition Protocols for Enhancing Artifacts Documentation (TAPENADE) (Pierrot-Deseilligny et al., 2011; Nony et al., 2012) and "One panorama each step" (Grussenmeyer et al., 2013). These all commonly suggest good calibration, procedural documentation, and a large percentage of overlap (Murtiyoso and Grussenmeyer, 2017).



Figure 4. Sample images of Kurtkulağı Caravanserai taken by nadir photogrammetry.

In this study, a flight is performed, and in total 672 overlapping images were taken from various viewpoints of the caravanserai according to the UAV flight plan for the study area. Some of the images were taken with nadir (vertical) photogrammetry, and some of them were taken with oblique photogrammetry. The overlapping percentage was set 80% front and 80% side in nadir image acquisitions. In manual flight, the overlapping rate was determined by the rule of thumb. In nadir photogrammetry, images of the caravanserai were taken from above (close to a bird's eye view), as shown in Figure 4, while in oblique photogrammetry, images of the facades of the caravanserai were taken, as shown in Figure 5.



Figure 5. Sample images of Kurtkulağı Caravanserai taken by oblique photogrammetry.

After these images were transferred to the computer environment as a laboratory study, 3D model production was carried out using trial version of Agisoft Metashape photogrammetric software. In this context, it is of great importance to use the 3D models of the historical and cultural heritage in the restoration of damages that may occur in the future.

3.3 Digital Photogrammetry

Photogrammetry is a technique that is used for mapping applications to produce orthophotos of an area of interest. UAVs are getting more popular by providing quick inspections of buildings for smaller cartography (Murtiyoso et al., 2017). This kind of transformation in photogrammetry is called UAV photogrammetry. Eisenbeiß (2009) defined the UAV photogrammetry as a remote measurement technique achieved by a vehicle operated semi-autonomously, or autonomously.

Digital Photogrammetry workflow is initiated by camera calibration. Camera calibration can be achieved by two orientation methods: nadir and oblique. UAV photogrammetry uses mostly nadir orientation (a camera is located vertically) to produce top-down images of an object. On the contrary, nadir orientation is not always enough to complement a 3D model because of its weakness in photographing facades. Oblique images give the option to rotate the camera to a given angle for (facal) imaging. This is an easy configuration when the UAV has a built-in camera with this feature. But when the camera is mounted externally, rotation should be configured manually (Federman et al., 2017).

Nowadays, the use of commercial or open-source software solutions for digital photogrammetry is very common. By using the integrated photogrammetry and computer vision algorithms with process flows, dense clouds, image orientation, 3D modeling, and orthophoto image creation can easily be achieved in an efficient way. Most well-known open-source software products are Agisoft Photoscan (PS), Pix4D (P4D), Photomodeler (PM), Micmac (MM), 3Df Zephyr (3DZ), Acute3D, VisualSFM (VSFM), SURE and ContextCapture (CC). MM and VSFM. Although these software tools use different algorithms with various parameters for image processing, they all implement the process steps given as orientation, point cloud composition, and, as a result, triangulated mesh, orthophoto, and DEM production. Except, when SURE software is preferred, image alignment should be performed outside the tool (Aicardi et al., 2016).

In photogrammetry, image triangulation is an initial image processing step for extracting interior and exterior features used to orient images. Image correspondences (dense matching) are needed to begin this step. These types of correspondences (i.e., tie points) can be manually or automatically extracted. This process begins with point or feature extraction in the study area. Correspondences are discovered by using the descriptor values or grayscale values of the different combinations (comparisons) of the images in a search window. Feature-Based Matching (FBM) and Area-Based Matching (ABM) are two different approaches in feature matching. ABM is advantageous in precision sensitivity but requires a texture, on the other hand, FBM is generally the first choice in the first step of photogrammetry by generating automatic tie points, resulting in a sparse cloud. This sparse cloud is enough for dense matching. Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) algorithm (Lowe, 2004) and the SURF (Chiabrando et al., 2015) algorithms are scale invariant FBM algorithms for descriptor extraction. Semi-global matching (SGM) (Hirschmuller, 2005) is an example of an ABM type algorithm that uses local or global methods in a search window by using the energy minimisation approach. (Remondino et al., 2012, Murtiyoso and Grussenmeyer, 2017). Subsequently, robust outlier detection is performed by using algorithms like RANSAC, MAPSAC, LMedS etc. Finally, the image correspondence set for the entire block is obtained by organizing dual or triplet image correspondences clustered in tracks.

Bundle adjustment is the next step of photogrammetric step which starts by calculating the 3D coordinates of the correspondences as input. Bundle adjustment method (Chiabrando et al., 2015) is a 3D optimization method which estimates a 3D reconstruction model in optimal conditions by using camera parameters. Estimations are calculated by minimizing a cost function to extract the 3D model features and camera parameters. Also a reference coordinate system should be defined by giving a datum value for orientation and scale.

In this study, as seen in Figure 3, initially, camera calibration and image stabilization (triangulation) are performed to create a Digital Surface Model (DEM). Image stabilization requires the exact alignment and scale of the images with the ground. To achieve this, there are two approaches. First, Ground Control Points (GCP) can be stationed traditionally by surveying the study area and photographs of these point should be taken with an UAV. On the other hand using built-in Global

Navigation Satellite Systems (GNSS) sensors of an UAV to compliment image acquisition is another option. Photogrammetric softwares are used to expose the exif information embedded on the image data for registration. This approach doesn't provide an accurate output as GCP method (Federman et al., 2017). In this study GNSS option of the UAV is used for image triangulation. Images taken by UAV used as material and trial version of Agisoft Metashape software was used as 3D modeling software.

4. Results

In addition to the images obtained by nadir (vertical) photogrammetry, detailed images of the facades of the building are needed in order to create an accurate 3D model. Thus, in this study, Images taken with oblique photogrammetry were used to model these facades correctly in addition to the nadir images. Since the RTK module is installed on the UAV used in this experiment, only 5 ground control points (GCPs) were placed to the study area and their central coordinates were determined with a GNSS receiver. Root Mean Square Errors (RMSEs) in X, Y, Z coordinates were calculated based on the GCPs and corresponding model coordinates. The RMSEs for X, Y, Z coordinates were calculated 0.019m, 0.025m, and 0.033m, respectively. The orthophoto and DEM data of Kurtkulağı Caravanserai produced after the processing of the UAV data with the methodology used in Figure 3 are shown in Figures 6 and 7, respectively.



Figure 6. Orthophoto of the study area produced with the UAV data.

As the final product, the general view of the 3D model of the caravanserai is presented in Figure 8. In addition, screenshots of the 3D model taken from all sides of the building are given in Figure 9. As visual interpretation, the 3D model, which was generated using UAV images, provided satisfactory results compared to the real one.

By extracting metric information from the 3D models obtained from the images taken with real coordinates, it becomes very easy to restore the structure in case of a possible destruction. Considering the restoration, having a 3D model built ahead of time can be a great resource for ensuring a precise and successful intervention. The value of constructing 3D models is widely accepted for the extraction of metric and geometric information, which are essential for reconstruction of relief objects from the drawings. Figure 10 shows some metric information taken from the 3D model. The metric differences between the 3D model and ground measurements varied from 2mm to 8mm.

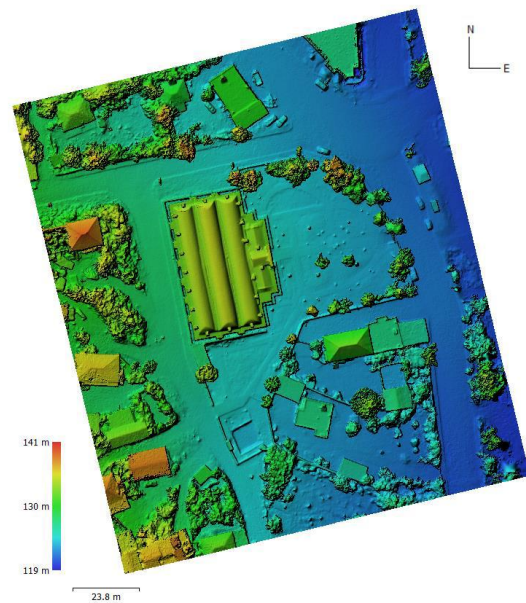


Figure 7. DEM produced with the UAV data for the study area.



Figure 8. General view of the study area and the 3D model of the caravanserai.



Figure 9. Screenshot examples for all facades from the 3D model of the caravanserai.



Figure 10. The metric information of some building elements taken from the 3D model of the caravanserai.

5. Conclusion

The aim of this study was to model Kurtkulağı Caravanserai in 3D using UAV and photogrammetric techniques for the protection, documentation, and restoration of this historical and cultural heritage in case of damage. In this context, the Kurtkulağı Caravanserai was modeled in 3D using the images taken from the UAV (provided with the project budget) and photogrammetric techniques. In the study area, firstly, UAV flight was planned, and after the flight, in total 672 overlapping images of the caravanserai were taken from various perspectives. Some of the images were taken with nadir, and some of them with oblique photogrammetry. Orthophoto, DEM, and 3D models were produced on the images by applying the processing steps specified in the 3D modeling method section. Images obtained from the UAV with real coordinates provide great convenience in the production of 3D models. In this way, 3D model production with real coordinates and therefore metric information is possible without the need for a ground control point. 3D modeling and documentation of the historical and cultural heritage provide great convenience for the restoration of the building in case of possible destruction due to a natural disaster or other events.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards. This article was presented as an oral presentation at the event called "9th International IFS and Contemporary Mathematics and Engineering Conference" held in Tarsus/Türkiye between 08-11 July 2023. The abstract of the study was published with the title of "The Use of Unmanned Aerial Vehicles in the 3D Documentation of Historical Cultural Heritage: The Case of Ceyhan Kurtkulagi Caravanserai in the conference abstract book. This is an improved version of the paper.

Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, investigation, methodology and software, visualization and writing – original draft, review and editing.
Author-2: Project Management, Experiment Design, Conceptualization, investigation, methodology and software, supervision and writing – review and editing.

Declaration of Competing Interest

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

Data Availability Statement

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

Acknowledgement

This study is supported by Çukurova University Scientific Research Projects Coordination Unit under grant number: FBA-2020-12653.

6. References

Aicardi, I., Chiabrandò, F., Grasso, N., Lingua, A. M., Noardo, F., and Spanò, A., 2016. UAV photogrammetry

with oblique images: First analysis on data acquisition and processing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **41**, 835-842.

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-835-2016>
Barsanti, S. G., Remondino, F., Fernández-Palacios, B. J., and Visintini, D., 2014. Critical factors and guidelines for 3D surveying and modelling in Cultural Heritage. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, **3(1)**, 141-158.

<https://doi.org/10.1260/2047-4970.3.1.141>

Bay, H., Tuytelaars, T., and Van Gool, L., 2006. Surf: Speeded up robust features. In *Computer Vision—ECCV 2006: 9th European Conference on Computer Vision, Graz, Austria, May 7-13, 2006. Proceedings, Part I 9*, Springer Berlin Heidelberg. 404-417.

https://doi.org/10.1007/11744023_32

Chiabrandò, F., Donadio, E., and Rinaudo, F., 2015. SfM for orthophoto to generation: A winning approach for cultural heritage knowledge. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, **40**, 91-98.

<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-91-2015>

Eisenbeiß, H., 2009. *UAV photogrammetry* (Doctoral dissertation, ETH Zurich).

Erdoğan, A., KABADAYI, A., and AKIN, E. S., 2021. Kültürel mirasın fotogrametrik yöntemle 3B modellenmesi: Karabıyık Köprüsü Örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, **3(1)**, 23-27.

<https://doi.org/10.51534/tiha.911147>

Federman, A., Santana Quintero, M., Kretz, S., Gregg, J., Lengies, M., Ouimet, C., and Laliberte, J., 2017. UAV photogrammetric workflows: A best practice guideline. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42**, 237-244.

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-237-2017>

Grussenmeyer, P., Hanke, K., and Streilein, A., 2002. 4.1 ARCHITECTURAL PHOTOGRAMMETRY. *Digital photogrammetry*, 300.

Hirschmuller, H., 2005. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)* IEEE, **2**, 807-814.

<https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.56>

- Karachaliou, E., Georgiou, E., Psaltis, D., and Stylianidis, E., 2019. UAV for mapping historic buildings: From 3D modelling to BIM. *ISPRS–International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-397-2019>
- Korumaz, A. G., Korumaz, M., Tucci, G., Bonora, V., Niemeier, W., and Riedl, B., 2014. UAV systems for documentation of cultural heritage. In *ICONARCH I-International Congress of Architecture-Innovative Approaches in Architecture and Planning*, 419-430.
- Lowe, D. G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, **60(2)**, 91-110.
<https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Mahmod, A. A., and Yilmaz, H. M., 2018. Generating to Three Dimensional Models from Taken Photos in Vertical Position with Unmanned Aerial Vehicles: Aksaray University Campus Mosque. *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, **2(2)**, 144-160.
<https://doi.org/10.29002/asujse.387797>
- Murtiyoso, A., Koehl, M., Grussenmeyer, P., and Freville, T., 2017. Acquisition And Processing Protocols For Uav Images: 3d Modeling Of Historical Buildings Using Photogrammetry. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4.
<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-163-2017>
- Murtiyoso, A., and Grussenmeyer, P., 2017. Documentation of heritage buildings using close-range UAV images: dense matching issues, comparison and case studies. *The Photogrammetric Record*, **32(159)**, 206-229.
<https://doi.org/10.1111/phor.12197>
- Nex, F., and Remondino, F., 2014. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, **6(1)**, 1-15.
<https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Nony, N., Luca, L. D., Godet, A., Pierrot-Deseilligny, M., Remondino, F., Dongen, A. V., and Vincitore, M., 2012. Protocols and assisted tools for effective image-based modeling of architectural elements. In *Euro-Mediterranean Conference*, Springer, Berlin, Heidelberg, 432-439
https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_44
- Pierrot-Deseilligny, M., De Luca, L., and Remondino, F., 2011. Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D Modeling and orthoimage. *Journal of Geoinformatics FCE CTU*, **6(1)**, <http://geoinformatics.https://doi.org/10.14311/gi.6.36>
- Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T. P., and Troisi, S., 2012. Low-cost and open-source solutions for automated image orientation–A critical overview. In *Euro-Mediterranean Conference*, Springer, Berlin, Heidelberg, 40-54
https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_5
- Şenol, H. İ., Yiğit, A. Y., Kaya, Y. and Ulvi, A., 2021. İHA ve yersel fotogrametrik veri füzyonu ile kültürel mirasın 3 boyutlu (3B) modelleme uygulaması: Kanlıdivane Örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, **3(1)**, 29-36.
<https://doi.org/10.53030/tufod.935920>
- Yakar, M., Toprak, A. S., Ulvi, A., and Uysal, M., 2015. Konya Beyşehir Bezariye Hanının (Bedesten) İha İle Fotogrametrik Teknik Kullanılarak Üç Boyutlu Modellenmesi. *Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 25 28 Mart 2015, Ankara.
<https://doi.org/10.29128/geomatik.322901>

Beacon Tabanlı Mesafe Bilgisinin Ortam Şartlarına Göre Belirlenerek Üçgenleme Algoritmasıyla Test Edilmesi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 10.11.2023

Kabul/Accepted: 12.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Determining Beacon-Based Distance Information According to Environmental Conditions and Testing with the Trilateration Algorithm

Recep ÇAKIR^{1*} , Serkan DOĞANALP² 

¹ Pamukkale Üniversitesi, Çameli Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Denizli, Türkiye

² Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bluetooth teknolojisi son yıllardaki gelişimiyle oldukça kullanışlı hale gelmiştir. Özellikle Bluetooth Low Energy (BLE) bu alandaki en önemli gelişmelerden bir tanesidir. Daha az enerjiyle daha uzun süreli kaliteli veri alışverişi BLE'nin temel özelliğidir. BLE alt yapısı sağlık, spor, araç içi cihazlar, akıllı ev, pazarlama ve daha birçok alanda kullanılan elektronik cihazlarda bulunmaktadır. BLE alt yapısını kullanan Beacon teknolojisi de bu cihazlardan biridir. Beacon teknolojisi BLE alt yapısına sahip kullanıcıya tek taraflı veri ileten, diğer akıllı cihazlarla etkileşime giren basit, küçük, kablosuz cihazlardır. Bu teknoloji konum bilgisi ile de bütünleşik halde kullanılabilir. Beacon teknolojisinin konum bazlı kullanımında proximity (yakınlık), fingerprint (parmak izi), trilateration (üçgenleme) başta olmak birçok konumlandırma algoritması geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Beacon teknolojisinin konum bazlı kullanımında Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafenin sağlıklı bir şekilde belirlenmesi gerekir. Beacon teknolojisinde bu bilgi üretici firma tarafından kullanıcılara standart bir değer olarak sunulmakla birlikte kullanıcı bu mesafeyi ortam şartlarına göre de belirleyebilmektedir. Bu çalışmada Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafenin ortam şartlarına göre belirlenmesi amacıyla 6 farklı test planı gerçekleştirilmiştir. Testler 3x3 m'den 8x8 m'ye kare yerleşim planlarına göre yapılmıştır. Belirlenen mesafe bilgisi ile üçgenleme algoritmasının Beacon tabanlı kullanılabilirliği de bu test planları kullanılarak araştırılmıştır. Testler üçgenleme algoritması için en uygun Beacon saha yerleşimi baz alınarak yapılmıştır. Yapılan testlerin genelinde ortam şartlarına göre belirlenen mesafe bilgisi, üretici firma tarafından kullanıcılara sunulan standart mesafe bilgisinden daha iyi sonuç vermiştir. Üçgenleme algoritmasının Beacon tabanlı kullanımı için ise genel anlamda üretici firma tarafından sağlanan mesafe bilgisi daha iyi sonuç vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Beacon, BLE, Üçgenleme, RSSI.

Abstract

Bluetooth technology has become very useful with its development in recent years. In particular, Bluetooth Low Energy (BLE) is one of the most important developments in this field. Longer quality data exchange with less energy is the main feature of BLE. BLE infrastructure is found in electronic devices used in health, sports, in-car devices, smart home, marketing and many other areas. Beacon technology, which uses the BLE infrastructure, is one of these devices. Beacon technology is a simple, small, wireless device with BLE infrastructure that transmits one-sided data to the user and interacts with other smart devices. In the location-based use of beacon technology, many positioning algorithms, especially proximity, fingerprint and trilateration, are developed and used. In location-based use of Beacon technology, the distance between the Beacon and the user must be determined accurately. In Beacon technology, this information is presented to users as a standard value by the manufacturer, but the user can also determine this distance according to environmental conditions. In this study, 6 different test plans were carried out to determine the distance between the Beacon and the user according to environmental conditions. The tests were carried out according to square layout plans from 3x3 m to 8x8 m. The beacon-based usability of the trilateration algorithm with the determined distance information was also investigated using these test plans. The tests were performed based on the most appropriate Beacon field placement for the trilateration algorithm. In most of the tests performed, the distance information determined according to the environmental conditions gave better results than the standard distance information provided to the users by the manufacturer. For Beacon-based use of the trilateration algorithm, the distance information provided by the manufacturer generally gave better results.

Keywords: Beacon, BLE, Trilateration, RSSI.

1. Giriş

Çağımızda teknoloji hızlı bir şekilde gelişimini sürdürmektedir. Bu gelişimin bir parçası olan Bluetooth teknolojisi de insanların birçok alanda faydalandığı bir teknoloji olmakla birlikte Bluetooth kavramı farklı alanlardaki cihazları kablosuz olarak birbirine bağlama

düşüncesiyle ortaya çıkmıştır. 1994 yılında Ericsson firması tarafından teknolojik cihazları birbirine bağlamak ve veri aktarmak için kullanılan kabloları değiştirmek için başlatılan çalışmanın ürünü olarak orijinal Bluetooth konsepti sunulmuştur. Böyle bir çalışmaya cevap verebilecek geniş bir pazar olması ve farklı üreticiler

tarafından üretilen cihazlarında bu teknolojiden yararlanma durumu bu alana ilgi duyan birçok şirketi bir araya getirmiştir (Andrew 2022). Bu amaçla 1997 yılında Ericsson, IBM, Nokia, Intel ve Toshiba şirketleri tarafından küresel anlamda kısa menzilli kablosuz iletişime çözüm geliştirmek ve teşvik etmek amacıyla Bluetooth Special Industry Group (SIG) kurulmuştur (Andrew 2022, Bisdikian 2001). Klasik anlamda Bluetooth teknolojisi ilerleyen yıllarda birçok alanda kullanılarak gelişimini sürdürmüş ve 2010 yılında SIG tarafından Bluetooth 4.0 versiyonu piyasaya sürülmüştür. Bu versiyonun alt yapısını oluşturan Bluetooth Low Energy (BLE), bu alandaki en önemli adımlardan biridir. Klasik Bluetooth yapısının aksine kontrol ve izleme uygulamalarıyla birlikte kısa mesafeli iletişim için az enerji tüketimini amaçlayan kablosuz bir teknolojidir (Gomez vd. 2012). Beacon teknolojisi de BLE alt yapısını kullanan bir teknoloji olup boyut olarak küçük, bir düğme ile açılıp kapatılabilen, pil, batarya veya harici bir güç kaynağı ile çalışabilen, düşük güç tüketen cihazlardır (Kohne ve Sieck 2014, Sieckinen vd. 2012). Günümüzde Beacon teknolojisi reklam, tanıtım, navigasyon başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır.

Bir Beacon'ın aktif hale getirip kullanmak için Universally Unique Identifier (UUID), Major, Minor, Measured Power (MPower) ve Received Signal Strength Indicator (RSSI) değerini bilmek veya düzenlemek gereklidir. UUID değeri, her bir Beacon'ı tanımlamak için kullanılan 128 bitlik kimlik numarasıdır. Major değeri, oluşturulan bir Beacon ağında belirli bir grubu tanımlamak için kullanılan 16 bit değerinde işaretli bir tam sayıdır. Minor değeri, Beacon ağında oluşturulan belirli bir grup içindeki Beacon'ları ayırt etmek için kullanılan 16 bit değerinde işaretli bir tam sayıdır. MPower değeri, Beacon üreticisi firma tarafından belirlenen sabit bir değer olup ve bir metrelik mesafe için beklenen RSSI değerini tanımlamaktadır. RSSI, alınan sinyalin gücündeki değişimi ifade etmek için kullanılır. Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafe bu güç değişiminden yola çıkılarak hesaplanabilir (Kohne ve Sieck 2014, Allurwar vd. 2016, Gülağız vd. 2016).

Beacon için tanımlanan bu değerler, Beacon yazılım kütüphaneleri aracılığıyla görüntülenip kullanılabilir. Beacon üreticisi firma tarafından kullanıcı ile Beacon arasındaki mesafeyi belirlemek için MPower değeri standart halde kullanıcılara sunulur. Birçok yazılımda TxPower (Transmission Power) şeklinde de karşılaşılabılır. Kullanıcılar Beacon üreticisi firma tarafından standart halde sunulan MPower değerini, Beacon tabanlı mesafe bilgisine ihtiyaç duyulacak projelerde; projenin ortam şartlarına göre de belirleyebilir. Standart bir MPower/Tx

Power (-77 dBm) değerine sahip Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafeyi gösteren Beacon veri iletişim değerleri Şekil 1' de gösterilmiştir.



1,58 m			
UUID			
dffe3628-9b17-4c62-b61f-b06ebc61f3af			
Major	Minor	RSSI	TX
50586	31677	-91 dBm	-77 dBm

Şekil 1. Üretici firma tarafından kullanıcıya sunulan değerler

Beacon teknolojisinden konum bazlı yararlanmak için fingerprint (parmak izi), trilateration (üçgenleme), proximity (yakınlık) veya bu algoritmaların geliştirilmiş versiyonları başta olmak üzere birçok algoritma kullanılmaktadır. Bu algoritmaların kullanımında Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafenin veya Beacon'lardan yayılan Bluetooth sinyallerinin gücündeki değişimin bilinmesi gerekir. Beacon teknolojinin konum bazlı kullanılabilirliği ile ilgili birçok çalışma mevcuttur.

Anagnostopoulos ve Deriaz (2014) yaptıkları çalışmada, hastane içinde Beacon tabanlı konum belirlemişlerdir. Çalışmalarında konumlandırma için ağırlıklı ortalama yöntemini kullanmışlardır. Konumlandırma hassasiyetini artırmak için en yakın Beacon'ların seçimi ile birlikte RSSI değerlerinin ortalamasının alınmasını önermişlerdir. Blasio vd. (2017) yaptıkları çalışmada, Beacon teknolojisi ile Wi-Fi teknolojisinin konum bazlı performanslarını bilgi hizmetleriyle kullanılabilmesi amacıyla incelemişlerdir. Çalışmalarında konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmışlardır. Brena vd. (2017) yaptıkları çalışmada, kapalı alan konumlandırmada kullanılabilen Beacon, Wi-Fi, Ultra Geniş Bant (Ultra Wide Band, UWB), Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID, Radio Frequency Identification) gibi teknolojileri sınıflandırarak birçok yönden kullanılabilirlikleri ile ilgili öneriler sunmuşlardır. Eroğlu ve Doğan (2019) yaptıkları çalışmada, Beacon tabanlı kapalı alanda navigasyon uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak üçgenleme yöntemini kullanmışlardır. Gao vd. (2022) yaptıkları çalışmada, okyanus taşımacılığında çok önemli bir yere sahip olan gemi içerisindeki mürettebatın takibi ve gemi güvenliği için Beacon tabanlı iç mekan konumlandırma çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında konumlandırma algoritması olarak parmak izi algoritmasını kullanmışlardır. Khudhair vd. (2016) yaptıkları çalışmada, mevcut kapalı alan konumlandırma tekniklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında Beacon, Wi-Fi, ZigBee gibi teknolojileri kapalı alanlarda konum belirleme

amaçlı kullanılabilirlikleri ile birlikte incelemiştir. Sümer vd. (2020) yaptıkları çalışmada, kapalı alanda üçgenleme algoritması kullanarak BLE alt yapısıyla konum belirlemiştir. Çalışmalarında RSSI değerlerinin doğruluğunu arttırmak için birçok farklı filtre yöntemi kullanmışlardır. Uttraphan vd. (2020) yaptıkları çalışmada, kapalı alanda Beacon tabanlı navigasyon uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmışlardır. Wang vd. (2013) yaptıkları çalışmada, RSSI tabanlı Bluetooth konumlandırmayı üç mesafeye dayalı farklı üç yöntemi karşılaştırarak incelemiştir. Beacon tabanlı yapılan bu çalışmalarda konum bazlı elde edilen veriler genel olarak 2 boyutlu değerlendirilmekte, yükseklik boyutu ile ilgili bilgiler verilmemekte veya ihmal edilmektedir. Bu çalışmada Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafenin ortam şartlarına göre belirlenmesi ve üretici firma tarafından kullanıcıya sunulan standart mesafe bilgisiyle karşılaştırılması yapılmıştır. Her iki durumda belirlenen Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafenin üçgenleme algoritması özelinde kullanılabilirliği farklı Beacon konum varyasyonlarıyla test edilmiştir. Ayrıca verilerin değerlendirilmesinde birçok çalışmanın aksine yükseklik boyutu dikkate alınmış ve sonuçları çizelgelere yansıtılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma alanı

Bu çalışmada gerçekleştirilen testler kapalı alan özelliklerini kısmen taşıyan ve yapılan testler için yeterli büyüklüğe sahip bir alanda gerçekleştirilmiştir. Test alanının büyüklüğü 345.00 m² ve tavan yüksekliği 2.60 m'dir (Şekil 2).

2.2. Kullanılan Beacon cihazı

Dünyada Beacon üreticileri tarafından farklı boyut ve özelliklerde Beacon cihazları üretilmektedir. Bu çalışmada Kontakt.io firmasının piyasaya sürdüğü Bluetooth 4.2 ve

5.0 uyumlu Asset Tag Beacon cihazları kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. Uygulama alanı



Şekil 3. Beacon cihazı

2.3. RSSI-mesafe ilişkisi

Beacon'lardan yayılan Bluetooth sinyallerinin gücündeki değişimden yararlanılarak Beacon'la kullanıcı arasındaki mesafe belirlenebilmektedir. Bu durum yol kayıp modelleri ile ifade edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan Log-Distance yol kaybı modeli Eşitlik (1)'de gösterilmiştir (Ilci vd. 2015, Sümer vd. 2020, Wang vd. 2013).

$$d_i = 10^{\frac{r_0 - r_i}{10n}} \quad (1)$$

Burada d_i alıcı ile verici arasındaki mesafeyi, r_i anlık algılanan RSSI değerini, r_0 1 m mesafe için hesaplanan RSSI değerini, n ise çevre şartlarına bağlı yol kaybı katsayısıdır. Bu çalışmada r_0 ve n ortam şartlarına göre hesaplanmıştır. r_0 ve n değerini hassas belirlemek adına çalışma sahasının farklı bölgelerinde kullanıcı ile Beacon arası 1 m mesafeden 10 m'ye kadar toplamda 10 adet referans uzaklığı kullanılarak ve her bir referans uzaklığı için 10 adet RSSI okuması yapılmıştır. RSSI okuma değerleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. r_0 ve n değerini belirlemek için Beacon okuma değerleri

Referans Uzaklık	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m
	-70	-82	-82	-84	-86	-92	-94	-94	-93	-95
	-71	-79	-84	-81	-89	-91	-90	-91	-95	-99
	-72	-80	-82	-85	-92	-87	-91	-93	-95	-96
RSSI Okuma Değerleri (dBm)	-69	-78	-80	-83	-87	-87	-89	-91	-96	-95
	-68	-77	-83	-87	-91	-88	-91	-95	-98	-94
	-74	-77	-81	-81	-92	-88	-90	-92	-95	-95
	-70	-81	-84	-82	-89	-91	-93	-95	-96	-98
	-67	-80	-83	-81	-86	-90	-90	-93	-94	-97
	-71	-76	-81	-86	-85	-93	-91	-93	-96	-97
	-75	-80	-85	-84	-92	-94	-91	-94	-94	-95
Ortalama	-70.7	-79	-82.5	-83.4	-88.9	-90.1	-91	-93.1	-95.2	-96.1

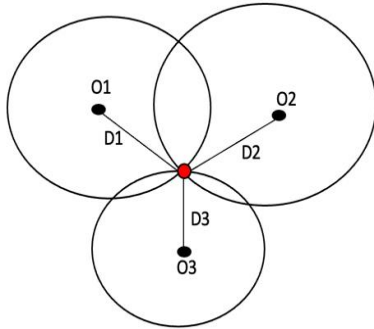
1 m referans uzaklığında yapılan ölçülerin ortalaması alınarak r_0 değeri, -70.7 dBm belirlenmiştir. n değerinin belirlenmesi ise referans uzaklıklarında yapılan RSSI okumalarının ortalaması, karesel ortalama hata (minimum mean square error (MMSE)) ile değerlendirilerek olmuştur. Eşitlik 2'den

$$MMSE = \frac{dMSE}{dn} = \frac{d(521.16n^2 - 2595.12 + 3236.28)}{dn} \quad (2)$$

n değeri 2.49 olarak hesaplanır.

2.4. Üçgenleme yöntemi

Üçgenleme yöntemi en basit ve en yaygın kullanılan konumlandırma algoritmalarından biridir (Ilci vd. 2018). Basit hesaplama altyapısına sahip olmasıyla birlikte düşük maliyetli olması bu konumlandırma algoritmasının avantajı olarak göze çarpmaktadır (Ainul 2022). Bu konumlandırma tekniğinde konumu belirli olan üç Beacon vericisinin hedef noktaya olan mesafelerinden yararlanılarak hedef noktanın konumu hesaplanır. Beacon vericisi ile hedef nokta arasındaki mesafe RSSI sinyallerinin gücündeki değişimden hesaplanır (Wang vd. 2013, Khudhair vd. 2016).



Şekil 4. Üçgenleme yöntemi

Hedef noktanın konumu Şekil 4'te gösterilmiştir. O_1, O_2, O_3 referans noktalarındaki üç Beacon'ın vericisinin konumu $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ ve konumu x, y olan hedef nokta ile referans noktaları arasındaki uzaklıklar D_1, D_2, D_3 olmak üzere aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hedef noktanın konumu hesaplanır.

$$D_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \quad (3)$$

$$D_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \quad (4)$$

$$D_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \quad (5)$$

Eşitlik (3), (4) ve (5) basitleştirilirse x ve y 'nin koordinatları Eşitlik (6) ve (7) ile elde edilir.

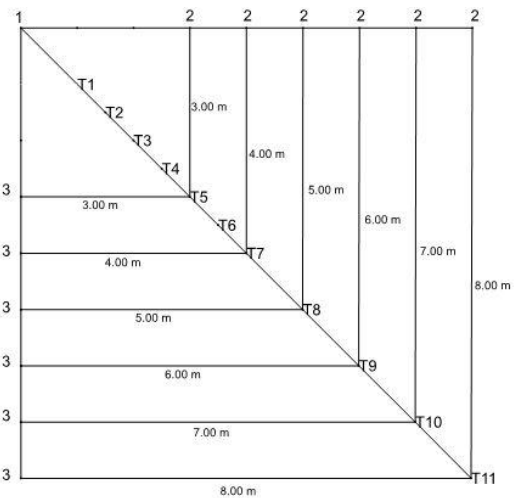
$$x = \frac{CE - FB}{EA - BD} \quad (6)$$

$$y = \frac{CD - AF}{BD - AE} \quad (7)$$

Eşitlik 6 ve 7' de $A = (-2x_1 + 2x_2)$, $B = (-2y_1 + 2y_2)$, $C = (D_1^2 - D_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2)$, $D = (-2x_2 + 2x_3)$, $E = (-2y_2 + 2y_3)$ ve $F = (r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2)$ temsil etmektedir (Manzoni vd. 2019, Magsi vd. 2023). Teorik olarak üçgenleme yönteminde üç Beacon vericisinin bir noktada kesiştiği kabul edilir. Bluetooth sinyallerinin ortam şartlarına bağımlı olması RSSI değerlerindeki düzensizliklere neden olabilmektedir. Dolayısıyla üç Beacon vericisinin bir noktada kesişmesi pratikte çok mümkün olmamaktadır. Bu çalışmada Beacon tabanlı üçgenleme yöntemini etkin bir şekilde kullanımını araştırmak için testler gerçekleştirilmiştir.

2.5. Test aşaması

Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafe ilişkisini daha iyi anlamak ve üçgenleme algoritmasının verimli bir şekilde kullanımını araştırmak adına testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, 4 adet Beacon test alanına kare şeklinde farklı kombinasyonlarda yerleştirilmiştir. Bu kombinasyonlar 3×3 m'den 8×8 m'ye kadar toplam 6 adettir. Karenin üç köşesindeki Beacon'lar 1, 2, 3 nolu Beacon'dan oluşmaktadır. Karenin dördüncü köşesindeki Beacon aynı zamanda bir başka kombinasyonun test noktası olduğundan test planında "T" ile gösterilmektedir. Her bir kombinasyonda 3 adet test noktası belirlenmiştir. 1. nokta karenin bir köşesine yakın, 2. nokta karenin tam ortasında, 3. noktada karenin dışında ve karenin bir köşesine yakın seçilmiştir. Örneğin 4×4 m'lik bir test planında köşelerdeki Beacon'lar 1, 2, 3 ve T7; test noktaları ise T1, T3 ve T8 iken 5×5 m'lik bir test planında köşelerdeki Beacon'lar 1, 2, 3 ve T8; test noktaları ise T1, T4 ve T9'dur (Şekil 5).



Şekil 5. Üçgenleme test planı

T12

Test noktalarında alınan her bir ölçünün hassasiyetini artırmak adına test noktalarına lazer metre ile düzleştirme yapılmıştır. Bu işlem tavanda 260 cm yükseklikte asılı bulunan Beacon'lerden zeminde ölçü alınırken (sinyal) test noktasının tam üzerinde ölçü alınmasını sağlamak amacıyla yapılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. 4x4 m Beacon konumları ve test noktası

Zeminde ölçü alma işlemi ise akıllı bir mobil telefonla, test noktasından 115 cm yükseklikte yapılmıştır. Her bir noktada 5 adet ölçü alınmış ve bu ölçülerin ortalamaları alınarak bu çalışmada değerlendirilmiştir. 5'ten daha az ölçü sayısına sahip oturumlar değerlendirilmeye alınmamıştır. Üçgenleme algoritması için yapılan testlerde ise algoritmanın matematiksel alt yapısının gereği olarak en iyi ortalamaya sahip üç Beacon sinyal değeri çalışmada değerlendirilmiştir.

2.6 Verilerin değerlendirilmesi

Test aşamasında elde edilen veriler iki nokta arası uzaklık prensibine göre değerlendirilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken durum, nokta konumunun 3 boyutlu değerlendirilmesidir. Çalışmada iki nokta arası gerçek mesafe Eşitlik (8) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \quad (8)$$

Eşitlik 8'e göre S iki nokta arası uzaklık, x_1, y_1, z_1 1. noktanın koordinatları, x_2, y_2, z_2 2. noktanın koordinatlarıdır. Hesaplamalarda $z_2 - z_1$ değeri tavan yüksekliği ile zeminde ölçü alan kullanıcı arasındaki sabit yükseklik farkından dolayı 1.45 m olarak alınmıştır.

3. Bulgular

Yapılan test sonuçları çizelgelerde gösterilmiştir. Genel veri çizelgelerinde; Beacon konumları (BK), Beacon'lerden gelen sinyallerin RSSI değerlerinin ortalaması (Ort.RSSI), test noktası (TN), test noktasının Beacon'a uzaklığı (TU), Beacon üreticisi firma tarafından sağlanan standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisi (SM), ortam

şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisi (HM), standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin gerçek mesafe değeri ile farkı (SMF) ve hesaplanan mesafe bilgisi ile gerçek mesafenin farkı (HMF) yer almaktadır.

Üçgenleme algoritması için hazırlanan çizelgelerde; kullanılan Beacon'lar (KB), test noktası (TN), Beacon üreticisi firma tarafından sağlanan standart değerle hesaplanan konumun gerçek konuma uzaklığı (SU) ve ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı değerle hesaplanan konumun gerçek konuma uzaklığı (HU) yer almaktadır. Beacon'lerden gelen RSSI sinyallerinin değişimlerini gösteren çizelgede; Beacon konumları (BK) ve test noktası (TN) ile birlikte ek olarak Beacon dizilimleri (BD) ve RSSI değerlerinin standart sapması (SS) eklenmiştir. 1. test, 3x3 m yerleştirilen Beacon'lerden alınan sinyaller ile gerçekleştirilmiştir. Beacon'ların tamamından sinyal alınmış ve Çizelge 2 ve 3'te test sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 2. 3x3 m test sonuçları

BK	Ort. RSSI (dBm)	TN	TU (m)	SM (m)	HM (m)	SMF (m)	HMF (m)
1	-67.60	T1	2.03	0.28	0.76	1.75	1.26
2	-84.00	T1	2.66	1.92	3.52	0.74	0.86
3	-79.00	T1	2.66	1.21	2.18	1.46	0.49
T5	-95.60	T1	3.17	4.94	10.17	1.77	7.00
1	-70.60	T2	2.56	0.50	1.08	2.06	1.49
2	-77.80	T2	2.56	1.08	1.97	1.49	0.60
3	-80.00	T2	2.56	1.45	2.70	1.12	0.13
T5	-85.40	T2	2.56	2.18	4.06	0.39	1.49
1	-80.80	T7	5.84	1.50	2.74	4.34	3.10
2	-82.60	T7	4.37	1.88	3.54	2.49	0.83
3	-88.00	T7	4.37	2.72	5.19	1.65	0.81
T5	-64.00	T7	2.03	0.16	0.54	1.87	1.49

Çizelge 2 için test sonuçları incelendiğinde genel anlamda ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin üretici firma tarafından sağlanan standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu görülmektedir. Standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin daha iyi olduğu değerler incelendiğinde ise RSSI değerinin -85 dBm'e yakın olduğu değerlerle (-84 dBm, -85.40 dBm) birlikte -95 dBm değerinin üstünde olan değer olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. 3x3 m üçgenleme algoritmasının sonuçları

KB	TN	SU (m)	HU (m)
1,2,3	T1	0.29	1.49
1,2,3	T2	0.34	1.11
1,2,T5	T7	3.30	2.79

Çizelge 3 için test sonuçları incelendiğinde üçgenleme algoritması için hazırlanan 3x3 m test planına göre karenin içerisindeki test noktalarında standart değerler ile elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlar, ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlara göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Karenin dışında kalan test noktasında ise ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermektedir.

2. test, 4x4 m yerleştirilen Beacon'lerden alınan sinyaller ile gerçekleştirilmiştir. Beacon'ların tamamından sinyal alınmış ve Çizelge 4 ve 5'te test sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4. 4x4 m test sonuçları

BK	Ort. RSSI (dBm)	TN	TU (m)	SM (m)	HM (m)	SMF (m)	HMF (m)
1	-63.60	T1	2.03	0.17	0.55	1.86	1.48
2	-87.60	T1	3.48	2.69	5.15	0.79	1.67
3	-80.20	T1	3.48	1.35	2.41	2.13	1.07
T7	-95.80	T1	4.48	5.01	10.47	0.53	5.99
1	-68.20	T3	3.18	0.31	0.81	2.87	2.36
2	-88.40	T3	3.18	2.88	5.53	0.31	2.35
3	-70.60	T3	3.18	0.43	1.01	2.74	2.17
T7	-89.00	T3	3.18	2.95	5.67	0.23	2.48
1	-83.20	T8	7.22	1.75	3.20	5.46	4.02
2	-89.00	T8	5.30	2.89	5.50	2.41	0.20
3	-75.80	T8	5.30	0.90	1.74	4.40	3.57
T7	-71.80	T8	2.03	0.53	1.14	1.49	0.88

Çizelge 4 için test sonuçları incelendiğinde genel anlamda ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin üretici firma tarafından sağlanan standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu görülmektedir. Standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin daha iyi olduğu değerler incelendiğinde ise tamamının, RSSI değerinin -87 dBm değerinin üstünde olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. 4x4 m üçgenleme algoritmasının sonuçları

KB	TN	SU (m)	HU (m)
1,2,3	T1	0.78	2.30
1,2,3	T3	1.01	3.74
1,3,T7	T8	4.00	3.49

Çizelge 5 için test sonuçları incelendiğine üçgenleme algoritması için hazırlanan 4x4 m test planına göre karenin içerisindeki test noktalarında standart değerler ile elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlar, ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlara göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Karenin dışında kalan test noktasında ise ortam şartlarına

göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermektedir.

3. test, 5x5 m yerleştirilen Beacon'lerden alınan sinyaller ile gerçekleştirilmiştir. Beacon'ların tamamından ilk defa bu testte sinyal alınamamıştır. Test sonuçları Çizelge 6 ve 7'de gösterilmiştir.

Çizelge 6. 5x5 m test sonuçları

BK	Ort. RSSI (dBm)	TN	TU (m)	SM (m)	HM (m)	SMF (m)	HMF (m)
1	-75.60	T1	2.03	0.92	1.79	1.10	0.23
2	-87.80	T1	4.38	2.73	5.20	1.65	0.82
3	-93.80	T1	4.38	4.30	8.67	0.07	4.30
T8	-93.20	T1	5.85	4.07	8.12	1.77	2.28
1	-77.20	T4	3.83	1.02	1.83	2.79	1.99
2	-79.80	T4	3.83	1.34	2.45	2.49	1.38
3	---	T4	3.83	---	---	---	---
T8	-95.20	T4	3.83	4.74	9.66	0.91	5.83
1	-80.20	T9	8.60	1.46	2.43	7.28	6.17
2	-92.80	T9	6.08	3.95	7.84	2.13	1.76
3	-89.80	T9	6.24	3.17	6.15	3.07	0.09
T8	-62.20	T9	2.02	0.12	0.46	1.90	1.56

Çizelge 6 için test sonuçları incelendiğinde genel anlamda ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin üretici firma tarafından sağlanan standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu görülmektedir. Standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin daha iyi olduğu değerler incelendiğinde ise tamamının, RSSI değerinin -93 dBm değerinin üstünde olan değerler olduğu görülmektedir.

Çizelge 7. 5x5 m üçgenleme algoritmasının sonuçları

KB	TN	SU (m)	HU (m)
1,2,T8	T1	1.03	2.55
1,2,T8	T2	16.67	8.73
1,3,T8	T3	4.98	6.70

Çizelge 7 için test sonuçları incelendiğine üçgenleme algoritması için hazırlanan 5x5 m test planına göre karenin ortasındaki test noktasında ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum, standart değerler ile elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı duruma göre daha iyi sonuç vermektedir. Geri kalan test noktalarında ise standart değerler ile elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlar daha iyi sonuç vermektedir.

4. test, 6x6 m yerleştirilen Beacon'lerden alınan sinyaller ile gerçekleştirilmiştir. Beacon'ların tamamından sinyal alınmış ve Çizelge 8 ve 9'da test sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 8. 6x6 m test sonuçları

BK	Ort. RSSI (dBm)	TN	TU (m)	SM (m)	HM (m)	SMF (m)	HMF (m)
1	-66.32	T4	3.81	0.17	0.56	3.52	3.25
2	-90.00	T4	4.55	3.15	6.08	1.40	1.53
3	-91.40	T4	5.10	3.51	6.85	1.59	1.75
T9	-93.00	T4	5.16	3.95	8.03	1.21	2.87
1	-74.00	T6	5.16	0.68	1.36	4.57	3.79
2	-85.80	T6	4.54	2.23	4.14	2.32	0.41
3	-96.40	T6	4.54	5.33	11.20	0.79	6.66
T9	-92.60	T6	3.81	3.86	7.64	0.05	3.82
1	-86.20	T11	11.39	2.48	4.74	7.09	6.65
2	-94.00	T11	8.36	4.37	8.84	3.99	0.48
3	-83.20	T11	8.36	1.76	3.21	6.60	5.15
T9	-66.80	T11	3.17	0.25	0.71	2.92	2.46

Çizelge 8 için test sonuçları incelendiğinde genel anlamda ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin üretici firma tarafından sağlanan standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu görülmektedir. Standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin daha iyi olduğu değerler incelendiğinde ise tamamının, RSSI değerinin -90 dBm değerinin üstünde olan değerler olduğu görülmektedir.

Çizelge 9. 6x6 m üçgenleme algoritmasının sonuçları

KB	TN	SU (m)	HU (m)
1,2,3	T1	0.40	4.23
1,2,T9	T2	1.60	4.33
1,3,T9	T3	8.57	5.77

Çizelge 9 için test sonuçları incelendiğine üçgenleme algoritması için hazırlanan 6x6 m test planına göre karenin içerisindeki test noktalarında standart değerler ile elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlar, ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlara göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Karenin dışında kalan test noktasında ise ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermektedir.

5. test, 7x7 m yerleştirilen Beacon'lardan alınan sinyaller ile gerçekleştirilmiştir. Beacon'ların tamamından sinyal alınamamıştır. Sinyal alınamayan Beacon sayısı ikiye ulaştığı anda üçgenleme algoritması için konum hesaplanamamıştır. Bu testin sonuçları Çizelge 10 ve 11'de gösterilmiştir. Çizelge 10 için test sonuçları incelendiğinde ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin üretici firma tarafından sağlanan standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu görülmektedir.

Çizelge 10. 7x7 m test sonuçları

BK	Ort. RSSI (dBm)	TN	TU (m)	SM (m)	HM (m)	SMF (m)	HMF (m)
1	-69.20	T4	3.81	0.35	0.88	3.46	2.93
2	---	T4	5.36	---	---	---	---
3	-91.40	T4	5.34	3.50	6.81	1.85	1.47
T10	---	T4	6.53	---	---	---	---
1	-76.20	T6	5.16	0.95	1.85	4.20	3.31
2	---	T6	5.16	---	---	---	---
3	-86.60	T6	5.16	2.41	4.53	2.75	0.62
T10	---	T6	5.16	---	---	---	---
1	-82.40	T11	11.39	1.63	2.96	9.76	8.43
2	-93.00	T11	8.18	4.11	8.29	4.07	0.11
3	-86.60	T11	8.18	2.47	4.68	5.71	3.50
T10	-70.60	T11	2.02	0.43	1.00	1.59	1.02

Çizelge 11. 7x7 m üçgenleme algoritmasının sonuçları

KB	TN	SU (m)	HU (m)
---	T1	---	---
---	T2	---	---
1,3,T10	T3	6.25	6.21

Çizelge 11 için test sonuçları incelendiğine üçgenleme algoritması için hazırlanan 7x7 m test planına göre karenin içerisindeki test noktalarında sadece iki Beacon'dan sinyal alınmasından dolayı konum hesaplanamamıştır. Karenin dışında kalan test noktasında ise ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermektedir. 6. test, 8x8 m yerleştirilen Beacon'lardan alınan sinyaller ile gerçekleştirilmiştir. Beacon'ların tamamından sinyal alınamamıştır. Bu testin sonuçları Çizelge 12 ve 13'te gösterilmiştir.

Çizelge 12. 8x8 m test sonuçları

BK	Ort. RSSI (dBm)	TN	TU (m)	SM (m)	HM (m)	SMF (m)	HMF (m)
1	-69.40	T4	3.81	0.36	0.89	3.45	2.93
2	---	T4	6.23	---	---	---	---
3	-89.20	T4	6.21	2.91	5.55	3.30	0.66
T11	-95.80	T4	7.91	5.00	10.32	2.90	2.42
1	-79.00	T7	5.84	1.23	2.23	4.61	3.60
2	---	T7	5.84	---	---	---	---
3	-86.60	T7	5.84	2.58	4.74	3.26	1.10
T11	-95.80	T7	5.84	5.04	10.44	0.79	4.61
1	-91.80	T12	12.81	3.62	7.10	9.19	5.71
2	-83.20	T12	9.17	1.78	3.25	7.39	5.92
3	---	T12	9.17	---	---	---	---
T11	-69.20	T12	2.04	0.35	0.88	1.68	1.16

Çizelge 12 için test sonuçları incelendiğinde genel anlamda ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin üretici firma tarafından sağlanan standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu görülmektedir. Standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin daha iyi olduğu değer incelendiğinde ise RSSI değerinin -95 dBm değerinin üstünde olan değer olduğu görülmektedir.

Çizelge 13. 8x8 m üçgenleme algoritmasının sonuçları

KB	TN	SU (m)	HU (m)
1,3,T11	T1	1.08	3.27
1,3,T11	T2	1.23	5.53
1,2,T11	T3	6.51	5.06

Çizelge 13 için test sonuçları incelendiğine üçgenleme algoritması için hazırlanan 8x8 m test planına göre karenin içerisindeki test noktalarında standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlar, ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlara göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Karenin dışında kalan test noktasında ise ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermektedir.

Çizelgeler genel olarak değerlendirildiğinde ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisi, üretici firma tarafından sağlanan standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi sonuç (HMF değerinin SMF değerinden küçük olduğu değerler) vermektedir.

Standart değerlerle hesaplanan mesafe bilgisinin daha iyi sonuç verdiği durumlara bakıldığında n değerinin hesaplanması için elde edilen verilerle ilişkili olduğu görülmektedir. Çizelge 1'de n değerinin hesaplanması için toplanan verilerde 4 m için -83.4 dBm, 5 m için ise -88.9 dBm değeri görülmektedir. Bu değerler arasındaki artış miktarı 1 m ile 2 m arasındaki farktan sonra en büyük artış miktarıdır. Testlerde 3 m ile 5.5 m arası hariç mesafe tahminlerinde ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisi için daha doğru sonuçlar elde edilirken, 3 m ile 5.5 m arası tahminlerde yanıltıcı sonuçlar elde edilebilmektedir. Standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin daha iyi sonuç verdiği durumların %75'i bu aralıktadır.

Test aşamasında fark edilen bir başka durum ise veri toplama sırasında kullanıcının da Beacon'ların RSSI hassasiyetini düşürdüğüdür. Kullanıcı test aşamasında mobil alıcıyı üç Beacon'ı görecektir şekilde tutarken arkasında kalan diğer Beacon'dan alınan RSSI sinyallerinin gücü düşmektedir. Bu durum Çizelge 2'de T7 noktasının testleri sırasında görülmektedir. Yakın Beacon'lardan

daha güçlü sinyal alınması gerekirken, bu durum gerçekleşmemiştir.

Çizelge 14. Beacon'lardan gelen sinyallerin RSSI değişimleri

BD	BK	SS	TN	BD	BK	SS	TN
(dBm)				(dBm)			
3x3	1	1.95	T1	6x6	1	2.77	T4
	2	2.92	T1		2	2.45	T4
	3	1.73	T1		3	1.67	T4
	T5	2.30	T1		T9	2.45	T4
	1	4.93	T2		1	1.22	T6
	2	2.39	T2		2	2.77	T6
	3	6.40	T2		3	3.36	T6
	T5	3.58	T2		T9	1.52	T6
	1	4.44	T7		1	5.85	T11
	2	6.88	T7		2	2.65	T11
	3	3.74	T7		3	1.79	T11
	T5	1.00	T7		T9	2.17	T11
4x4	1	3.78	T1	7x7	1	1.79	T4
	2	4.51	T1		2	--	T4
	3	0.84	T1		3	1.14	T4
	T7	2.86	T1		T10	--	T4
	1	2.28	T3		1	5.12	T6
	2	5.03	T3		2	--	T6
	3	2.19	T3		3	3.36	T6
	T7	3.67	T3		T10	--	T6
	1	1.30	T8		1	0.89	T11
	2	2.00	T8		2	3.81	T11
	3	4.76	T8		3	4.62	T11
	T7	3.03	T8		T10	1.34	T11
5x5	1	5.81	T1	8x8	1	0.89	T4
	2	4.55	T1		2	--	T4
	3	2.77	T1		3	0.84	T4
	T8	2.05	T1		T11	1.92	T4
	1	0.84	T4		1	3.39	T7
	2	4.09	T4		2	--	T7
	3	--	T4		3	5.03	T7
	T8	0.84	T4		T11	2.59	T7
	1	1.79	T9		1	1.64	T12
	2	2.17	T9		2	2.49	T12
	3	3.63	T9		3	--	T12
	T8	2.17	T9		T11	1.64	T12

Üçgenleme algoritmasının kullanımı için yapılan 18 test sonucu incelendiğinde 10 testte standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durum, 6 testte ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermektedir. 2 test ise yetersiz Beacon sinyali nedeniyle gerçekleştirilememiştir.

Beklenenin aksine standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumların genel anlamda daha iyi performans vermesinin nedeni olarak Beacon sinyallerinin RSSI değişimlerinin düzensiz olması ve bu nedenle üçgenleme algoritmasının hesaplama alt yapısı için homojen değerler elde edilememesi, Beacon'lerden alınan sinyallerin RSSI değerlerinin mesafe bazlı Beacon konumları ile örtüşmemesi gibi durumların olduğu düşünülmektedir. Çizelge 3'te yer alan veriler bu duruma örnek olarak gösterilebilir. 3×3 m Beacon yerleşiminde T2 test noktası karenin tam ortasında ve 4 Beacon'a da eşit mesafede olup 3 boyutlu konum bilgisine göre bu mesafe 2.56 m'dir. 1, 2 ve 3 konumunda bulunan Beacon'lar T5 konumunda bulunan Beacon'a göre daha güçlü Beacon sinyali gönderdikleri için üçgenleme algoritmasında değerlendirilmiştir. 1, 2 ve 3 konumunda bulunan Beacon'lar ile kullanıcı arasındaki mesafeler için ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum, standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı duruma göre daha iyi sonuç vermektedir. Ancak bu mesafeler üçgenleme algoritmasında 1, 2 ve 3 nolu Beacon konumlarıyla değerlendirildiğinde standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermektedir. Test noktalarına göre Beacon'lerden gelen sinyallerin RSSI değişimlerinin standart sapmaları Çizelge 14'te gösterilmiştir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada Beacon tabanlı mesafe bilgisinin ortam şartlarına göre hesaplanması ve üçgenleme algoritması özelinde kullanımı araştırılmıştır. Çalışma sonucunda ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin, standart değerlerle elde edilen mesafe bilgisinden genel olarak daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. Burada dikkat edilmesi gereken durum, n değerinin sağlıklı hesaplanabilmesi için sahada veri toplama aşamasında Beacon sinyal değerlerini olabildiğince yansıtabilen RSSI değerlerinin toplanmasıdır.

Verilerin değerlendirilmesinde dikkate alınan 3 boyutlu konum bilgisi, Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafenin doğru bir şekilde tahmin edilmesini direkt olarak etkilemektedir. Bu durum Beacon tabanlı yapılacak projelerde, Beacon vericisi ile kullanıcı arasındaki mesafe bilgisine bağlı olarak kullanılması planlanan konumlandırma algoritmalarının seçiminde göz önünde bulundurulmalıdır.

Beacon vericileri tarafından gönderilen sinyallerin gücündeki değişime bağlı olarak sinyalin hangi Beacon'dan geldiği mesafe bilgisine bağlı olarak tahmin edilebilir. Özellikle konumlandırma algoritmalarından

yakınlık algoritmasının temel prensibi olan bu durum, tanıtım amaçlı yapılan organizasyonlarda direkt olarak kullanılabilir. Dolayısıyla müze, sergi, fuar gibi tanıtım amaçlı projelerde; kapalı alanın büyüklüğü de göz önünde bulundurularak doğrudan standart değerlerle elde edilen Beacon tabanlı mesafe bilgisi kullanılabilir. Ancak kapalı alanın yeterli büyüklüğe sahip olmaması, tanıtım objelerinin veya alanlarının birbirine çok yakın olması, daha hassas mesafe bilgisine ihtiyaç duyulması gibi durumlar göz önüne alındığında ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanılması bu çalışmanın sonucu olarak önerilebilir.

Üçgenleme algoritmasının kullanımı için üretici firma tarafından sağlanan değerlerle hesaplanan mesafe bilgisinin tercih edilmesinin daha uygun olacağı bu çalışma ile belirlenen parametrelerden bir tanesidir. Ayrıca üçgenleme algoritmasının Beacon tabanlı kullanımında; Beacon'lar arası mesafenin 3-4 m'yi aşmayacak şekilde kullanılması üçgen bölgenin dışındaki noktalar hariç, en fazla 1.01 m hata payı ile konum tahmini yapılmasına olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla Beacon'lar arası mesafenin ve kapalı alanın tavan yüksekliğinin 4 m'yi aştığı Beacon dizilimlerinde, üçgenleme konumlandırma algoritmasının konum doğruluğunun düşeceği bu çalışmanın bir başka sonucu olarak söylenebilir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

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

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deneyleme, Biçimsel analiz, Doğrulama,
Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak,

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

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

5. Kaynaklar

Ainul, R.D., 2022. An enhanced trilateration algorithm for indoor RSSI based positioning system using zigbee protocol. *Jurnal Infotel*, **14**(4), 301-306.
<https://doi.org/10.20895/infotel.v14i4.822>

Allurwar, N., Nawale, B., and Patel, S.C., 2016. Beacon for Proximity Target Marketing. *International Journal of Engineering and Computer Science*, **15**(5), 16359-16364.

- <https://doi.org/10.18535/ijecs/v5i5.08>
- Anagnostopoulos, G. G., and Deriaz, M., (2014). *Accuracy enhancements in indoor localization with the weighted average technique*. SensorComm, Lisbon, Portugal, 112-116.
- Andrew, L. C., 2022. An analysis of Bluetooth 5 in comparison to Bluetooth 4.2: Uma análise do Bluetooth 5 em comparação com o Bluetooth 4.2. Europub Journal of Education Research. *Europub Journal of Education Research*, **3**(1), 112-120.
<https://doi.org/10.54745/ejerv3n1-008>
- Bisdikian, C., 2001. An overview of the Bluetooth wireless technology. *IEEE Commun. Mag.*, **39**(12), 86-94.
<https://doi.org/10.1109/35.968817>
- Blasio, G.D., Quesada-Arencibia, A., García, C.R., Molina-Gil, J.M., and Caballero-Gil, C., 2017. Study on an Indoor Positioning System for Harsh Environments Based on Wi-Fi and Bluetooth Low Energy. *Sensors*, **17**(6),1299.
<https://doi.org/10.3390/s17061299>
- Brena, R.F., García-Vázquez, J., Galván-Tejada, C.E., Rodríguez, D.M., Rosales, C.V., and Fangmeyer, J., 2017. Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey. *J. Sensors*, 2017.
<https://doi.org/10.1155/2017/2630413>
- Eroğlu, O., ve Doğan, M., (2019). *Konum Tabanlı Hizmetler, Bluetooth Tabanlı İç Mekan Konumlandırma Hizmeti, Antalya İli Örneği*. TMMOB 6. Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Ankara, Türkiye.
- Gao, J., Qin, Z., Fan, T., and Sun, W., 2022. BSSH: Bluetooth Indoor Positioning Strategy for Ship Cabin Based on Hierarchical Area. *Mobile Information Systems*.
<https://doi.org/10.1155/2022/5425306>
- Gomez, C., Oller, J., and Aspas, J.P., 2012. Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology. *Sensors*, **12**(9), 11734-11753.
<https://doi.org/10.1155/2022/5425306>
- Ilci, V., Alkan, R. M., Gülal, V. E., and Cizmeci, H., (2015). *Trilateration technique for WiFi-based indoor localization*. ICWMC 2015, St. Julians, Malta, 36.
- Ilci, V., Gulal, E., and Alkan, R., 2018. An investigation of different Wi-Fi signal behaviours and their effects on indoor positioning accuracy. *SURVEY REVIEW*, **50** (362), 404-411.
- <https://doi.org/10.1080/00396265.2017.1292672>
- Kaya, Gülağız, F., Göz, F., Şahin, E., Albayrak, M. S. and Kavak, A., 2016. Beacon Temelli Sanal Etiket Uygulaması. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **3** (1), 1-7.
- Khudhair, A.A., Jabbar, S.Q., Sulthan, M.Q., and Wang, D., 2016. Wireless Indoor Localization Systems and Techniques: Survey and Comparative Study. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, **3**(2), 392-409.
<https://doi.org/10.11591/ijeecs.v3.i2.pp392-409>
- Kohne, M., and Sieck, J., (2014). *Location-Based Services with iBeacon Technology*. 2014 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation, Madrid, Spain, 315-321.
- Magsi, S. A., Khir, M. H. B. M., Nawı, I. B. M., Hasan, M. A., Ullah, Z., Khan, F. U., Saboor, A., and Siddiqui, M. A., 2023. Experimental evaluation of Trilateration-Based outdoor localization with LoRaWAN. *Computers Materials & Continua*, **75**(1), 845.
<https://doi.org/10.32604/cmc.2023.033636>
- Manzoni, P., Calafate, CT., Cano, J-C., and Hernández-Orallo, E., 2019. Indoor Vehicles Geolocation Using LoRaWAN. *Future Internet*, **11** (6),124.
<https://doi.org/10.3390/fi11060124>
- Siekkinen, M., Hienkari, M., Nurminen, J.K., and Nieminen, J., (2012). *How low energy is Bluetooth low energy? Comparative measurements with ZigBee/802.15.4*. 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), Paris, France, 232-237.
- Sümer, N.N., Ataklı, N., and Kucur, O., (2020). *Using RSSI-Based Bluetooth Low Energy for Indoor Location Detection*. 2020 5th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), Diyarbakır, Türkiye, 83-87.
- Uttraphan, C., Abdul Aziz, F.D., Abd Wahab, M.H., and Idrus, S.Z.S., (2020). *Bluetooth Based Indoor Navigation System*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Penang, Malaysia, **917**(1).
- Wang, Y., Yang, X., Zhao, Y., Liu, Y., and Cuthbert, L.G., (2013). *Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods*. 2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, Nevada, 837-842.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarlanmış Çelik Binada Kalıcı Ötelemeleri İçeren Performans Değerlendirmesi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 10.11.2023

Kabul/Accepted: 12.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Performance Evaluation Including Residual Drifts on a Steel Building Designed Building Earthquake Code of Türkiye

Kaan TÜRKER^{1*}, Aykut SAYILIR²

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

²Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Depremlerden sonraki gözlemler ve sayısal/deneysel çalışmalar, yapılarda deprem sonrası oluşan kalıcı yanal ötelemelerin belirli sınırları aşması durumunda, yapının kullanılabilir hale gelerek toptan kaybına sebep olabileceğini göstermiştir. Bu bağlamda, ekonomik kayıpları azaltmak için kalıcı yanal ötelemelerin de performans değerlendirmelerinde gözönüne alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY) göre tasarlanmış çelik bir bina için, yönetmelikte yer alan temel performans düzeylerinin kalıcı yanal ötelemeler bakımından yeterlilikleri değerlendirilmiştir. İncelenen bina dört katlı ve taşıyıcı sistemi kenar akslara yerleştirilen bir doğrultuda Moment Aktaran Çerçeve (MAÇ)'ler, diğer asal doğrultuda Merkezi Çaprazlı Çerçeve (MÇÇ)'lerden oluşmaktadır. Bina, tasarım depremi düzeyini ve maksimum deprem düzeyini temsil eden iki grup deprem yer hareketi için çift doğrultulu doğrusal olmayan dinamik analiz ile incelenmiştir. Bina tasarım deprem düzeyi için TBDY'de öngörülen performans hedeflerini sağlamıştır. MAÇ sistemindeki performans değerlendirmeleri çok düşük düzeyde hasara işaret etmesine rağmen, kalıcı ötelemeler binanın deprem sonrası kullanılamaz hale gelme potansiyeli bulunduğunu göstermiştir. MÇÇ sistemindeki performans değerlendirmeleri ise daha büyük hasar düzeylerini işaret etmiş, ancak kalıcı öteleme davranışı bakımından çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Elde edilen kalıcı öteleme sonuçlarında narin çaprazların burkulma sonrası çevrimsel davranışı etkili olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çelik bina; Moment aktaran çerçeve; Merkezi çaprazlı çerçeve; Deprem performansı; Kalıcı yanal öteleme.

Abstract

Post-earthquake observations and numerical/experimental studies show that if the residual drifts in buildings exceed certain limits, buildings may become unusable and cause total loss of building. In this context, residual drifts should also be included in performance evaluations to reduce economic losses. In this study, on a steel building designed to Building Earthquake Code of Türkiye (BECT), the adequacy of the basic performance levels included in BECT was evaluated in terms of residual drifts. Investigated building is four-story and its structural system consists of Moment Resisting Frames (MRF) and Concentrically Braced Frames (CBF) located around the perimeter of the building. The building was investigated by bi-directional nonlinear dynamic analysis for two ground motions set representing the design level earthquake and the maximum earthquake level. The building has achieved the performance level stipulated in the BECT for the design level earthquake. Although the performance evaluations of the MRF system indicated very low levels of damage (limited damage), the residual drifts of MRF system shown that the building had the potential to become unusable after the earthquake. The performance evaluations in the CBF system indicated greater damage levels compared to the MRF system, but gave much better results in terms of residual drifts. The post-buckling cyclic behavior of slender braces was effective in the residual drift results.

Keywords: Steel building; Moment resisting frame; Concentrically braced frame; Seismic performance; Residual drift.

1. Giriş

Günümüz deprem yönetmeliklerinde, ekonomik sebeplerle deprem etkisi altında genellikle sünek davranış öngörülerek tasarım yapılmakta, bu da deprem sonrası yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda önemli ölçüde hasarın göze alınması anlamına gelmektedir. Özel amaçlı binalar dışında konut, işyeri gibi yaygın kullanılan bina türlerinde temel hedef, tasarım depremi altında can güvenliğinin sağlanması ve deprem sonrası hasarın onarılabilir düzeyde tutulmasıdır. Tasarım depreminden

daha büyük depremlerde ise binanın kısmen veya tamamen göçmesinin engellenmesi hedeflenmektedir. Geleneksel dayanım esaslı tasarım yaklaşımlarında bu hedefler tasarımda uygulanan çeşitli kontroller (kapasite tasarımı vb.) ve sınırlamalar (öteleme oranı vb.) ile sağlanmaya çalışılmaktadır. Son dönemde deprem kodlarında geniş yer alan performans dayalı yaklaşımların kullanılması durumunda ise performans hedefleri daha detaylı tanımlanmakta ve deprem sonrası oluşması beklenen hasar düzeyleri ileri yöntemler ile

kontrol edilmektedir (SEOAC 1995, ATC 1996, FEMA 1997, ASCE 2017, AFAD 2018). Bu yaklaşımların tasarımda veya değerlendirmede kullanılması sayesinde, eleman (kolon, kiriş vb.) ölçeğindeki kalıcı deformasyonlar (plastik dönme, kısılma vb.) belirli güvenlikle kontrol altında tutulabilmekte ve yapılarda kısmi veya toptan göçme durumlarının oluşması önlenmektedir. Bununla birlikte, depremlerden sonraki gözlemler ve sayısal/deneysel çalışmalar, yapılarda deprem sonrası oluşan kalıcı yanal ötelemelerin belirli sınırları aşması durumunda, yapının kullanılmaz hale gelerek toptan kaybına ve dolayısıyla büyük ekonomik kayıplara sebep olabildiğini göstermiştir. (Comartin et al. 1995, Eguchi et al. 1998, Pampanin et al. 2003, Wu et al. 2004, McCormick et al. 2008, Christopoulos and Pampanin 2004, Anderson and Fillipou 1995, Ramirez and Miranda 2012). İlgili çalışmalarda; deprem sonrası binanın onarılabilirliği ve dolayısıyla kullanılabilirliği için önemli bir gösterge olan kalıcı yanal öteleme kriterinin de performans değerlendirmelerinde kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Performansa dayalı yaklaşımlar ile ilgili SEOAC (1995) tarafından hazırlanan ilk dokümanda, "Can Güvenliği" olarak tanımlanan performans düzeyi için kalıcı öteleme oranının %0.5 ile sınırlandırılması öngörülmüştür. Ancak kalıcı ötelemeler hesaplarının ileri analizler gerektirmesi ve bu konudaki araçların yetersizliği nedeniyle daha sonra hazırlanan standartlarda, kalıcı ötelemeler ile ilgili herhangi bir kriter ve kontrole yer verilmemiştir. Bugün için sadece, ABD'de yüksek binaların performans esaslı tasarımı için hazırlanan bir kılavuzda (PEER 2017) kalıcı öteleme ile ilgili kriterler yer almaktadır. Bu kılavuza göre, binanın bulunduğu bölgedeki maksimum deprem düzeyi için yeterli sayıda doğrusal olmayan dinamik analizden elde edilecek maksimum kalıcı öteleme oranı %1.5, ortalama kalıcı öteleme oranı ise %1 ile sınırlandırılmıştır.

McCormick vd. (2008) tarafından, binalarda izin verilebilir kalıcı deformasyon (yanal ve düşey) sınırlarını tespit etmek amacıyla bina fonksiyonelliği, yapım hatası toleransları ve güvenlik olmak üzere üç kategoride geniş kapsamlı bir değerlendirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonellik kapsamında, kalıcı deformasyonların ikamet edenler üzerinde yaratacağı fiziksel ve psikolojik etkilerin de gözönüne alındığı çalışmada, kabul edilebilir kalıcı yanal öteleme kriteri olarak maksimum % 0,5'lik sınır önerilmiştir. Ayrıca, bu sınırın onarım maliyetleri nedeniyle yapının ekonomik olarak tamamen kaybı için referans alınabileceği belirtilmiştir.

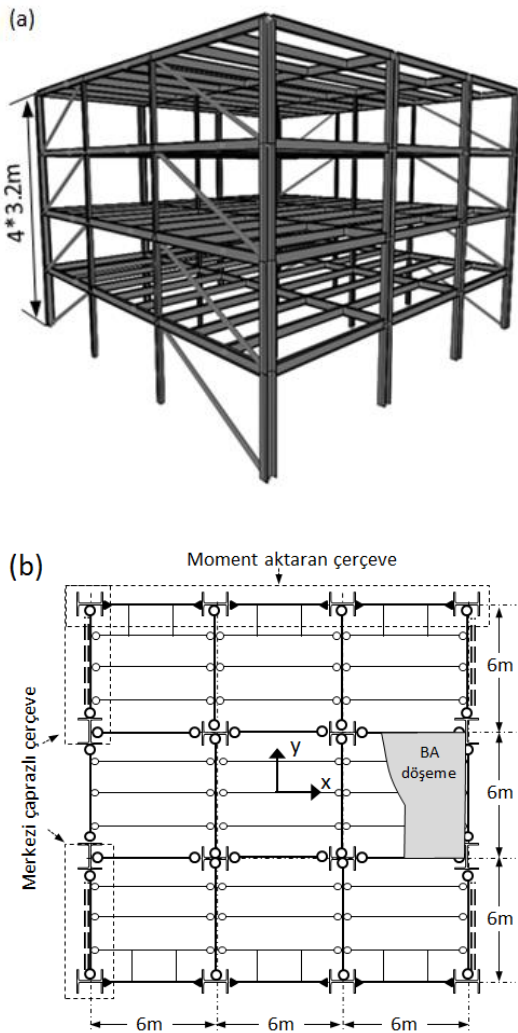
Tek serbestlik dereceli sistemler ve çok serbestlik dereceli bina modelleri için yapılan çalışmalar, yapısal elemanların deprem etkisi altındaki çevrimsel (tersinir tekrarlı)

davranışının, akma sonrası rijitliğinin, II. mertebe etkilerinin, deprem karakteristiğinin ve faya olan uzaklığının kalıcı ötelemeler üzerinde etkili olduğunu göstermiştir (Christopoulos et al. 2003, Pampanin et al. 2003, Ruiz-Garcia and Miranda 2006a, Ruiz-Garcia and Miranda 2006b). Söz konusu çalışmalarda çevrimsel davranıştaki rijitlik azalmalarının dolayısıyla sönmülenen enerjinin diğer parametrelere göre çok daha etkili olduğu belirlenmiştir. Buna göre rijitlik azalması oluşmayan yani çevrimsel sönmü yüksek olan elemanlarda, rijitlik azalması bulunanlara göre daha fazla kalıcı öteleme oluştuğu rapor edilmiştir.

Çelik taşıyıcı sistemlerde kullanılan kolon, kiriş, bağ kirişi, burkulması önlenmiş veya çok düşük narinlikli çapraz elemanlar, genel olarak deprem etkisi altında önemli bir rijitlik azalması oluşmadan elasto-plastik davranış göstermeleri nedeniyle kalıcı öteleme potansiyeli yüksek elemanlardır. Özellikle moment aktaran çerçeve ve burkulması önlenmiş çaprazlı çerçeve sistemler üzerinde yapılan bazı çalışmalarda, tasarım depremi altında oluşan kalıcı ötelemelerin McCormick vd. (2008) tarafından önerilen 0.005'lik sınırı aşabildiği görülmektedir (Pettinga et al. 2007, Erochko et al. 2011, Asgarkhani et al. 2020). Ayrıca çeşitli çalışmalarda, ana deprem yer hareketi sonrasında oluşan artçı şokların da kalıcı yanal ötelemeleri önemli ölçüde artırdığı rapor edilmektedir (Basim et al. 2022, Narayan et al. 2023). Bu bağlamda özellikle burkulması önlenmiş çelik çaprazlı sistemlerde ve moment aktaran çelik çerçeve sistemlerde oluşması beklenen kalıcı deformasyonları azaltmak amacıyla büyük deformasyonlarda elastik kalarak kendi kendini merkezleyen (self centering) çeşitli uygulamalara (ön/ard germeli çapraz/kolon-kiriş birleşimi vb.) ihtiyaç duyulmaktadır (Garlock et al. 2005, Kim and Christopoulos 2008, Tremblay et al. 2008, Hu et al. 2020, Kamaris et al. 2022). Buna karşılık, yüksek narinlikli elemanların kullanıldığı merkezi çaprazlı çerçeve sistemler ise özellikle basınç altında burkulma sonrası önemli rijitlik kayıplarına uğradıkları için kalıcı ötelemeler bakımından avantajlı olabilecek sistemlerdir. Daha önce yönetmeliklerde kullanımına izin verilmeyen bu tür yüksek narinlikli çaprazlar, mevcut yönetmeliklerde özel birleşim detaylarının uygulanması koşuluyla sünelik düzeyi yüksek sistemler olarak kullanılabilir (AISC 2010, AFAD 2018).

Kalıcı yanal ötelemelerin deprem sonrası ekonomik kayıplara olan etkisi gözönünde bulundurulduğunda, mevcut yönetmeliklerdeki temel performans düzeylerinin kalıcı yanal ötelemeler ile birlikte farklı taşıyıcı sistem tipleri ve boyutları için değerlendirmesi gerektiği görülmektedir. Bu çalışmada, 2018 Türkiye Bina Deprem

Yönetmeliğine (TBDY) göre tasarlanmış çelik bir binanın tasarım depremi ve maksimum deprem düzeyi için performans seviyeleri ve kalıcı yanal ötelemeleri belirlenerek, yönetmelikte yer alan temel performans düzeylerinin kalıcı yanal ötelemeler bakımından yeterlilikleri değerlendirilmiştir. Çelik binanın taşıyıcı sistemi için bir doğrultuda Moment Aktaran Çerçeve (MAÇ) sistem, diğer asal doğrultuda narin çaprazlar içeren Merkezi Çaprazlı Çerçeve (MÇÇ) sistem kullanılmış, böylece kalıcı yanal öteleme davranışları farklı olan iki sistem birlikte değerlendirilmiştir. Ayrıca MÇÇ sistemdeki çapraz elemanlarda, narinlikle ilişkili olan burkulma sonrası çevrimsel davranışın kalıcı ötelemeler üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Bina taşıyıcı sistemine ait (a) üç boyutlu görünüm, (b) tipik kat planı

2. Materyal ve Metot / Materials and Methods

2.1 Bina özellikleri ve tasarımı

İncelenen binanın taşıyıcı sistem geometrik özellikleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Bina taşıyıcı sistemi iki dış aksa yerleştirilen Moment Aktaran Çerçeve (MAÇ) sistem ve diğer doğrultuda iki dış aksa yerleştirilen Merkezi Çaprazlı

(diyagonal tip) Çerçeve (MÇÇ) sistem ve iç akslarda sadece düşey yük taşıyacak şekilde mafsallı kolon-kiriş bağlantıları ile oluşturulan çerçevelerden oluşmaktadır. Eğilme momentine maruz kirişlerde yanal burkulmayı önlemek amacıyla döşeme kirişlerine bağlanan yeterli sayıda destek elemanları oluşturulmuştur. Merdiven vb. boşluklar ihmal edilmiştir. Dolgu duvarların taşıyıcı elemanlar ile izolasyon yoluyla ayrıldığı kabul edilmiş ve yanal ötelenme kriteri buna göre belirlenmiştir. Betonarme döşemenin kiriş kapasitelerine katkısı ihmal edilmiş, rijit diyafram etkisini tam olarak sağladığı kabul edilmiştir. Binanın tasarımı Çelik Yapılar Yönetmeliği ve TBDY'ye göre yapılmıştır (ÇŞİ 2016, AFAD 2018). Döşemelerde çatı katı için 3.5kN/m²'lik, diğer katlar için 3.1 kN/m²'lik sabit yük, tüm katlarda 2.1kN/m²'lik hareketli yük ve dış kirişlerde 3.0 kN/m²'lik duvar yükü esas alınmıştır. Bina kullanım amacı konut, zemin sınıfı ZB, zemin karakteristik periyotları TA=0.10, TB=0.30, kısa periyot spektral ivme katsayısı SDS=1.0 olarak gözönüne alınmıştır. Tüm elemanlar için S275 sınıfı çelik kullanılmıştır. Moment aktaran çerçeveler ve merkezi çaprazlı çerçeveler süneklik düzeyi yüksek sistem olarak tasarlanmıştır. Tasarım modelinde, eğilme elemanlarında rijit uç bölgeleri gözönüne alınmıştır.

Çaprazlar, emniyetli tarafta kalmak amacıyla iki ucu mafsallı ve düğüm noktaları arasında tanımlanan etkin burkulma boyu ile tasarlanmıştır. Deprem etkileri Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi (EDYY) ile belirlenmiştir (AFAD 2018). Binaların analiz ve tasarımında SAP2000 yapısal analiz programından yararlanılmıştır (CSI, 2008). Binanın her iki doğrultudaki modal özellikleri ve elde edilen tasarım taban kesme kuvvetleri Çizelge 1'de verilmiştir. TBDY'de yeni getirilen periyot üst sınır koşulu MAÇ sistemin periyodunu sınırlamış, bu nedenle taban kesme kuvvetlerini önemli ölçüde artırmıştır (Çizelge 1) (AFAD 2018). Tasarım sonucunda MAÇ ve MÇÇ için elde edilen eleman boyutları Şekil 2'de verilmiştir. Sadece düşey yük etkisindeki iç aks kolonları için HE220B, mafsallı kirişler için IPE360 profilleri kullanılmıştır. Beklendiği gibi MAÇ elemanlarının tasarımında görece öteleme oranı, MÇÇ sistem çaprazlarında talep/kapasite oranları belirleyici olmuştur.

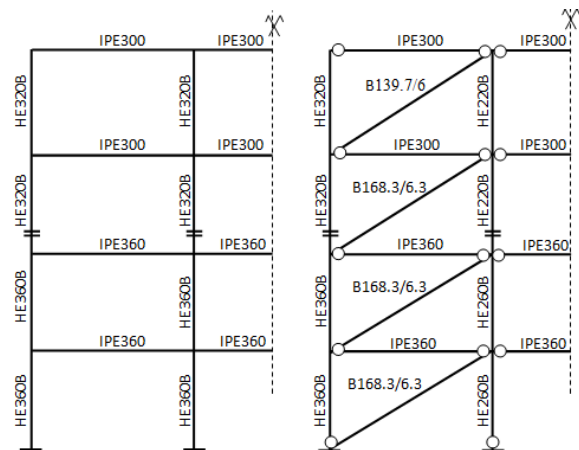
Çizelge 1. Bina modal özellikleri ve taban kesme kuvvetleri

Parametre	Taşıyıcı sistem (deprem doğ.)	
	MAÇ (x doğ)	MÇÇ (y doğ)
Periyot (T_1) (s)	1.142	0.478
Periyot üst sınırı (TBDY)		0.758
1. Mod kütle kat. Oranı (%)	77.4	85.7
Elastik spek. ivme (S_{ae}) (g)	0.491	0.799
Taban kesme kuv. (V_t) (kN)	390	1015
Bina deprem ağırlığı (kN)		6352

Tüm elemanlarda süneklik düzeyi yüksek enkesit narinlikleri (kompakt kesitler) sağlanmış, böylece lokal stabilite sorunları engellenmiştir (AFAD 2018).

2.2 Doğrusal olmayan dinamik analiz özellikleri

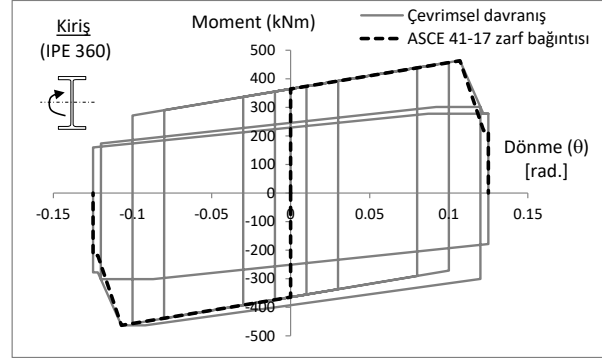
Binanın doğrusal olmayan dinamik analizi için PERFORM-3D (CSI 2023) programı kullanılmış ve hesap modelinin oluşturulmasında ASCE/SEI 41-17 (ASCE 2017) standardından yararlanılmıştır. Buna göre kolon ve kirişlerde rijit-plastik moment-dönme bağıntıları ve çapraz elemanlar için ise normal kuvvet-kısalma/uzama bağıntıları kullanılmıştır. Çaprazların basınç kapasitelerinin ve birim şekil değiştirmelerinin belirlenmesinde, düğüm noktaları arasındaki boyun %90'ı etkin boy olarak alınmıştır (ASCE 2017). MAÇ kolonlarında bileşik eğilme etkisi gözönüne alınmıştır. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinin ve kolon-temel birleşimlerinin tam rijit olduğu ve doğrusal olmayan davranış göstermediği kabul edilmiştir. ASCE 41-17 standardında verilen modelleme parametreleri, çevrimsel (tersinir tekrarlı) test sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesine dayanmakta ve dayanım azalmalarını da içermektedir (ASCE 2017). Ancak gerekli durumlarda, kalıcı ötelemeler için de belirleyici olan çevrimsel davranıştan kaynaklı rijitlik azalmalarının ayrıca modellenmesi gerekmektedir. Çalışmada, çelik kolon ve kirişlerde, kompakt kesitler kullanılması ve yanal burkulma ile ilgili önlemlerin alınması nedeniyle pekleşmeli-ideal elastoplastik davranış modeli esas alınmış ve rijitlik azalması gözönüne alınmamıştır. Kirişler için kullanılan çevrimsel model ve ASCE 41-17 zarf bağıntısı IPE 360 kiriş elemanı için örnek olarak Şekil 3'de gösterilmiştir (ASCE 2017).



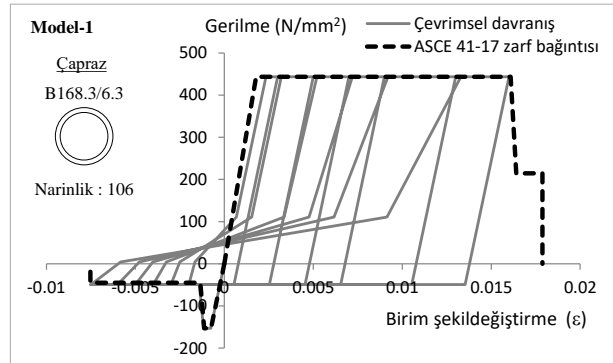
Şekil 2. MAÇ ve MÇÇ sistem için eleman boyutları

Çapraz elemanların çevrimsel davranışı kiriş ve kolonlardan farklı olarak, basınç altında burkulma sonrası önemli ölçüde rijitlik azalmaları içermektedir (Bruneau et al. 2011). Bu etkiyi gözönüne almak amacıyla çaprazlar için PERFORM-3D (CSI 2023) programında bulunan

“burkulma esaslı doğrusal olmayan çelik malzeme” bileşeni kullanılmıştır. Bu bileşende, çapraz elemanın basınç altında burkulma sonrası gerilme-şekil değiştirme davranışı çeşitli parametreler ile gözönüne alınmaktadır (CSI 2023). Söz konusu parametreler çapraz elemanın narinliğine bağlı olarak değişim göstermektedir (Bruneau et al. 2011).



Şekil 3. Kiriş için çevrimsel davranış modeli



Şekil 4. Çapraz eleman için çevrimsel davranış modeli (Model-1)

Narinlik azaldıkça, burkulma sonrası sönümlenen çevrimsel enerji azalmaktadır. Çalışmada incelenen binada kullanılan çaprazlarla ilgili test verileri bulunmadığı için modellemede, literatürdeki çapraz deney sonuçlarından yaklaşık olarak belirlenen parametreler kullanılmış, ancak ilgili parametrelerin değişiminin kalıcı yanal ötelemeler üzerindeki etkisi ayrıca değerlendirilmiştir. Çaprazlar için kullanılan çevrimsel hesap modeli (Model-1) ve ilgili ASCE 41-17 zarf bağıntısı Şekil 4'de gösterilmiştir (ASCE 2017). İki doğrultulu deprem yüklemesi altında, MAÇ ve MÇÇ sistemin ortak elemanı olan köşe kolonları ve diğer MÇÇ kolonlarında, normal kuvvet değişimleri izlenerek burkulma yüklerinin aşılmadığı ayrıca kontrol edilmiştir.

Doğrusal olmayan dinamik analizde Rayleigh sönüm metodu esas alınmış ve dolgu duvarların taşıyıcı sistemden ayrık olduğu gözönünde bulundurularak %3'lük sönüm oranı kabul edilmiştir (ASCE 2017). Rayleigh sönüm modeline ait karakteristik periyotlar, MÇÇ hakim periyodunun 0.2 katı (0.2T_{1y}) ve MAÇ hakim periyodunun 1.5 katı (1.5T_{1x}) alınarak belirlenmiştir. Böylece dinamik

analizde plastikleşme ile oluşacak periyot büyümelerinin ve her iki doğrultudaki yüksek mod etkilerinin gözönüne alınması amaçlanmıştır. Dinamik analizde kullanılan deprem kayıtlarının seçiminde PEER (İnt. Kyn. 1) veri tabanından yararlanılmıştır. Çalışmada farklı fay mekanizmalarını içeren ve uzak fay özelliğine sahip 15 güçlü deprem hareketi kaydı (çift bileşen) gözönüne alınmıştır. Seçilen deprem kayıtlarına ait özellikler Çizelge 2’de verilmiştir. Deprem performansı ve kalıcı öteleme değerlendirmeleri iki farklı deprem yer hareketi düzeyi için yapılmıştır. Bunlar, binanın tasarımında esas alınan DD2 (50 yılda aşılma olasılığı %10) deprem düzeyi ve en büyük depremi temsil eden DD1 (50 yılda aşılma olasılığı % 2) deprem düzeyidir. Tasarım depreminin spektral olarak 1.5 katı DD1 deprem düzeyi olarak gözönüne alınmıştır. Değerlendirme için seçilen deprem kayıtları, hedef spektruma spektral uyum sağlanacak şekilde ölçeklenmiştir. Bunun için SeismoMatch (2023) programı kullanılmıştır. Spektral uyum tekniği ile hedef spektruma oldukça uyumlu spektrumlar elde edilebilmekte böylece, seçilen depremlerde zemin karakteristiklerine bağımlılık ortadan kalkmakta ve basit ölçeklemedeki gibi yüksek güvenlik katsayıları kullanımına gerek kalmamaktadır (Hancock et al. 2008, Al-Atik and Abrahamson 2010). TBDY’ye göre spektrum uyumlu kayıtların kullanılması durumunda kayıtlar için elde edilen ortalama spektrumun tüm periyotlar için hedef spektrumun ordinatlarından küçük olmaması şartı bulunmaktadır (AFAD 2018). Ancak TBDY’ye göre yapılması zorunlu olan iki doğrultulu dinamik analizde, spektral uyumun hangi spektral büyüklükle (maksimum bileşen, geometrik ortalama vb.) sağlanacağı açıklanmamıştır. Bu konuda literatürde genel olarak bir eksiklik bulunmakla birlikte, ASCE/SEI 7-2022 standardında bazı önerilere yer verilmiştir (ASCE 2022). Bu çalışmada, her bir deprem kaydına ait iki dik bileşenin ayrı ayrı hedef spektrum ile uyumlu olacak şekilde ölçeklenmesi yaklaşımı esas alınmıştır (ASCE 2022). Deprem ivme kayıtlarından birine ait orijinal ve DD1 düzeyi için ölçeklenmiş yer ivmesi–zaman grafiği ile aynı deprem kaydının ölçeklenmiş iki bileşeni (x,y) için yer ivmesi–zaman grafiği Şekil 5’de örnek olarak gösterilmiştir. Spektral uyum sonucu tüm deprem kayıtları için elde edilen DD1 düzeyi ivme spektrumları, bunların ortalaması, hedef spektrum ile birlikte Şekil 6’da gösterilmiştir.

Binanın her iki doğrultudaki hakim periyotları göz önünde bulundurularak (0.2T_{1y}) ve (1.5T_{1x})’e karşılık gelen periyotlar arasında spektral uyum sağlanması yeterli görülmüştür. Şekil 6’dan görüleceği gibi, spektral uyum esaslı ölçekleme yaklaşımı istenilen bölgede hedef

spektrum ile oldukça uyumlu sonuçlar vermiş ve tüm bileşenlerin (15 çift) ortalaması, hedef spektrum ordinatlarının üzerinde ve ona çok yakın olarak elde edilmiştir.

3. Analiz sonuçları / Analysis results

DD1 ve DD2 deprem düzeylerine ait hedef spektrumlara göre ölçeklenmiş 15’er çift deprem kaydı, bileşen çifti 90o döndürülmek suretiyle ikiye kez binaya uygulanmıştır. Buna göre binanın 60 kez iki doğrultulu doğrusal olmayan dinamik analizi gerçekleştirilmiştir.

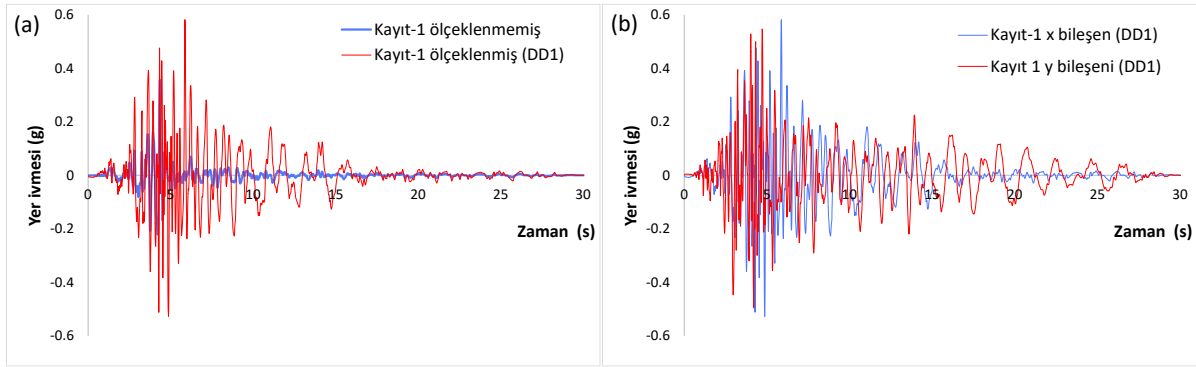
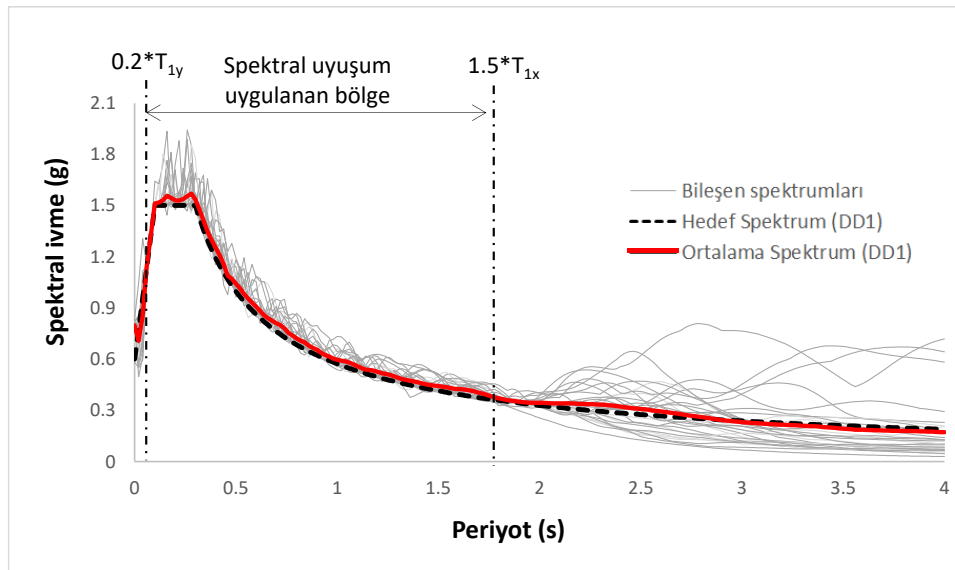
3.1 Performans Düzeyleri

Taşıyıcı sistem elemanlarının performans düzeylerinin belirlenmesinde TBDY’de verilen performans kriterleri esas alınmıştır (AFAD 2018). Buna göre kolon ve kirişlerde plastik dönmeler için, çaprazlarda plastik sekildeğiştirmeler (kısılma/uzama) için 30 analizden elde edilen maksimum değerlerin aritmetik ortalaması alınarak, yönetmelikte verilen performans sınırları (Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH), Göçmenin Önlenmesi (GÖ)) ile karşılaştırılmıştır. DD1 deprem düzeyinde, kayıtların üçünde MÇÇ sistemin bazı çapraz elemanlarında basınç altında yönetmelikte verilen “Göçmenin Önlenmesi” sınırı bir miktar aşılmıştır. Sınırın en fazla aşıldığı eleman için elde edilen Normal kuvvet-zaman grafiği ve çevrimsel davranış Şekil 7’de gösterilmiştir. Çevrimsel davranış üzerinde ilgili çapraz elemana ait TBDY performans düzeyleri (SH, KH, GÖ) de gösterilmiştir (AFAD 2018). GÖ sınırı aşılma elemanlar için şekil değiştirme kapasitesinin devam ettiği kabul edilerek talepler belirlenmiş ve bunlar ortalama talep hesabında göz önüne alınmıştır.

DD1 düzeyi için yapılan analizlerde; MAÇ’nin sadece 1.kat kolonlarının alt uçlarında plastikleşmeler oluşmuş, 30 analiz içinde maksimum plastik dönme 0.007 rad, en büyük ortalama plastik dönme ise 0.001 rad olarak elde edilmiştir. Buna göre tüm kolonlar Sınırlı Hasar düzeyinin çok altında kalmıştır. DD2 düzeyinde ise MAÇ kolonlarında plastikleşme oluşmamıştır. DD1 ve DD2 düzeyleri için gerçekleştirilen dinamik analizlerde kirişler için elde edilen ortalama plastik dönme talepleri ve ilgili Sınırlı Hasar performans düzeyleri Şekil 8’de verilmiştir. DD1 düzeyinde; MAÇ kirişlerinin tümü plastikleşmiştir. 30 analiz içinde maksimum plastik dönme 0.05 rad olarak elde edilmiş, ancak ortalama plastik dönme talepleri hiçbir kirişte sınırlı hasar performans düzeyini aşmamıştır (Şekil 8). DD2 düzeyi depremlerde, maksimum giriş plastik dönme talebi 0.013 rad olarak elde edilmiş, ortalama plastik dönme talepleri Sınırlı Hasar performans düzeyinin oldukça altında kalmıştır (Şekil 8).

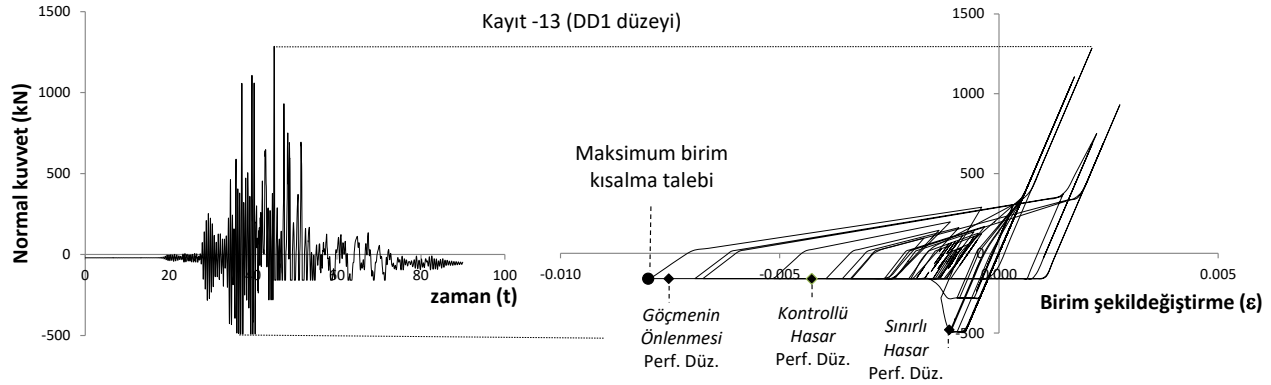
Çizelge 2. Deprem kayıtlarına ait karakteristikler

Kayıt no	Deprem adı	Büyükölç	Mekanizma tipi	Faya uzaklık (km)	Vs30 (m/s)	Maks. yer ivmesi (g)	
						Bileşen-x	Bileşen-y
1	Parkfield	6.19	Yanal atımlı fay	15.96	527.92	0.35652	0.27274
2	San Fernando	6.61	Eğim atımlı ters fay	19.3	602.1	0.38215	0.28217
3	Friuli_Italy-01	6.5	Eğim atımlı ters fay	15.82	505.23	0.35713	0.31512
4	Imperial Valley-06	6.53	Yanal atımlı fay	22.03	242.05	0.2357	0.3497
5	Coalinga-01	6.36	Eğim atımlı ters fay	24.02	274.73	0.22538	0.28846
6	Loma Prieta	6.93	Yanal ve eğim atımlı fay	15.23	288.62	0.51113	0.4386
7	Loma Prieta	6.93	Yanal ve eğim atımlı fay	17.47	388.33	0.37318	0.65397
8	Landers	7.28	Yanal atımlı fay	19.74	352.98	0.28368	0.4172
9	Northridge-01	6.69	Eğim atımlı ters fay	17.15	355.81	0.44341	0.48796
10	Northridge-01	6.69	Eğim atımlı ters fay	15.6	257.21	1.77942	0.99024
11	Kocaeli_Turkey	7.51	Yanal atımlı fay	15.37	281.86	0.31191	0.36418
12	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Yanal ve eğim atımlı fay	16.04	233.14	0.27255	0.2037
13	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Yanal ve eğim atımlı fay	26	704.64	0.47308	0.50682
14	Cape Mendocino	7.01	Eğim atımlı ters fay	18.31	459.04	0.31808	0.47764
15	El Mayor-Cucapah_Mexico	7.2	Yanal atımlı fay	15.91	242.05	0.53762	0.40816

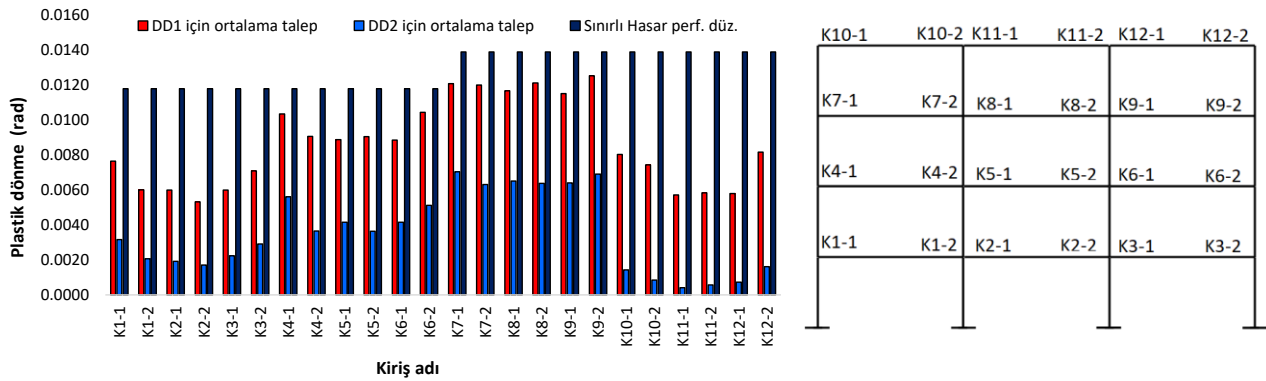
**Şekil 5.** Kayıt 1'e ait ivme-zaman grafikleri (a) orijinal ve ölçeklenmiş (DD1 için), (b) Ölçeklenmiş x ve y bileşenleri**Şekil 6.** Spektral uyum sonucu elde edilen ivme spektrumları (DD1 düzeyi için)

MÇÇ çapraz elemanları için elde edilen ortalama plastik uzama/kısılma talepleri ve ilgili performans düzeyleri Şekil 9'da verilmiştir. DD1 düzeyi için yapılan analizlerde; çapraz elemanlarda maksimum 0.049 m'lik kısılma, 0.048 m'lik uzama gerçekleşmiştir. Ortalama değerler üzerinden yapılan değerlendirmede tüm çaprazlar, basınç ve çekme altında Kontrollü Hasar performans düzeyinin

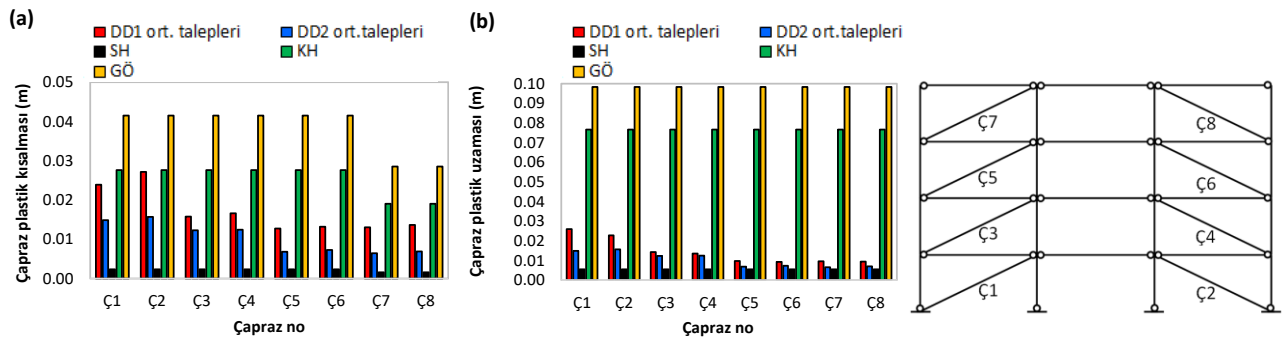
altında kalmıştır. Şekil 9'dan görüldüğü gibi, basınç altındaki plastik şekil değiştirmeler çekmeye göre çok daha yüksek elde edilmiştir. DD2 düzeyi için yapılan analizlerde; çapraz elemanlarda maksimum 0.023 m'lik kısılma, 0.022 m'lik uzama gerçekleşmiştir. DD2 düzeyinde plastik şekil değiştirmeler önemli ölçüde azalmakla birlikte performans düzeyi bakımından değişiklik olmamıştır.



Şekil 7. En büyük kısılma talebinin elde edildiği 1. Kat çaprazında normal kuvvet ve şekil değiştirme davranışı



Şekil 8. Kiriş ortalama plastik dönme talepleri ve Sınırlı Hasar performans düzeyleri



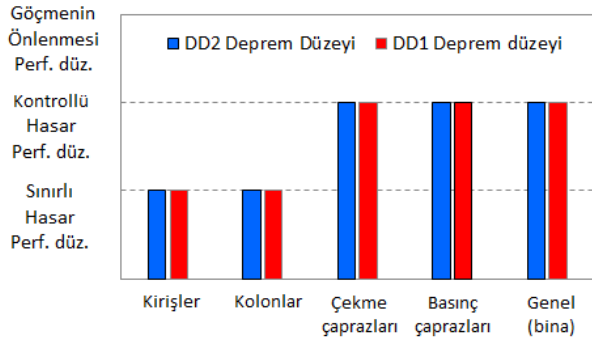
Şekil 9. Çapraz ortalama plastik talepleri ve performans sınırları (a) Kısılma talepleri (b) Uzama talepleri

Yönetmelikte verilen performans sınırlarına göre değerlendirildiğinde; MAÇ kirişleri ve kolonları için Sınırlı Hasar performans düzeyi, çekme ve basınç etkisindeki çaprazlar için Kontrollü Hasar performans düzeyinin sağlandığı görülmüştür (Şekil 10). İki doğrultulu analizler sonucunda binanın genel performans düzeyi her iki

deprem düzeyi için de Kontrollü Hasar olarak elde edilmiştir. Buna göre yönetmelikte tasarım deprem düzeyi DD2 için öngörülen hedef sağlanmıştır.

Tasarım depreminin spektral olarak 1.5 katı olan DD1 deprem düzeyinde de depremlerden elde edilen ortalama

büyükliklere göre Kontrollü Hasar performans düzeyi sağlanmıştır.



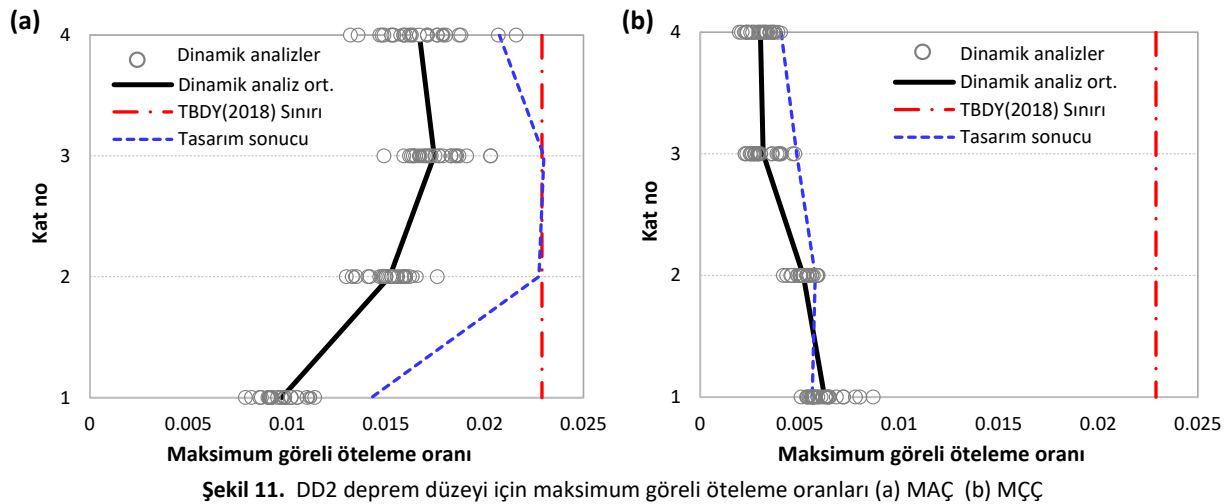
Şekil 10. Eleman ölçeğinde ve genel performans düzeyleri

Bununla birlikte, özellikle basınç altındaki bazı çapraz plastik şekil değiştirmelerinin maksimum değerleri Göçmenin Önlenmesi sınırını bir miktar aşmıştır. Çalışmada, söz konusu sınırın önemli ölçüde aşılmaması nedeniyle bu elemanlarda şekildeğiştirme kapasitesinin devam ettiği kabulü yapılmış ve değerlendirmeler ortalama şekil değiştirmeler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu özel durumda değerlendirmelerin nasıl yapılacağına ayrıca incelenmesi gerektiği düşünülmektedir. Binada iki asal doğrultuda farklı özellikte taşıyıcılar kullanıldığı için önemli ölçüde farklı performans düzeyleri elde edilmiştir. MAÇ sistemin tasarımında, elemanların dayanımından ziyade görelî öteleme kriterinin etkili olması ve ayrıca yönetmelikte periyot üst sınırının deprem yüklerini artırması nedeniyle öngörülen performansın çok üzerine çıktığı görülmektedir. MÇÇ sistemde ise çapraz tasarımlarında dayanımların etkili olması nedeniyle, beklendiği gibi

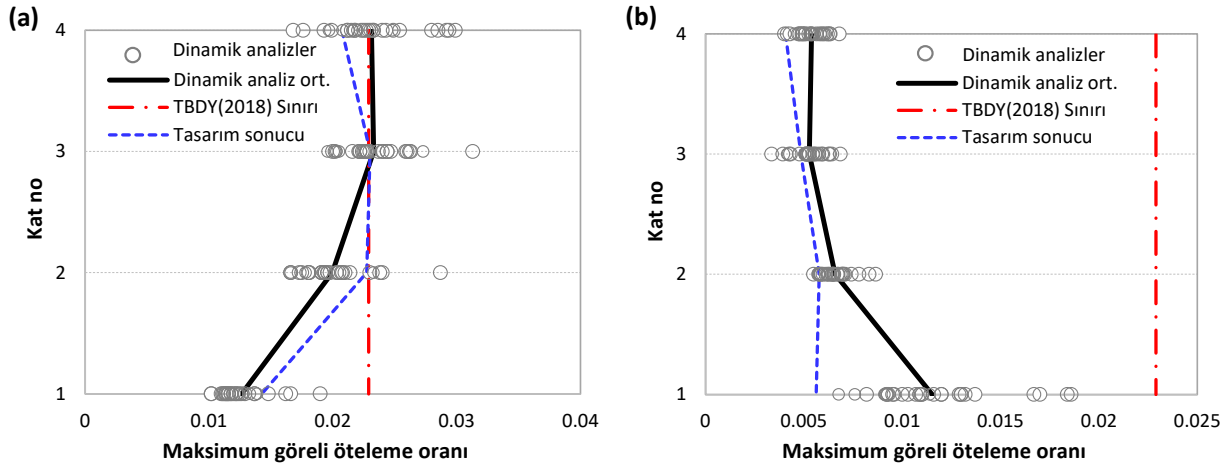
çaprazlarda büyük ölçüde plastikleşmeler oluşmuş ve MÇÇ performans düzeyi, binanın genel performans düzeyini belirleyici olmuştur.

3.2 Maksimum görelî kat ötelemesi oranları

DD2 ve DD1 düzeyi depremler için yapılan analizlerden her iki doğrultudaki maksimum görelî kat ötelemesi oranları belirlenmiş ve bunlar tasarımda elde edilen değerler ve TBDY sınırı ile birlikte Şekil 11 ve 12'de verilmiştir. Çalışmada her bir deprem yer hareketi için elde edilen görelî ötelemeler "maksimum görelî öteleme", tüm yer hareketlerine ait maksimum değerlerin aritmetik ortalaması ise "ortalama görelî öteleme" olarak ifade edilmiştir. MAÇ'de DD2 düzeyini temsil eden depremlerden elde edilen ortalama görelî öteleme oranları tasarımda öngörülen değerlerin ve yönetmelik sınırının çok altında kalmıştır (Şekil11). Depremlerden elde edilen maksimum görelî öteleme oranları dahi sadece iki deprem için en üst kat ötelemeleri hariç olmak üzere, tasarım değerlerinin oldukça altında kalmıştır. DD1 düzeyi depremlerde ise ortalama görelî ötelemeler alt katlarda tasarım değerlerinin altında kalmış, en üst katta tasarım değerlerini bir miktar aşmış, ancak TBDY'de verilen sınır aşılmamıştır (Şekil 12). MAÇ sistemin görelî kat ötelemelerinin yönetmelikte öngörülen sınırlara göre çok güvenli olduğu ve bunun da eleman performans düzeyleri için elde edilen sonuçlara paralel olduğu görülmektedir. MAÇ görelî öteleme oranlarındaki bu aşırı emniyetli durumun, deprem etkilerinin belirlenmesinde kullanılan EDDY yöntemindeki yaklaşıklık ve periyot üst sınırı koşulu nedeniyle oluştuğu söylenebilmektedir.



Şekil 11. DD2 deprem düzeyi için maksimum görelî öteleme oranları (a) MAÇ (b) MÇÇ



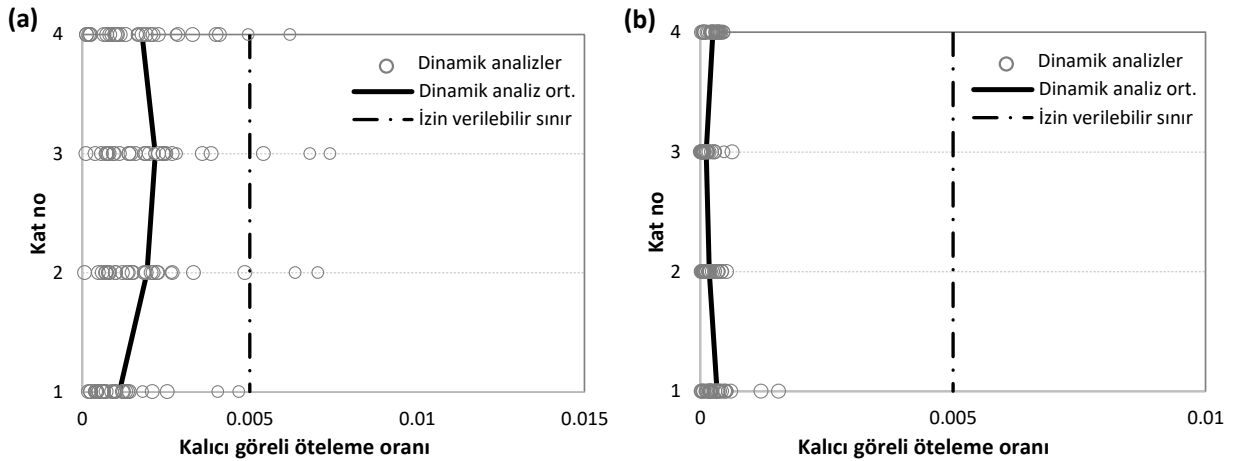
Şekil 12. DD1 deprem düzeyi için maksimum görelî öteleme oranları (a) MAÇ (b) MÇÇ

Periyot üst sınırının ve görelî ötelemelerin tasarımda etkili olmadığı MÇÇ’de, DD2 düzeyi depremlerde tasarım değerlerine çok yakın görelî öteleme değerleri elde edilirken, DD1 düzeyi depremlerde ortalama öteleme oranları tüm katlarda tasarım değerlerini aşmıştır (Şekil 11,12). Hatta 30 analizden elde edilen maksimum değerlerin en küçüğü dahi birinci kattaki tasarım değerini aşmıştır (Şekil 12). MÇÇ’de üst katlarda MAÇ’ye göre beklendiği gibi çok daha düşük öteleme oranları elde edilirken, birinci kattaki ötelemeler MAÇ ile aynı mertebeye ulaşmıştır (Şekil 12).

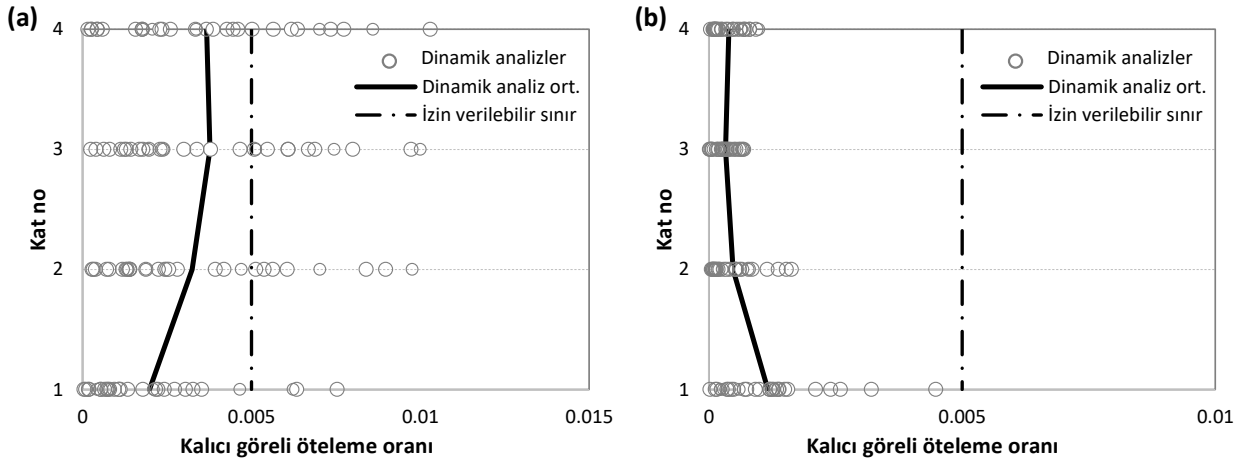
3.3 Kalıcı görelî öteleme oranları

DD2 ve DD1 deprem düzeylerine ait yer hareketleri için MAÇ ve MÇÇ’de elde edilen kalıcı yanal öteleme oranları Şekil 13 ve 14’de verilmiştir. Kalıcı öteleme değerleri, McCornik (2008) tarafından çeşitli kriterlere göre binanın deprem sonrası kullanılabilirliğinde üst sınır olarak önerilen 0.005’lik öteleme oranı esas alınarak değerlendirilmiştir. DD2 ve DD1 deprem düzeylerinin her

ikisi için de MAÇ ve MÇÇ sistem ortalama kalıcı öteleme oranları 0.005’lik sınırın altında kalmıştır. Elde edilen maksimum kalıcı ötelemeler bakımından değerlendirildiğinde; MÇÇ’de hiçbir deprem için 0.005’lik aşılmazken, MAÇ’de DD2 düzeyinde 3 deprem için, DD1 düzeyinde ise 8 deprem için 0.005’lik sınır önemli ölçüde aşılmıştır. Hatta DD1 düzeyinde birkaç deprem için kalıcı ötelemeler 0.01’lik değere ulaşmıştır (Şekil 14a). MAÇ’de en büyük ortalama kalıcı öteleme oranı DD2 ve DD1 düzeyi depremlerde sırasıyla 0.0022 ve 0.0038 olarak elde edilmiştir. MÇÇ’de ise en büyük ortalama kalıcı öteleme oranı sırasıyla 0.0003 ve 0.0012 olarak elde edilmiştir. MÇÇ sistemde çevrimsel davranışına ait gerçek test verisi bulunmayan çaprazlarda, burkulma sonrası davranışın kalıcı ötelemeler üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, ilk kullanılan model (Şekil 4, Model-1), burkulma sonrası sönmülenen enerji önemli oranda artırılacak şekilde revize edilmiş ve yeni bir model (Model-2) oluşturulmuştur (Şekil 15). Böylece burkulma sonrası karşılaşılabilecek farklı çevrimsel davranışlara ait bir zarfın göz önüne alınması amaçlanmıştır.



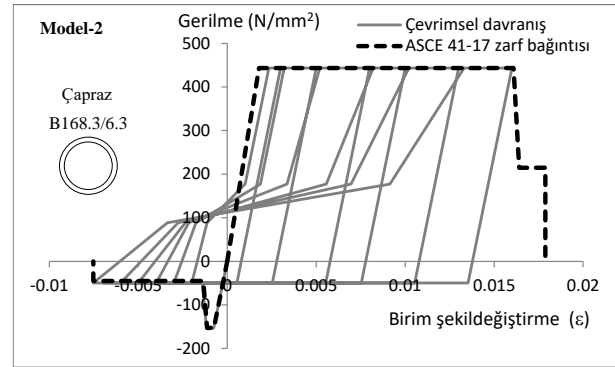
Şekil 13. DD2 düzeyi depremler için kalıcı görelî öteleme oranları (a) MAÇ (b) MÇÇ



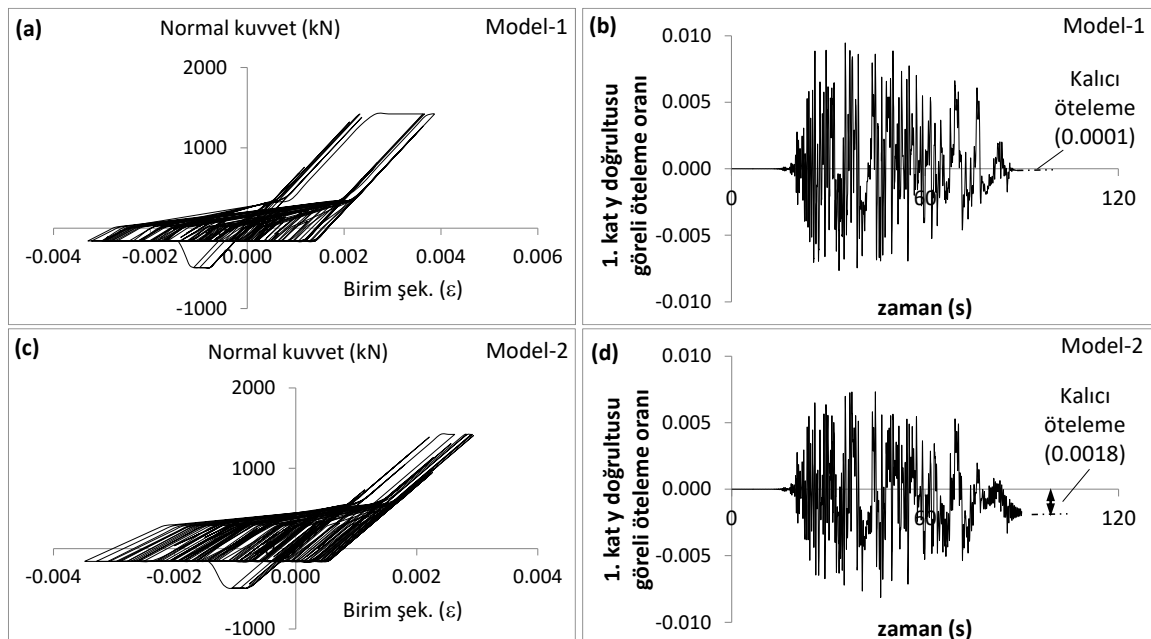
Şekil 14. DD1 düzeyi depremler için kalıcı görelî öteleme oranları (a) MAÇ (b) MÇÇ

Buna göre tüm analizler tekrarlanarak MÇÇ doğrultusundaki (y doğ.) kalıcı öteleme oranları, bir önceki kalıcı öteleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kayıt-1 için her iki modelden elde edilen 1. Kat y doğrultusundaki öteleme oranının değişimi örnek olarak Şekil 16'da gösterilmiştir. Düşük çevrimsel sönümlü çapraz davranışını temsil eden Model-1'de önemli bir kalıcı öteleme oluşmazken, yüksek çevrimsel sönümlü Model-2'de kalıcı öteleme artmıştır (Şekil 16d). Ortalama kalıcı ötelemelerde iki model farkının sebep olduğu değişimler, tüm depremler için Şekil 17'de gösterilmiştir. Model-2'nin kullanılması, tüm katlardaki kalıcı ötelemelerde yaklaşık iki kat artışa sebep olmuş, ancak ortalama kalıcı ötelemeler her iki deprem düzeyi için de izin verilebilir 0.005'lik sınırın oldukça altında kalmıştır (Şekil 17). DD1 düzeyi depremlerde, sadece bir deprem için maksimum kalıcı öteleme değeri 0.005'lik sınıra ulaşmıştır (Şekil 17b).

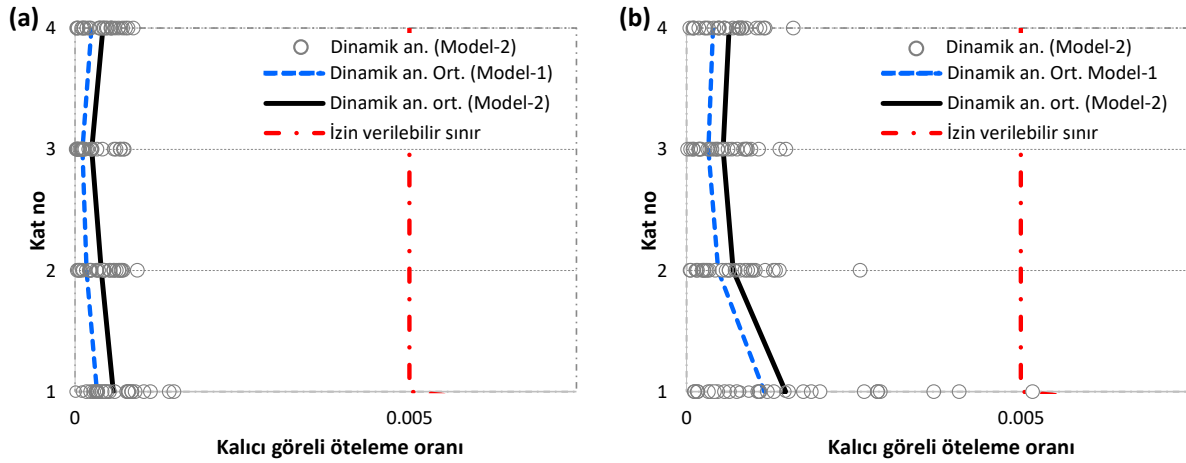
Buna göre, MÇÇ sistemde çaprazların narinliğine bağlı olan çevrimsel sönüm arttıkça kalıcı ötelemelerin de arttığı gözlenmektedir, ancak bu artışa rağmen kalıcı ötelemelerin MAÇ'ye göre çok düşük düzeyde kaldığı görülmektedir (Şekil 13a, 14a,17).



Şekil 15. Çapraz çevrimsel davranışı için Model-2



Şekil 16. Çapraz çevrimsel davranışları (a) Model-1 (c) Model-2 ve öteleme oranı değişimi (b) Model-1 (c) Model-2



Şekil 17. MÇÇ’de iki farklı çapraz modeli için elde edilen kalıcı ötelemelerin karşılaştırılması (a) DD2 için (b) DD1 için

4. Sonuçlar / Conclusions

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY) göre tasarlanmış çelik bir bina üzerinde, yönetmelikte yer alan temel performans düzeylerinin kalıcı yanal ötelemeler bakımından yeterlilikleri değerlendirilmiştir. Kalıcı öteleme potansiyelleri farklı olan MAÇ ve MÇÇ sistemlerinin kullanıldığı bina, tasarım depremini (DD2) ve maksimum depremi (DD1) temsil eden iki deprem yer hareketi grubu için incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Binanın deprem performansı TBDY’deki temel yaklaşım çerçevesinde değerlendirildiğinde; MAÇ doğrultusunda her iki deprem düzeyi için de yönetmelikte öngörülenin çok üzerinde olan Sınırlı Hasar performans düzeyi elde edilmiştir. Doğrusal olmayan dinamik analizlerden elde edilen maksimum görelî ötelemeler de buna paralel sonuçlar vermiştir. Bu aşırı emniyetli durumun oluşmasında, tasarımda kullanılan Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemindeki yaklaşıklığın, periyot üst sınırı uygulamasının ve görelî öteleme kriterinin önemli ölçüde etkili olduğu söylenebilmektedir. Buna göre, tasarımda mod birleştirme veya diğer dinamik yöntemlerin kullanılması veya periyot üst sınırının uygulanmaması halinde performans düzeyinin değişebileceği görülmektedir.

Binanın MÇÇ doğrultusundaki deprem performansı DD2 deprem düzeyi için Kontrollü Hasar elde edilerek yönetmelikte öngörülen hedefi sağlamıştır. DD1 düzeyi depremlerde ise bazı kayıtlar için göçmenin önlenmesi sınırı bir miktar aşılma ile birlikte, ortalama şekil değiştirmeler üzerinden yapılan değerlendirmede Kontrollü Hasar performans düzeyi elde edilmiştir. Yönetmelikte doğrudan belirtilmemekle birlikte, DD1 düzeyi için öngörülenin (Göçmenin Önlenmesi) üzerinde

performans elde edildiği belirlenmiştir. Ancak, DD1 düzeyi için elde edilen bu sonuç, Göçmenin Önlenmesi sınırı aşılma bazı basınç çaprazlarında şekil değiştirme kapasitesinin devam ettiği kabulüne dayanmaktadır. Bu gibi durumlarda değerlendirmenin nasıl yapılacağı konusunun ayrıca incelenmesinin ve TBDY’de yönlendirici kriterlere yer verilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir.

Binanın deprem sonrası kullanılabilirliği için referans alınan 0.005’lik kalıcı görelî öteleme sınırına göre yapılan değerlendirmelerde; binanın her iki taşıyıcı sisteminde de her iki deprem düzeyine ait ortalama değerler için sınırın sağlandığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, depremlerden elde edilen maksimum kalıcı ötelemeler MAÇ ve MÇÇ için karşılaştırıldığında; MAÇ sistemde bazı deprem kayıtları için 0.005’lik sınırın önemli ölçüde aşılabildiği, yani binanın deprem sonrası kullanılamaz hale gelme potansiyeli bulunduğu görülmüştür. Buna karşılık MÇÇ sistemde, DD1 düzeyinde dahi hiçbir depremde 0.005’lik sınırın aşılmadığı belirlenmiştir.

Taşıyıcı sistemlerin performans düzeyleri ve kalıcı öteleme oranları birlikte değerlendirildiğinde MAÇ ve MÇÇ sistem sonuçları arasında önemli farklılıklar görülmüştür. MAÇ sistemde, eleman hasar düzeylerine göre yapılan değerlendirmede aşırı güvenli sonuçlar elde edilmesine rağmen kalıcı öteleme oranları bakımından kabul edilebilir sınırların aşılabildiği belirlenmiştir. Buna karşılık, MÇÇ sistemde eleman hasar düzeyleri bakımından kritik sınırlara yaklaşıırken, kalıcı öteleme oranı kabul edilebilir sınırların çok altında kalmıştır. MAÇ ve MÇÇ sistemlerin kalıcı öteleme davranışları arasındaki farkın oluşmasında, MAÇ sistemlerin yanal ötelemeye duyarlılığının yanısıra elemanların çevrimsel davranış farklılıkları etkili olmuştur. MAÇ sistemdeki kiriş ve kolonlar rijitlik azalması içermeyen tam çevrimsel davranış gösterirken, MÇÇ

sistemdeki çaprazlar, basınç altında burkulmalı çevrimsel davranış göstermektedir. MÇÇ'de, basınç etkisindeki çapraz elemanların ortasında burkulma sonrası oluşan plastik mafsallar nedeniyle çevrimsel davranışta önemli rijitlik azalmaları oluşmakta, bu da kalıcı ötelemelerin düşük düzeyde kalmasını sağlamaktadır. Çalışmada, çaprazların çevrimsel davranışını temsil eden modelin kalıcı ötelemeler üzerindeki etkisi de kısmen incelenmiş ve modelde önemli değişiklik yapılmasına rağmen MÇÇ sistemdeki kalıcı ötelemelerin çok düşük düzeyde kaldığı gösterilmiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar, incelenen bina özellikleri ve yapılan varsayımlar çerçevesinde geçerlidir. Bununla birlikte sonuçlar, yönetmeliğe uygun olarak tasarlanan ve mevcut performans değerlendirme yaklaşımına (eleman hasar düzeylerine dayanan) göre incelenen binada, kalıcı yanal ötelemelerin kabul edilebilir sınırları aşma potansiyeli bulunduğunu göstermiştir. Kalıcı ötelemelerin, deprem karakteristiklerine ve bina taşıyıcı sistem özelliklerine duyarlı olması nedeniyle farklı bina modelleri ve deprem yer hareketleri için çok sayıda benzer çalışmanın yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada ihmal edilen bileşenlerin (kompozit döşeme etkisi, basit birleşimlerin çevrimsel davranışları vb.) etkileri de ayrıca incelenmelidir. Yapılacak çalışmaların mevcut performans esaslı yaklaşımların geliştirilmesine ve deprem sonrası ekonomik kayıpların azaltılmasına önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi/ Declaration of Ethical Standards

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı/ Credit Authorship Contribution Statement

Yazar 1: Araştırma, Metodoloji, Yorumlama, Yazma-orijinal taslak.

Yazar 2: Araştırma, Analiz, Grafikleme, Yorumlama, Yazma.

Çıkar Çatışması Beyanı/Declaration of Competing Interest

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

Verilerin Kullanılabilirliği/ Data Availability Statement

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

5. Kaynaklar / References

AFAD, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

AISC, 2010. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 341-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA.

Al-Atik L., Abrahamson N.A., 2010. An improved method for nonstationary spectral matching, *Earthquake Spectra*, Vol. 26, 6, 601-617.
<https://doi.org/10.1193/1.3459159>

Anderson JC, Fillipou FC, 1995. Dynamic response analysis of the 17-story canoga building, *SAC technical report 95-04*, 12-1-12-53.

ASCE, 2017. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings: ASCE Standard ASCE/SEI 41-17, American Society of Civil Engineers Reston, VA, USA.

ASCE, 2022. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers ASCE/SEI 7-2022, Reston, VA, USA.

Asgarkhani, N., Yakhchalian, M. and Mohebi, B., 2020. Evaluation of approximate methods for estimating residual drift demands in BRBFs. *Engineering Structures*, **224**, 110849.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110849>

ATC, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings: ATC 40, Vol. 1, Applied Technology Council, Washington DC., USA.

Basim, M.C, Pourreza, F., Mousazadeh, M. and Hamed, A.A., 2022. The effects of modeling uncertainties on the residual drift of steel structures under mainshock-aftershock sequences. *Structures*, **36**, 912-926.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.050>

Bruneau, M., Uang, C.M. and Sabelli, R. 2011, Ductile design of steel structures, Second edition, McGraw-Hill, 499-563.

Christopoulos, C., Pampanin, S. and Priestley, M. J. N., 2003. Performance-based seismic response of frame structures including residual deformations. Part I: Single degree of freedom systems, *Journal of Earthquake Engineering*, **7**, **1**, 97-118.
<https://doi.org/10.1080/13632460309350443>

Christopoulos, C. and Pampanin, S., 2004. Towards performance-based design of MDOF structures with explicit consideration on residual deformations. *ISET Journal of Earthquake Technology*, **41**, **1**, 53-73.

Comartin, C., Green, M., and Tubbesing, S., 1995. The Hyogoken-Nanbu Earthquake. Preliminary

- Reconnaissance Report, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland CA, USA.
- CSI, 2008. SAP2000 Structural Analysis Programs - User's Manual, Computers and Structures Berkeley California, USA.
- CSI, 2023. PERFORM-3D Computer Software. Computers and Structures, Berkeley, California, USA.
- ÇŞB, 2016. Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYDE), Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Ankara.
- Eguchi R.T., Goltz J.D. and Taylor C.E., 1998. Direct economic losses in the Northridge Earthquake: A Three-Year Post-Event Perspective. *Earthquake Spectra*, 14, 2, 245-264.
<https://doi.org/10.1193/1.1585998>
- Erochko J., Christopoulos C., Tremblay R. and Choi H., 2011. Residual drift response of SMRFs and BRB frames in steel buildings designed according to ASCE 7-05. *Journal of Structural Engineering*, 137, 5, 589-599.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000296](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000296)
- FEMA, 1997. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings: FEMA 273, Federal Emergency Management Agency Washington, D.C., USA.
- Garlock, M., Ricles, J. and Sause, R., 2005. Experimental studies of full scale posttensioned steel connections. *Journal of Structural Engineering*, 131, 3, 438-448.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:3\(438](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:3(438)
- Hancock J., Bommer J.J. and Stafford P.J., 2008. Numbers of scaled and matched accelerograms required for inelastic dynamic analyses. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37, 1585-1607.
<https://doi.org/10.1002/eqe.827>
- Hu, S., Wang, W. and Qu, B., 2020. Seismic economic losses in mid-rise steel buildings with conventional and emerging lateral force resisting systems. *Engineering Structures*, 204, 110021.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110021>
- Kamaris, G.S., Papavasileiou, G.S., Kamperidis, V.C. and Vasdravellis, G., 2022. Residual drift risk of self-centering steel MRFs with novel steel column bases in near-fault regions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 162, 107391.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107391>
- Kim, H.-J. and Christopoulos, C., 2008. Friction damped posttensioned self-centering steel moment-resisting frames. *Journal of Structural Engineering*, 134, 11, 1768-1779.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:11\(1768](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:11(1768)
- McCormick, J., Aburano, H., Ikenaga, M., and Nakashima, M., 2008. Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements. Proc. 14th World Conf. Earthquake Engineering, Seismological Press of China, Beijing, 05-06-0071.
- Narayan, S., Shrimali, M., Bharti, S.D. and Datta, T.K., 2023. Effects of aftershocks on the performance of steel building frames. *Structures*, 56, 104959.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104959>
- Pampanin, S., Christopoulos, C., and Priestley, M. J. N., 2003. Performance-based seismic response of frame structures including residual deformations. Part II: Multi-degree of freedom systems. *Journal of Earthquake Engineering*, 7, 1, 119-147.
<https://doi.org/10.1080/13632460309350444>
- PEER, 2009. Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings, prepared by the Tall Buildings Initiative Guidelines Working Group for the Pacific Earthquake Engineering Research Center, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Pettinga, D., Christopoulos, C., Pampanin, S., and Priestley, N. 2007. Effectiveness of simple approaches in mitigating residual deformations in buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36, 12, 1763-1783.
<https://doi.org/10.1002/eqe.717>
- Ramirez C.M. and Miranda E., 2012. Significance of residual drifts in building earthquake loss estimation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41, 11, 1477-1493

<https://doi.org/10.1002/eqe.2217>

Ruiz-Garcia, J. and Miranda, E., 2006a. Evaluation of residual drift demands in regular multi-story frames for performance-based seismic assessment. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**, 1609–1629.

<https://doi.org/10.1002/eqe.593>

Ruiz-Garcia, J. and Miranda, E., 2006b. Residual displacement ratios for assessment of existing structures." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**, 315–336.

<https://doi.org/10.1002/eqe.523>

SeismoMatch, 2023. A program for spectral matching of earthquake records, Seismosoft-Earthquake Engineering Software Solutions.

SEOAC, 1995. Performance Based Seismic Engineering of Buildings: Vision 2000, Structural Engineers Association of California, USA.

Tremblay, R., Lacerte, M. and Christopoulos, C. (2008). Seismic response of multistory buildings with self-centering energy dissipative steel braces. *Journal of Structural Engineering*, **134**, **1**, 108–120.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(108\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(108))

Wu, C.-L., Loh, C.-H., Yang, Y.-S. and Lin, C. H., 2004. Consideration of collapse and residual deformation in reliability-based performance evaluation of buildings. Proc. 13th World Conf. on Earthquake Engineering, Canadian Association for Earthquake Engineering (CAEE), Vancouver, Canada, 716.

İnternet kaynakları

1-<https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases> (05.01.2023)

Şiddet-Süre-Frekans Bağlılıkları için Ağırlıklı Süperpozisyon Çekme İtme Algoritmasında Farklı Kaotik Harita Performanslarının Karşılaştırılması

*Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 13.11.2023
Kabul/Accepted: 07.05.2024
Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Comparison of Different Chaotic Maps Performance in Weighted Superposition Attraction Repulsion Algorithm For Intensity–Duration–Frequency Relations

Mümin Emre ŞENOL^{1*} , Mustafa Erkan TURAN² , Tülin ÇETİN² 

¹Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

²Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu çalışmada, Ağırlıklı Süper Pozisyon Çekme İtme (Weighted Superposition Attraction Repulsion, WSAR) algoritmasında kaotik haritaların literatürde ilk defa kullanılarak kaotik WSAR versiyonlarının geliştirilmesi ve algoritmanın performansına olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, standart WSAR algoritmasına ait adım fonksiyonu yerine 11 adet bir boyutlu kaotik haritaların kullanılmasıyla WSAR algoritmasının çeşitli kaotik versiyonları oluşturulmuştur. Yağmur suyu kanalizasyonu ve menfez gibi su yapılarının tasarım debilerinin belirlenmesinde kullanılan şiddet-süre-frekans (ŞSF) bağıntılarına ait parametrelerin belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Toplamda 16 adet ŞSF bağıntılarına ait parametreler, İzmir meteoroloji istasyonunun verileri kullanılarak belirlenmiştir. Performans ölçütü olarak ortalama kare hata değeri (MSE) seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ŞSF bağıntıları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın varlığı gözlemlenmiştir. Bu fark, belirli bir ŞSF bağıntısının kullanılmasının diğer ŞSF bağıntılarının kullanılmasına kıyasla algoritmanın performansı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Kaotik haritaların algoritmanın performansına etkisi incelendiğinde ise, bazı ŞSF bağıntılarında standart WSAR algoritmasının adım fonksiyonu yerine kaotik haritaların kullanılmasının algoritmanın performansı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki oluşturduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: WSAR; Kaotik haritalar; Şiddet-süre-frekans eğrileri; Parametre tahmini.

Abstract

In this study, it is aimed to develop chaotic Weighted Superposition Attraction Repulsion (WSAR) versions by using chaotic maps for the first time in the literature in the WSAR algorithm and to examine their effect on the performance of the algorithm. For this purpose, various chaotic versions of the WSAR algorithm were created by employing 11 one-dimensional chaotic maps instead of the standard WSAR algorithm's step function. The problem of determining the parameters of intensity-duration-frequency (IDF) relationships used in designing water structures such as storm sewer systems and culverts was addressed. A total of 16 parameters related to IDF relationships were determined using data from the Izmir meteorological station. The mean squared error (MSE) was selected as the performance criterion. According to the obtained results, a statistically significant difference was observed among the IDF relationships. This difference highlighted that the use of a specific IDF relationship had a statistically significant effect on the algorithm's performance compared to using other IDF relationships. When the impact of chaotic maps on the algorithm's performance was examined, it was observed that the use of chaotic maps instead of the standard WSAR algorithm's step function in some IDF relationships had a statistically significant effect on the algorithm's performance.

Keywords: WSAR; Chaotic maps; Intensity-duration-frequency curves; Parameter estimation.

1. Giriş

Metasezgisel algoritmalar optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilen yöntemlerden biridir. Metasezgisel algoritmalar problemin kesin çözümünü garanti etmemekle birlikte en iyi veya en iyiye yakın çözümü üretmektedirler. En iyi çözümü garanti etmemesi gibi dezavantajı bulunmakta ancak problemin tipine özgü

olmaması, doğrusal olmayan ve türevlenemeyen problemler için sonuç üretmesi gibi avantajları da bulunmaktadır.

Metasezgisel algoritmalar çözüm uzayında sonuca keşif ve yerel arama aşamaları ile ulaşır. Keşif aşaması çözüm uzayının geniş olarak taranmasını, yerel arama aşaması ise

keşif aşamasında taranan bölgelerde daha uygun çözümün aranmasıdır. Keşif aşamasında yerel minimumundan kaçınmak için rastgelelik fazla iken, yerel arama aşamasında rastgelelik azalmaktadır. Algoritmanın başarısı bu iki aşama arasındaki dengeye bağlıdır. Algoritmanın keşif aşamasının güçlendirilmesi yerel arama aşamasındaki performansını düşürmekte, öte yandan yerel arama aşamasının performansının artırılması da keşif aşamasının performansını düşürmektedir (Lozano ve García-Martínez 2010).

Bu iki aşamayı iyileştirmek için kaotik harita olarak adlandırılan stratejiler önerilmektedir. Rastgele süreç kullanılarak üretilen seriler ile kaotik haritalar kullanılarak üretilen seriler arasında benzerlik olduğu düşünülse de, kaotik süreçle elde edilen seriler deterministik, dinamik, tekrarlı olmayan ve bir sınıra yakınsamayan değerlerdir (Kaveh ve Yosefpour 2023).

Kaveh vd. (2022), su buharlaşması optimizasyonu, yapay arı algoritması, emperyalist rekabet algoritması ve kurbağa sıçrama algoritması olmak üzere dört adet kaotik optimizasyon algoritması kullanarak büyük ölçekli kafes yapıların optimizasyonunu yapmışlardır. Lojistik ve Gauss kaotik haritaları kullanarak optimizasyon algoritmalarının performansındaki değişimi araştırmışlardır. Çalışmada ele alınan uygulamaların çoğunda kaotik haritaların kullanıldığı algoritmalar daha iyi performans göstermiştir.

Kaveh ve Yosefpour (2023), rezonansın önlenmesi için dinamik kısıtlar altında kafes yapıların optimizasyonu problemini ele almışlardır. Bu problemin çözümünde, su buharlaşması optimizasyonu, halat çekme optimizasyonu ve termal değişim optimizasyonu algoritmaları kullanılarak kaotik haritaların algoritmanın performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışmadaki uygulamaların çoğunda kaotik algoritmalar, standart algoritmalara göre daha iyi performans göstermiştir.

El-Shorbagy ve Al-Drees (2023), sinüs kosinüs algoritmasında lojistik kaotik haritasını kullanmışlardır. Farklı test fonksiyonları ile kaotik ve standart algoritmanın performans değerlerini karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, kaotik sinüs kosinüs algoritması standart algoritmaya kıyasla daha iyi performans göstermiştir.

He vd. (2009), geliştirilmiş lojistik, Chebyshev ve ICMIC kaotik haritalarını parçacık sürü optimizasyonu algoritmasında kullanarak kademeli hidroelektrik sistemin uzun vadeli planlamasını yapmışlardır. Kaotik harita kullanılan parçacık sürü optimizasyonu algoritmalarının

daha iyi performans gösterdiği sonucunu elde etmişlerdir (He vd. 2009).

Bu çalışmalar dışında balina optimizasyonu algoritması (Tanyıldızı vd. 2017), ateşböceği algoritması (Karaçizmeli vd. 2019), denizati optimizasyonu algoritması (Altunbey Özbay ve Özbay 2022), kartal optimizasyonu algoritması (Aydemir 2022), yılan optimizasyonu algoritması (Yıldızdan 2023) ve başka birçok metasezgisel algoritmada kaotik haritalar kullanılmıştır.

Yukarıda incelenen çalışmalar kaotik haritaların kullanımının çoğu uygulamada metasezgisel algoritmaların performansını arttırdığını göstermektedir.

Su kaynaklarının geliştirilmesi çalışmalarının, sudan faydalanma, suyun yol açacağı zararlardan korunma ve su kalitesini koruma amaçları için yapılan mühendislik çalışmaları kapsamında su yapıları ortaya çıkmaktadır. Özellikle yerleşim bölgelerinde yapılan yağmur suyu kanalizasyonu, menfez ve benzeri yapıların tasarımı, yaşanabilecek can kaybı ve maddi kayıpların önlenmesi açısından önemlidir. Bu yapıların tasarımında, Şiddet-Süre-Frekans (SSF) ilişkileri kullanılarak tasarım debileri belirlenmektedir (Öztekin 2011).

Şiddet, süre ve frekans arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla ampirik veya istatistiksel denklemler geliştirilmiştir. Bu denklemlerde yağış şiddeti, yağışın süresi ile yağışın frekansının bir fonksiyonu olarak ifade edilir. İlgili denklemlerde zaman ve konuma bağlı değişkenlik gösteren parametreler bulunmaktadır. İlişkinin tanımlanabilmesi için bu parametrelerin belirlenmesi gereklidir. Parametrelerin belirlenmesi için modelin türüne göre istatistiksel parametre tahmini, doğrusal regresyon, doğrusal olmayan regresyon veya optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır (Gomes ve Vargas Júnior 2018).

SSF bağıntılarına ait parametrelerin belirlenmesinde metasezgisel algoritmaların kullanıldığı çalışmalarda genetik algoritma (Karahana vd. 2007), armoni arama optimizasyon algoritması (Karahana vd. 2008), parçacık sürü optimizasyonu (Başakın vd. 2022), diferansiyel gelişim algoritması (Geem ve Roper 2010, Karahana 2011), kompozit diferansiyel gelişim algoritması (Karahana, 2012, Karahana 2019), yapay bağışıklık sistemi algoritması (Eryiğit ve Karahana, 2013) ve yapay arı kolonisi algoritması (Görkemli vd. 2022, Karahana vd. 2007) kullanılmıştır. Bahsedilen çalışmaların bazılarında farklı istatistiksel ve ampirik SSF fonksiyonlarının parametrelerinin

belirlenmesinin yanında veri sayısının algoritma performansına etkisi de incelenmiştir. Ayrıca bazı çalışmalarda meteoroloji istasyonu bazlı veriler kullanılarak noktasal ilişki modellenirken, bazı çalışmalarda ise birden fazla meteoroloji istasyonunun verileri kullanılarak bölgesel ilişkiler modellenmeye çalışılmıştır.

Ağırlıklı Süperpozisyon Çekme İtme (WSAR) Baykasoğlu tarafından 2021'de önerilmiş bir metasezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Literatürde çeşitli problemlere başarıyla uygulanmıştır. Örneğin Baykasoğlu ve Baykasoğlu, (2021)'de kafes yapılarının optimum tasarımı için WSAR algoritmasını kullanmışlardır. Bir diğer çalışmada ise akış tipi atölye çizelgeleme problemi için WSAR algoritması kullanılmıştır (Baykasoğlu ve Şenol 2022). Ek olarak, bir diğer çalışmada ise sürekli kısıtsiz optimizasyon problemlerinin çözümü için WSAR algoritmasından yararlanılmıştır (Şenol ve Baykasoğlu 2022).

Bu çalışmada WSAR algoritmasının performansına, bir boyutlu farklı kaotik haritaların etkisi araştırılmıştır. Standart WSAR algoritmasının adım fonksiyonu yerine kaotik haritalar kullanılmıştır. Böylece literatürde ilk defa kaotik WSAR algoritması geliştirilerek kullanılmıştır. Test problemi olarak farklı ŞSF bağıntılarına ait parametrelerin belirlenmesi problemi seçilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde kullanılan ŞSF bağıntıları, kaotik haritalar ve Ağırlıklı Süperpozisyon Çekme İtme (WSAR) metasezgisel optimizasyon algoritması tanıtılmıştır.

2.1 Şiddet-Süre-Frekans (ŞSF) Bağlılıları

ŞSF bağıntıları yağış şiddeti, süre ve frekans arasındaki ilişkiyi ifade etmek için kullanılırlar. Bu bağıntılar yardımıyla yağış şiddeti (I) değeri, frekansın (T) ve yağış süresinin (t) bir fonksiyonu olarak elde edilir. Fonksiyonda zamana ve konuma bağlı olarak değişen parametreler bulunur. Çalışmada hem ampirik hem de istatistiksel ŞSF bağıntıları ele alınmıştır.

Çalışmada kullanılan tüm ŞSF bağıntıları Çizelge 1'de verilmiştir. Ampirik denklemler Denklem 1-12 arasında, istatistiksel denklemler ise Denklem 13-16 arasında verilmiştir. Bu denklemler literatürdeki farklı çalışmalarda önerilmiş ve kullanılmışlardır (Karahana 2012, Citakoğlu ve Demir 2023).

Burada I (mm/dakika) yağış şiddetini, T dönüş süresini (yıl), t yağış süresini (dakika), a_i denklem parametrelerini ifade eder.

2.2 Kaotik Haritalar

Kaos, Lorenz tarafından 1963'te tanıtıldığından bu yana çeşitli bilimsel alanlarda birçok uygulama alanı bulmuştur (Lorenz 1963). Kaos, özünde belirli koşullar altında çalışan deterministik doğrusal olmayan sistemler tarafından sergilenen düzensiz ve görünüşte tahmin edilemeyen bir hareket biçimini temsil eder (Mingjun ve Huanwen 2004). Kaotik bir sistem içinde, başlangıç koşullarında bile küçük bir uyumsuzluk sonunda önemli farklılıklara yol açabilir. Kaos kavramı genellikle kaotik haritalar kullanılarak tanımlanır ve modellenir, bunlar sürekli değerlere sahip dinamik ayrık zaman fonksiyonları olan haritalardır.

Bu çalışmada, bir boyutlu kaotik haritalar kullanılmıştır. Bu haritalar literatürde sıkça uygulama alanı bulur ve Denklem 17 kullanılarak tanımlanabilir.

$$x_{n+1} = \beta(x_n) \quad (17)$$

Burada x_{n+1} x' 'in ardışık iterasyonları, β ileri dönüşüm eşleme fonksiyonu olarak kullanılır.

Bu çalışmada, WSAR'ın komşu çözümler üretmek için kullandığı rasgele sayı üretici yerine farklı 11 adet bir boyutlu kaotik harita kullanılmıştır. Kullanılan kaotik haritalara ait denklemler Çizelge 2'de verilmiştir. Kullanılan kaotik haritalar sırasıyla lojistik harita Denklem 18'de, sinüzoidal harita Denklem 19'da, çadır harita Denklem 20'de, Chebychev harita Denklem 21'de, çember harita Denklem 22'de, Gauss harita Denklem 23'te, sonsuz çöküşlü iteratif kaotik harita (ICMIC) Denklem 24'te, kübik harita Denklem 25'te, aralıklı harita Denklem 26'da, Liebovitch harita Denklem 27'de, parçalı harita Denklem 28'de verilmiştir.

2.3 Ağırlıklı Süperpozisyon Çekme İtme (Weighted Superposition Attraction and Repulsion - WSAR) Algoritması

Ağırlıklı Süperpozisyon Çekme İtme (WSAR) Algoritması karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümü için tasarlanmış güncel bir sürü zekâsı temelli metasezgisel algoritmadır. Bu algoritma, (Baykasoğlu ve Akpınar 2015, Baykasoğlu ve Akpınar 2017) tarafından geliştirilen Ağırlıklı Süperpozisyon Çekme (WSA) algoritmasının itici süperpozisyon eklenerek güncellenmiş halidir (Baykasoğlu 2021).

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan ŞSF bağıntıları.

	$I = \frac{a_0 T^{a_1}}{t^{a_2}}$	(1)
	$I = \frac{a_0 T^{a_1}}{(a_2 + t^{a_3})^{a_4}}$	(2)
	$I = \frac{\sum_{i=0}^m a_i [\ln(T)]^i}{(a_{m+1} + t^{m+2})^{m+3}}, m = 4 \text{ için}$	(3)
	$I = \frac{\sum_{i=0}^m a_i [\ln(T)]^i}{\sum_{i=0}^m a_{((m+1)+i)} [\ln(t)]^i}, m = 4 \text{ için}$	(4)
	$I = \frac{(a_0 T^{a_1})}{(t + a_2)^{a_3}}$	(5)
Ampirik Denklemler	$I = \frac{(a_0 T^{a_1})}{(t^{a_2} + a_3)}$	(6)
	$I = \frac{(a_0 + a_1 \ln T)}{t^{a_2}}$	(7)
	$I = \frac{(a_0 + a_1 \ln T)}{(t^{a_2} + a_3)}$	(8)
	$I = \frac{(a_0 + a_1 \ln T)}{(t + a_2)^{a_3}}$	(9)
	$I = \frac{(a_0 + a_1 \ln(\ln T))}{(t + a_2)^{a_3}}$	(10)
	$I = \frac{(a_0 + a_1 \ln(\ln T))}{t^{a_2}}$	(11)
	$I = \frac{(a_0 + a_1 \ln(\ln T))}{(t^{a_2} + a_3)}$	(12)
	$I = a_0 \frac{a_1 - \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{(a_2 + t^{a_3})^{a_4}}$	(Gumbel dağılımı) (13)
İstatistiksel Denklemler	$I = \frac{a_0 \left[a_1 + \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{-a_2} \right]}{(a_3 + t^{a_4})^{a_5}}$	(GED dağılımı) (14)
	$I = \frac{a_0 (a_1 + \ln(T))}{(a_2 + t^{a_3})^{a_4}}$	(Üstel dağılım) (15)
	$I = \frac{a_0 (a_1 + T^{a_2})}{(a_3 + t^{a_4})^{a_5}}$	(Pareto dağılımı) (16)

WSAR klasik fizik prensiplerini, özellikle de "süperpozisyon prensibini" ve "parçacıkların çekilme ve itilme hareketlerini" içermektedir. WSAR, bireylerin mevcut popülasyonundan iki süperpozisyon oluşturur: Çekici süperpozisyon (ÇS) ve itici süperpozisyon (İS). ÇS, bireyleri çekerken, İS onları kendi konumundan iter. Bu süperpozisyonlar, arama doğrultusunu belirler. WSAR algoritması üç temel adımdan oluşur: başlatma,

süperpozisyon belirleme ve çözüm vektörlerini hareket ettirme. Algoritmanın sözde kodu aşağıda Algoritma 1'de verilmiştir. Algoritmanın aşamalarıyla ilgili detaylı bilgi Baykasoğlu (2021)'de bulunabilir. Algoritmanın çözümleri hareket ettirme aşaması başka bir deyişle arama aşamasında algoritmada kullanılan rastgeleliği içeren adımlar Denklem 29-30'da verilmiştir.

Algoritma 1. WSAR Algoritması

1. Parametreleri belirle
2. Başlangıç popülasyonunu rastgele oluştur ve en iyi uygunluk değeri ile en iyi bireyi belirle
3. $i = 1$ // iterasyon sayacı
- While** $i \leq$ Maksimum iterasyon
 - 3.1 Bireyleri uygunluk değerlerine göre "en iyiden en kötüye" ve "en kötünden en iyiye" sırala
 - 3.2 Her bireye sıralarına göre ağırlıklar ata
 - 3.3 En iyi ve en kötü ağırlıklara dayalı olarak iki süperpozisyon (ÇS, İS) belirle
 - 3.4 Süperpozisyonların uygunluğunu hesapla
 - 3.5 Eğer İS, daha iyi uygunluk değerine sahipse ÇS'yi İS ile değiştir
 - 3.6 ÇS'yi ve onun uygunluk değerini göz önünde bulundurarak her birey için arama yönünü belirle
 - 3.7 Her bireyi belirlenen yöne doğru taşı
 - 3.8 Her bireyin uygunluk değerini hesapla ve en iyi uygunluk değeri ve en iyi bireyi güncelle
 - $i = i + 1$
4. **End While**

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan Kaotik Harita denklemleri.

Kaotik Harita Adı	Kaotik Harita Denklemi		
Lojistik Harita	$x_{n+1} = \varphi x_n(1 - x_n)$	$0 < \varphi \leq 4$ $x_n \in (0,1)$	(18)
Sinüzoidal Harita	$x_{n+1} = \sin(\pi x_n)$	$x_n \in (0,1)$	(19)
Çadır Harita	$x_{n+1} = \begin{cases} \frac{x_n}{0.7} & x_n < 0.7 \\ \left(\frac{10}{3}\right)x_n(1 - x_n) & x_n \geq 0.7 \end{cases}$	$x_n \in (0,1)$	(20)
Chebychev Harita	$x_{n+1} = \cos(\varphi \cos^{-1}x_n)$	$\varphi > 0$ $x_n \in [-1,1]$	(21)
Çember Harita	$x_{n+1} = x_n + \vartheta - \left(\frac{\tau}{2\pi}\right) \sin(2\pi x_n) \text{ mod}(1)$	$x_n \in (0,1)$	(22)
Gauss Harita	$x_{n+1} = \begin{cases} 0 & x_n = 0 \\ \frac{1}{x_n} - [1/x_n] & x_n \neq 0 \end{cases}$	$x_n \in (0,1)$	(23)
Sonsuz Çöküşlü İteratif Kaotik Harita (ICMIC)	$x_{n+1} = \sin(\alpha/x_n)$	$\alpha \in (0, \infty)$ $x_n \in (-1,1)$	(24)
Kübik Harita	$x_{n+1} = \rho x_n(1 - x_n^2)$	$x_n \in (0,1)$	(25)
Aralıklı Harita	$x_{n+1} = \begin{cases} e + x_n + cx_n^m & 0 < x_n \leq d \\ \frac{x_n - d}{1 - d} & d < x_n < 1 \end{cases}$	$x_n \in (0,1)$	(26)
Liebovitch Harita	$x_{n+1} = \begin{cases} \frac{\alpha x_n}{p_2 - x_n} & 0 < x_n < p \\ \frac{p_2 - x_n}{p_2 - p_1} & p_2 < x_n \leq p_2 \\ 1 - \beta(1 - x_n) & p_2 < x_n \leq 1 - p \end{cases}$	$x_n \in (0,1),$ $\alpha = \frac{p_2(1 - (p_2 - p_1))}{p_1}$ $\beta = \frac{(p_2 - 1) - p_1((p_2 - p_1))}{p_2^{-1}}$	(27)
Parçalı Harita	$x_{n+1} = \begin{cases} \frac{x_n}{p} & 0 < x_n < p \\ \frac{x_n - p}{0.5 - p'} & p < x_n < 0.5 \\ \frac{(1 - p - x_n)}{0.5 - p} & 0.5 \leq x_n < 1 - p \\ \frac{(1 - x_n)}{p} & 1 - p < x_n < 1 \end{cases}$	$x_n \in (0,1)$ $p \in (0,0.5)$	(28)

$$x_{ij}(t + 1) = x_{ij}(t) + ss(t) * \text{unifrnd}(-1,1) * |x_{(r1)j}(t) - x_{(r2)j}(t)| \quad (29)$$

$$ss(t + 1) = \begin{cases} ss(t) - e^{-\frac{t}{t+1}} * \varphi_{step} * ss(t) & \text{if rand}(0,1) \leq \mu \\ ss(t) + e^{-\frac{t}{t+1}} * \varphi_{step} * ss(t) & \text{if rand}(0,1) > \mu \end{cases} \quad (30)$$

Denklem 29'da verilen $x_{ij}(t)$, t 'inci iterasyonda birey i 'nin boyut j 'deki pozisyon değerini temsil eder. Yapılan çalışmada rastgelelik içeren Denklem 30'da verilen $ss(t)$ fonksiyonu yerine Denklem 18 ile 28 arasında verilen kaotik haritalara ait fonksiyonlar kullanılmıştır. Böylece standart WSAR algoritması, literatürde ilk defa kaotik WSAR algoritması haline getirilmiştir.

2.4 ŞSF Bağıntılarının Parametrelerinin Belirlenmesi

ŞSF bağıntılarına ait parametreleri belirleyebilmek için standart süre (t) ve ampirik dönüş süre (T) verilerine

ihtiyaç duyulmaktadır. Ampirik dönüş süre değerlerini hesaplamak için frekans analizi yapılmalıdır. Frekans analizi için öncelikle; istasyona ait standart süreli yıllık maksimum yağış değerlerinden standart süreli yağış şiddeti değerleri hesaplanır. Yağış şiddeti değerlerinin hesaplanmasından sonra her standart süre için ayrı ayrı maksimum yağış şiddeti değerleri küçükten büyüğe sıralanır ve sıra numarası (m_j) atanır. Daha sonra yağış şiddetlerine ait aşılma olasılıkları hesaplanır. Bu çalışmada aşılma olasılıklarının (F_{ij}) hesaplanması için Denklem 31'de verilen Gringorten denklemi kullanılmıştır.

$$F_{ij} = \frac{m_j+0.12}{L-0.44} j = 1,2,3, \dots, N; i = 1,2,3, \dots, L \quad (31)$$

Burada m_j sıra numarasını, L gözlem yapılan yıl sayısını, N standart süre sayısını göstermektedir. Son olarak ise aşılma olasılıkları ile Denklem 32 kullanılarak ampirik dönüş süreleri (T_{ij}) hesaplanır.

$$T_{ij} = \frac{1}{1-F_{ij}} i = 1,2,3, \dots, N; j = 1,2,3, \dots, L \quad (32)$$

Gerekli tüm veriler hesaplandıktan sonra, ŞSF bağıntılarına ait parametreler WSAR algoritması ile belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu olarak Denklem 33'te verilen ortalama kare hata fonksiyonu kullanılmıştır.

$$\min MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{ölçülen_i} - I_{Hesap_i})^2 \quad (33)$$

Burada MSE ortalama kare hata değerini, $I_{ölçülen_i}$ ölçülen yağış şiddeti değerini, I_{Hesap_i} ŞSF bağıntısından hesaplanan yağış şiddeti değerini, N ise veri sayısını ifade etmektedir.

3. Bulgular

Bu çalışmada, Karahan vd. (2007)'de verilen İzmir meteoroloji istasyonunun 1938-1987 yıllarına ait standart süreli 50 yıllık maksimum yağış verileri kullanılmıştır. Verilere ve verilere ait istatistiklere ilgili yayından ulaşılabilir. Bu verilerin seçilmesindeki amaç, Karahan vd. (2007)'de ve Karahan (2012)'de verilen sonuçlarla karşılaştırarak önerilen yöntemin doğruluğunu test edebilmektir. WSAR algoritmasının parametreleri olarak popülasyon büyüklüğü 10, τ değeri olarak ise 0.8 seçilmiştir. Durdurma kriteri olarak kullanılan maksimum iterasyon sayısı 1000'dir.

Sonuçları istatistiksel açıdan değerlendirebilmek amacıyla her bir ŞSF bağıntısı ile her bir adım fonksiyonu için 30 bağımsız deneme yapılmıştır. Başka bir deyişle 16 ŞSF bağıntısı ile 11 kaotik harita ve 1 standart adım fonksiyonu için toplam 5760 bağımsız deneme yapılmıştır. Optimizasyon algoritmasında karar değişkenleri için kullanılan alt ve üst sınırlar Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Her denkleme ait karar değişkenlerinin alt ve üst sınırları.

Denklemler	No.	Karar Değişkenleri									
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉
1	Min.	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
	Mak.	10	1	1	-	-	-	-	-	-	-
2	Min.	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-
	Mak.	10	1	5	1	1	-	-	-	-	-
3	Min.	-10	-10	-10	-10	-10	0	0	0	-	-
	Mak.	10	10	10	10	10	10	2	2	-	-
4	Min.	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
	Mak.	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
5	Min.	-10	-1	0	0	-	-	-	-	-	-
	Mak.	10	1	5	2	-	-	-	-	-	-
6	Min.	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
	Mak.	10	1	1	10	-	-	-	-	-	-
7	Min.	-10	-10	0	-	-	-	-	-	-	-
	Mak.	10	10	2	-	-	-	-	-	-	-
8	Min.	-10	-10	0	-10	-	-	-	-	-	-
	Mak.	10	10	2	10	-	-	-	-	-	-
9	Min.	-10	-10	0	0	-	-	-	-	-	-
	Mak.	10	10	5	2	-	-	-	-	-	-
10	Min.	-10	-10	0	0	-	-	-	-	-	-
	Mak.	10	10	5	2	-	-	-	-	-	-
11	Min.	-10	-10	0	-	-	-	-	-	-	-
	Mak.	10	10	2	-	-	-	-	-	-	-
12	Min.	-10	-10	0	-10	-	-	-	-	-	-
	Mak.	10	10	2	10	-	-	-	-	-	-
13	Min.	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-
	Mak.	10	10	5	2	2	-	-	-	-	-
14	Min.	0	-1	-1	0	0	0	-	-	-	-
	Mak.	20	1	0	5	2	2	-	-	-	-
15	Min.	0	-10	0	0	0	-	-	-	-	-
	Mak.	10	10	10	1	1	-	-	-	-	-
16	Min.	0	-1	0	0	0	0	-	-	-	-
	Mak.	20	1	1	10	2	2	-	-	-	-

Çizelge 4. İstatistiksel sonuçlar.

ŞSF Denk. No.	Adım Fonksiyonları												Karahan (2012) PSO-RIDF/GA-RIDF	Karahan (2007) GA			
	Denk. 30	Denk. 18	Denk. 19	Denk. 20	Denk. 21	Denk. 22	Denk. 23	Denk. 24	Denk. 25	Denk. 26	Denk. 27	Denk. 28					
1	En iyi	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045
	Ortalama	0,0057	0,0053	0,0069	0,0069	0,0078	0,0092	0,0064	0,0053	0,0066	0,0050	0,0060	0,0062				
	En kötü	0,0156	0,0157	0,0237	0,0473	0,0339	0,1239	0,0252	0,0162	0,0175	0,0094	0,0174	0,0243				
2	Std. Sap.	0,0023	0,0023	0,0051	0,0086	0,0067	0,0218	0,0044	0,0025	0,0039	0,0011	0,0032	0,0050				
	En iyi	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038
	Ortalama	0,0075	0,0085	0,0092	0,0084	0,0133	0,0121	0,0077	0,0072	0,0043	0,0104	0,0112	0,0050				
3	En kötü	0,0492	0,1112	0,0813	0,1039	0,0981	0,1609	0,0429	0,0729	0,0069	0,1434	0,1120	0,0145				
	Std. Sap.	0,0095	0,0195	0,0155	0,0184	0,0228	0,0300	0,0082	0,0129	0,0008	0,0266	0,0201	0,0026				
	En iyi	0,0029	0,0022	0,0028	0,0032	0,0018	0,0025	0,0042	0,0018	0,0021	0,0021	0,0031	0,0025	0,0014/0,0026			0,0026
4	Ortalama	0,1650	0,1580	0,1246	0,1493	0,0937	0,1462	0,1448	0,1661	0,1116	0,1296	0,1529	0,1389				
	En kötü	0,3227	0,3220	0,3218	0,3197	0,3167	0,3232	0,3986	0,3207	0,3213	0,3304	0,3235	0,3328				
	Std. Sap.	0,1354	0,1394	0,1388	0,1343	0,1220	0,1325	0,1470	0,1390	0,1335	0,1349	0,1385	0,1360				
5	En iyi	0,0057	0,0047	0,0090	0,0323	0,0046	0,0019	0,0071	0,0071	0,0059	0,0046	0,0172	0,0149	0,0015/0,0015			0,0013
	Ortalama	0,1017	0,0864	0,0873	0,1255	0,0793	0,0768	0,0875	0,0892	0,0817	0,0939	0,1144	0,1123				
	En kötü	0,3299	0,2472	0,2707	0,2362	0,2554	0,1790	0,2223	0,2309	0,1798	0,1887	0,2410	0,2421				
6	Std. Sap.	0,0864	0,0572	0,0623	0,0533	0,0545	0,0510	0,0534	0,0644	0,0529	0,0536	0,0535	0,0521				
	En iyi	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	*			*
	Ortalama	0,0093	0,0159	0,0092	0,0095	0,0167	0,0114	0,0257	0,0149	0,0172	0,0118	0,0119	0,0084	*			*
7	En kötü	0,0314	0,2037	0,0348	0,0745	0,2148	0,0401	0,2507	0,1530	0,1632	0,1279	0,0359	0,0446	*			*
	Std. Sap.	0,0067	0,0370	0,0082	0,0144	0,0381	0,0092	0,0594	0,0289	0,0398	0,0226	0,0078	0,0082	*			*
	En iyi	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	*			*
8	Ortalama	0,0052	0,0049	0,0055	0,0055	0,0059	0,0056	0,0046	0,0049	0,0051	0,0050	0,0054	0,0052	*			*
	En kötü	0,0189	0,0138	0,0307	0,0241	0,0613	0,0181	0,0122	0,0117	0,0117	0,0186	0,0163	0,0161	*			*
	Std. Sap.	0,0030	0,0026	0,0053	0,0042	0,0105	0,0032	0,0017	0,0021	0,0024	0,0029	0,0033	0,0027	*			*
9	En iyi	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	*			*
	Ortalama	0,0172	0,0190	0,0308	0,0186	0,0205	0,0205	0,0211	0,0211	0,0206	0,0251	0,0318	0,0301	*			*
	En kötü	0,0627	0,0766	0,0778	0,0780	0,0551	0,0617	0,0736	0,0734	0,0601	0,0742	0,0700	0,0780	*			*
10	Std. Sap.	0,0176	0,0215	0,0199	0,0214	0,0188	0,0180	0,0222	0,0240	0,0202	0,0221	0,0219	0,0204	*			*
	En iyi	0,0028	0,0025	0,0025	0,0030	0,0025	0,0027	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0026	0,0025	*			*
	Ortalama	0,0043	0,0044	0,0042	0,0041	0,0038	0,0040	0,0040	0,0040	0,0037	0,0036	0,0043	0,0044	*			*
11	En kötü	0,0058	0,0057	0,0057	0,0059	0,0057	0,0058	0,0090	0,0056	0,0053	0,0056	0,0067	0,0060	*			*
	Std. Sap.	0,0011	0,0009	0,0011	0,0009	0,0010	0,0009	0,0013	0,0009	0,0008	0,0010	0,0010	0,0010	*			*
	En iyi	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	*			*
12	Ortalama	0,0073	0,0073	0,0088	0,0063	0,0056	0,0105	0,0067	0,0080	0,0086	0,0083	0,0095	0,0093	*			*
	En kötü	0,0167	0,0195	0,0255	0,0166	0,0161	0,0383	0,0221	0,0393	0,0256	0,0235	0,0401	0,0253	*			*
	Std. Sap.	0,0046	0,0051	0,0063	0,0038	0,0042	0,0081	0,0055	0,0070	0,0053	0,0059	0,0080	0,0062	*			*
13	En iyi	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	*			*
	Ortalama	0,0309	0,0184	0,0225	0,0202	0,0190	0,0213	0,0272	0,0219	0,0266	0,0217	0,0247	0,0282	*			*
	En kötü	0,2308	0,0280	0,1316	0,0920	0,0376	0,1206	0,2177	0,1093	0,2507	0,0789	0,1218	0,2507	*			*
14	Std. Sap.	0,0445	0,0026	0,0210	0,0137	0,0041	0,0190	0,0369	0,0171	0,0427	0,0120	0,0203	0,0445	*			*
	En iyi	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	*			*
	Ortalama	0,0262	0,0384	0,0313	0,0250	0,0403	0,0363	0,0387	0,0249	0,0301	0,0271	0,0349	0,0282	*			*
15	En kötü	0,0502	0,2748	0,1236	0,0408	0,2145	0,2662	0,1762	0,0410	0,0420	0,0505	0,1558	0,0410	*			*
	Std. Sap.	0,0099	0,0461	0,0202	0,0093	0,0463	0,0443	0,0309	0,0082	0,0090	0,0105	0,0261	0,0082	*			*
	En iyi	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	0,0167	*			*
16	Ortalama	0,0352	0,0357	0,0451	0,0270	0,0354	0,0405	0,0240	0,0213	0,0288	0,0293	0,0337	0,0265	*			*
	En kötü	0,1051	0,2134	0,1317	0,0956	0,2388	0,1700	0,0951	0,0667	0,1116	0,0956	0,0957	0,0956	*			*
	Std. Sap.	0,0286	0,0407	0,0348	0,0184	0,0437	0,0394	0,0174	0,0121	0,0245	0,0211	0,0293	0,0226	*			*
17	En iyi	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031/0,0031			0,0031
	Ortalama	0,0056	0,0061	0,0034	0,0067	0,0039	0,0045	0,0048	0,0039	0,0040	0,0059	0,0063	0,0041	*			*
	En kötü	0,0291	0,0300	0,0070	0,0402	0,0178	0,0129	0,0240	0,0114	0,0193	0,0430	0,0220	0,0155	*			*
18	Std. Sap.	0,0052	0,0067	0,0007	0,0080	0,0027	0,0028	0,0044	0,0019	0,0029	0,0080	0,0052	0,0024	*			*
	En iyi	0,0044	0,0200	0,0058	0,0268	0,0282	0,0228	0,0093	0,0175	0,0132	0,0131	0,0180	0,0128	0,0015/0,0015			0,0015
	Ortalama	0,0474	0,0523	0,0512	0,0505	0,0514	0,0508	0,0494	0,0504	0,0485	0,0519	0,0478	0,0507	*			*
19	En kötü	0,0689	0,0776	0,0548	0,0550	0,0568	0,0623	0,0702	0,0602	0,0545	0,0547	0,0563	0,0547	*			*
	Std. Sap.	0,0173	0,0085	0,0096	0,0081	0,0071	0,0076	0,0120	0,0086	0,0121	0,0087	0,0124	0,0090	*			*
	En iyi	0,0025	0,0025	0,0025	0,0026	0,0025	0,0026	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025/0,0025			*
20	Ortalama	0,0234	0,0201	0,0612	0,0150	0,0143	0,0152	0,0138	0,0192	0,0314	0,0239	0,0278	0,0220	*			*
	En kötü	0,1424	0,2093	1,3054	0,0351	0,0657	0,0518	0,0455	0,1480	0,1802	0,2122	0,1793	0,1159	*			*
	Std. Sap.	0,0285	0,0386	0,2357	0,0130	0,0174	0,0164	0,0119	0,0276	0,0389	0,0390	0,0402	0,0292	*			*
21	En iyi	0,0027	0,0029	0,0026	0,0040	0,0026	0,0028	0,0029	0,0026	0,0027	0,0025	0,0040	0,0026	0,0024/0,0027			*
	Ortalama	0,0058	0,0102	0,0050	0,0061	0,0051	0,0054	0,0080	0,0050	0,0058	0,0051	0,0095	0,0063	*			*
	En kötü	0,0210	0,0889	0,0105	0,0108	0,0071	0,0067	0,0347	0,0082	0,0183	0,0069	0,0700	0,0240	*			*
22	Std. Sap.	0,0031	0,0157	0,0017	0,0015	0,0012	0,0009	0,0077	0,0014	0,0027	0,0012	0,0121	0,0036	*			*

* İle belirtilen alanlardaki sonuçlar ilgili yayınlarda hesaplanmadığı

Çizelge 5'te tüm ŞSF bağıntıları için en küçük MSE değerlerinin elde edildiği parametre kümeleri verilmiştir. ŞSF bağıntılarını ortalama performans değerlerine göre karşılaştırmak için Friedman testi yapılmıştır ve testin sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 5. En iyi sonuçlar için karar değişkenleri değerleri.

ŞSF D.No	Adım F.D.No	Karar Değişkenleri									
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉
1	30	2,808	0,304	0,589	-	-	-	-	-	-	-
2	22	5,356	0,305	1,859	0,725	1,000	-	-	-	-	-
3	21	8,390	7,959	-0,255	-0,600	0,140	1,910	0,508	1,627	-	-
4	22	10,000	8,254	0,762	-0,982	0,181	5,323	2,809	0,634	-0,158	0,124
5	24	4,410	0,305	2,852	0,694	-	-	-	-	-	-
6	21	5,399	0,305	0,726	1,889	-	-	-	-	-	-
7	21	2,352	1,643	0,590	-	-	-	-	-	-	-
8	24	4,428	3,106	0,723	1,806	-	-	-	-	-	-
9	26	3,634	2,549	2,738	0,691	-	-	-	-	-	-
10	24	6,769	1,590	2,351	0,682	-	-	-	-	-	-
11	30	4,622	1,085	0,594	-	-	-	-	-	-	-
12	21	8,105	1,904	0,711	1,523	-	-	-	-	-	-
13	25	3,997	2,588	1,415	0,474	1,678	-	-	-	-	-
14	30	1,693	0,982	0,400	0,378	1,733	0,339	-	-	-	-
15	18	2,947	1,423	1,946	0,777	0,919	-	-	-	-	-
16	26	16,398	-0,739	0,132	1,552	0,733	0,956	-	-	-	-

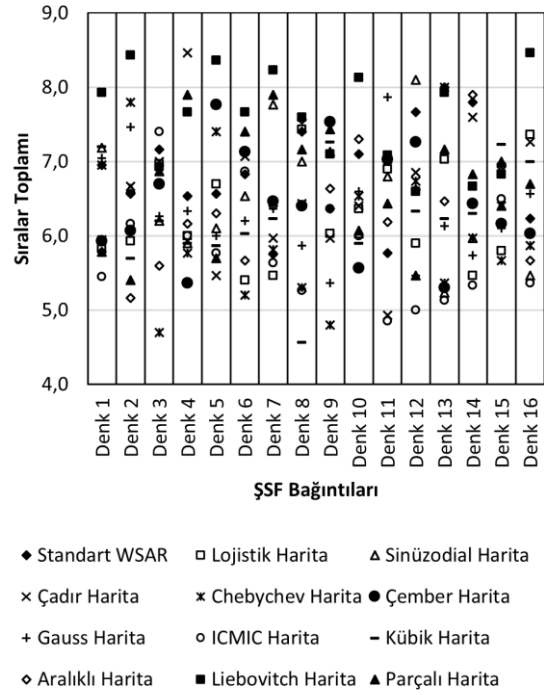
Friedman testi sonuçlarına göre en başarılı ŞSF bağıntısı Denklem 8'de verilen ŞSF bağıntısı olurken, Denklem 13'te verilen ŞSF bağıntısı ikinci sırada yer almıştır.

Çizelge 6. ŞSF bağıntıları için Friedman ve Wilcoxon test sonuçları.

Friedman testiyle elde edilen ortalama sıralamalar		Wilcoxon işaret sıralama testi Denklem 8 vs diğer denklemler	
Denklem No	Sıralar Toplamı	Denklem 8 vs.	p-değeri
Denklem 1	4,5000 (4)	Denklem 1	0,000488
Denklem 2	6,1667 (7)	Denklem 2	0,000488
Denklem 3	16,0000 (16)	Denklem 3	0,000488
Denklem 4	15,0000 (15)	Denklem 4	0,000488
Denklem 5	8,1667 (8)	Denklem 5	0,000488
Denklem 6	3,0833 (3)	Denklem 6	0,000488
Denklem 7	10,2500 (10)	Denklem 7	0,000488
Denklem 8	1,1667 (1)	Denklem 9	0,006836
Denklem 9	5,8333 (6)	Denklem 10	0,000488
Denklem 10	10,5000 (11)	Denklem 11	0,000488
Denklem 11	12,1667 (13)	Denklem 12	0,000488
Denklem 12	11,8333 (12)	Denklem 13	0,012207
Denklem 13	2,8333 (2)	Denklem 14	0,000488
Denklem 14	13,9167 (14)	Denklem 15	0,000488
Denklem 15	10,0000 (9)	Denklem 16	0,000488
Denklem 16	4,5834 (5)		

Friedman testine ek olarak, farklı ŞSF bağıntısı kullanmanın istatistiksel açıdan anlamlı olup olmadığını test etmek için Wilcoxon işaret testi uygulanmıştır. Test sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir. Wilcoxon testi sonuçları 0.05 anlamlılık düzeyinde değerlendirildiğinde Denklem 8'de verilen ŞSF bağıntısını kullanmanın, diğer ŞSF bağıntılarını kullanmaktan istatistiksel olarak anlamlı olduğu ortaya çıkmıştır. Standart WSAR algoritmasında kullanılan adım fonksiyonu ve diğer kaotik haritaların Friedman test sonuçları Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'e

göre ICMIC haritası 16 ŞSF bağıntısının 6 tanesinde en iyi sonucu vermiştir.



Şekil 1. Kaotik haritalar için Friedman testi sonuçları.

Farklı kaotik harita kullanmanın performans üzerinde istatistiksel olarak anlamlı fark yaratıp yaratmadığını belirlemek için Wilcoxon işaret testi yapılmıştır. Bu teste ait sonuçlar Çizelge 7'de verilmiştir. Şekildeki sütunlar ŞSF bağıntılarını, satırlar ise kaotik haritaları temsil etmektedir. Eğer kaotik harita ile ŞSF bağıntısının kesiştiği hücre siyah renkte ise ilgili kaotik haritanın ilgili ŞSF bağıntısında en iyi performansı gösterdiği anlaşılmaktadır. Kesişen hücre taralı ise ilgili ŞSF bağıntısında ilgili kaotik haritanın ele alınan ŞSF bağıntısında en iyi performans gösteren kaotik harita ile 0.05 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir farkının olmadığı anlaşılmaktadır. Kesişen hücre boş ise ilgili ŞSF bağıntısında ilgili kaotik haritanın ele alınan ŞSF bağıntısında en iyi performans gösteren kaotik harita ile 0.05 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir farkının olduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 7 standart WSAR algoritması açısından incelendiğinde ise, kullanılan 16 ŞSF bağıntısının 5'inde WSAR algoritmasının adım fonksiyonu yerine kaotik harita kullanılmasının performans üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşturduğu gözlemlenmiştir. Başka bir deyişle 11 farklı kaotik WSAR algoritmasının performansı standart WSAR algoritmasıyla karşılaştırıldığında, 5 farklı ŞSF'de ilgili ŞSF'de en iyi performans gösteren kaotik WSAR algoritmasının performansının standart WSAR algoritmasının performansına göre istatistiksel olarak daha başarılıdır.

Çizelge 7. Adım fonksiyonlarının Wilcoxon testi sonuçları.

Adım Fonk.	ŞSF Bağlılıları															
	Denk.1	Denk.2	Denk.3	Denk.4	Denk.5	Denk.6	Denk.7	Denk.8	Denk.9	Denk.10	Denk.11	Denk.12	Denk.13	Denk.14	Denk.15	Denk.16
Std. WSAR 30																
Lojistik 18																
Sinüs 19																
Çadır 20																
Chebyshev 21																
Daire 22																
Gauss 23																
Icmic 24																
Kübik 25																
Aralıklı 26																
Leibovitch 27																
Parçalı 28																

İlgili ŞSF bağliısında en iyi performans gösteren kaotik harita
İlgili ŞSF bağliısında en iyi performans gösteren kaotik harita ile ilgili ŞSF bağliısında kullanılan kaotik haritaların 0.05 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak farkı yoktur.
İlgili ŞSF bağliısında en iyi performans gösteren kaotik harita ile ilgili ŞSF bağliısında kullanılan kaotik haritaların 0.05 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak farkı vardır.

Her bir ŞSF bağliısında standart WSAR algoritması ile kaotik WSAR algoritmalarının performanslarını daha derinlemesine kıyaslamak için Wilcoxon testi kullanılmıştır. Sonuçlar Çizelge 8’de verilmiştir. Çizelge 8’de kaotik WSAR versiyonu ile ilgili ŞSF bağliısının kesiştiği hücre boş ise, ilgili ŞSF bağliısında kaotik WSAR versiyonunun performansı ile standart WSAR performansı arasında 0.05 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak fark yoktur anlamına gelmektedir. Eğer kesiştiği hücre siyah renkte ise, ilgili ŞSF bağliısında kaotik WSAR versiyonunun performansı standart WSAR performansından 0.05 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak daha başarılıdır anlamına gelmektedir.

Çizelge 8. Standart WSAR algoritmasının kaotik WSAR versiyonlarıyla karşılaştırılması (Wilcoxon testi sonuçları).

Standart WSAR vs.	ŞSF Bağlılıları															
	Denk.1	Denk.2	Denk.3	Denk.4	Denk.5	Denk.6	Denk.7	Denk.8	Denk.9	Denk.10	Denk.11	Denk.12	Denk.13	Denk.14	Denk.15	Denk.16
Lojistik 18																
Sinüs 19																
Çadır 20																
Chebyshev 21																
Daire 22																
Gauss 23																
Icmic 24																
Kübik 25																
Aralıklı 26																
Leibovitch 27																
Parçalı 28																

İlgili ŞSF bağliısında kaotik WSAR versiyonunun performansı ile standart WSAR performansı arasında 0.05 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak farkı yoktur.
İlgili ŞSF bağliısında kaotik WSAR versiyonunun performansı standart WSAR performansından 0.05 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak daha başarılıdır.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada WSAR algoritmasında kaotik haritaların kullanımının algoritmanın performansına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla standart WSAR algoritmasına ait adım fonksiyonu yerine 11 adet bir boyutlu kaotik harita kullanılarak WSAR algoritmasının farklı kaotik versiyonları elde edilmiştir. Literatürden seçilen 16 adet ŞSF bağliısına ait parametreler WSAR algoritmasının oluşturulan tüm versiyonları ile belirlenmiştir. İlk olarak elde edilen performans değerlerine göre ŞSF bağliıları kıyaslanmıştır. İstatistiksel olarak Denklem 8 ile ifade edilen ŞSF bağliısının diğer bağliılardan daha iyi performansla sahip olduğu sonucu elde edilmiştir. Daha sonra WSAR algoritmasının versiyonları standart WSAR algoritmasıyla ve kendi aralarında kıyaslanmıştır. Kaotik haritalı versiyonların bazı ŞSF bağliıları için standart WSAR algoritmasından istatistiksel açıdan anlamlı derecede daha iyi performansla sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kullanılan ŞSF bağliılarının her biri ayrı ayrı değerlendirildiğinde, kaotik haritanın performansının kullanılan ŞSF bağliısıyla yüksek derecede ilişkili olduğu sonucuna varılabilir.

Ele alınan problem kısıtsız bir optimizasyon problemidir. Daha sonra yapılacak çalışmalarda, WSAR algoritması ile kısıtlı optimizasyon problemlerinin çözümünde kaotik haritaların kullanımının performansla etkisi araştırılabilir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Deneysel Tasarım, Doğrulama, Analiz, Yorumlama, Yazma-Orijinal Taslak, Yazma-İnceleme ve Düzenleme, Görselleştirme.

Yazar 2: Kavramsallaştırma, Metodoloji-Çalışma, Doğrulama, Yorumlama, Araştırma, Yazma-Orijinal taslak, Yazma-İnceleme ve Düzenleme, Görselleştirme.

Yazar 3: Metodoloji-Çalışma, Doğrulama, Yorumlama, Araştırma, Yazma-Orijinal Taslak, Yazma-İnceleme ve Düzenleme.

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

Yazarlar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan ederler.

5. Kaynaklar

Aydemir, S.B., 2022. Küresel optimizasyon için gauss kaotik haritası ile kartal optimizasyonu. *Firat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **34(1)**, 85–104.

<https://doi.org/10.35234/fumbd.969335>

- Başakın, E. E., Ekmekcioğlu, Ö., Özger, M., and Çıtakoğlu, H., 2021. Determination of Intensity-Duration-Frequency Relation by Particle Swarm Optimization and Genetic Programming. *II. International Applied Statistics Conference (UYIK-2021) (pp.1-8)*. Tokat, Turkey.
- Baykasoğlu, A., 2021. Optimising cutting conditions for minimising cutting time in multi-pass milling via weighted superposition attraction-repulsion (WSAR) algorithm. *International Journal of Production Research*, **59(15)**, 4633–4648.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1767313>
- Baykasoğlu, A., and Akpınar, Ş., 2015. Weighted superposition attraction (WSA): a swarm intelligence algorithm for optimization problems–Part 2: constrained optimization. *Applied Soft Computing Journal*, **37**, 396–415.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.036>
- Baykasoğlu, A., and Akpınar, Ş., 2017. Weighted Superposition Attraction (WSA): A swarm intelligence algorithm for optimization problems – Part 1: Unconstrained optimization. *Applied Soft Computing Journal*, **56**, 520–540.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.08.052>
- Baykasoğlu, A., and Baykasoğlu, C., 2021. Weighted superposition attraction-repulsion (WSAR) algorithm for truss optimization with multiple frequency constraints. *Structures*, **30**, 253–264.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.017>
- Baykasoğlu, A., and Şenol, M. E., 2021. Parallel WSAR for solving permutation flow shop scheduling problem. *In Computer Sciences & Mathematics Forum*, **2(1)**.
- El-Shorbagy, M. A., and Al-Drees, F. M., 2023. Studying the effect of introducing chaotic search on improving the performance of the sine cosine algorithm to solve optimization problems and nonlinear system of equations. *Mathematics*, **11(5)**.
<https://doi.org/10.3390/math11051231>
- Eryiğit M, Karahan H., 2013. *Şiddet-Süre-Frekans bağıntısının yapay bağıklık algoritması kullanılarak belirlenmesi*. VII. Ulusal Hidroloji Kongresi, Isparta, Türkiye, 325-342.
- Geem, Z. W., and Roper, W. E., 2010. Various continuous harmony search algorithms for web-based hydrologic parameter optimisation. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, **1(3)**, 213-226.
- Gomes, G. J. C., and Vargas Júnior, E. do A., 2018. A coupled system based on differential evolution for the determination of rainfall intensity equations. *RBRH*, **23(0)**.
<https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170165>
- Görkemli, B., Citakoglu, H., Haktanir, T., and Karaboga, D., 2022. A new method based on artificial bee colony programming for the regional standardized intensity–duration–frequency relationship. *Arabian Journal of Geosciences*, **15(3)**.
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-09377-1>
- He, Y. Y., Zhou, J. Z., Xiang, X. Q., Chen, H., and Qin, H., 2009. Comparison of different chaotic maps in particle swarm optimization algorithm for long-term cascaded hydroelectric system scheduling. *Chaos, Solitons and Fractals*, **42(5)**, 3169–3176.
<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2009.04.019>
- Karaçizmeli, İ. H., Kaya, S., and Gümüşçü, A., 2019. Hibrit ateşböceği ve parçacık sürü algoritmasının kaotik haritalar ile iyileştirilmesi. *Harran University Journal Of Engineering*, **4(2)**, 69–78.
- Karahan H, 2011. Bölgesel Yağış-Şiddet-Süre-Frekans Bağlılıklarının Diferansiyel Gelişim Algoritması Kullanılarak Elde Edilmesi. *TÜBİTAK (108Y299), Sonuç Raporu*.
- Karahan, H., 2012. Determining rainfall-intensity-duration-frequency relationship using Particle Swarm Optimization. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **16(4)**, 667–675.
<https://doi.org/10.1007/s12205-012-1076-9>
- Karahan, H., 2019. Determination of homogeneous sub-regions by using intensity-duration-frequency relationships and cluster analysis: an application for the aegean region. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, **25(8)**, 998–1013.
<https://doi.org/10.5505/pajes.2019.09365>
- Karahan, H., Ceylan, H., and Ayvaz, MT., 2007. Predicting rainfall intensity using a genetic algorithm approach. *Hydrological Processes*, **21(4)**, 470–475.
<https://doi.org/10.1002/hyp.6245>
- Karahan, H., Ayvaz, M. T., and Gürarlan, G., 2008. Şiddet-süre-frekans bağıntısının genetik algoritma ile belirlenmesi: GAP örneği. *Teknik Dergi*, **19(92)**, 4393-4407.
- Kaveh, A., and Yosefpour, H., 2023. Comparison of three chaotic meta-heuristic algorithms for the optimal design of truss structures with frequency constraints. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **67(4)**, 1130–1151.
<https://doi.org/10.3311/PPci.22594>

- Kaveh, A., Zarfam, P., Aziminejad, A., and Yosefpoor, H., 2022. Comparison of four chaotic meta-heuristic algorithms for optimal design of large-scale truss structures. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, **46(6)**, 4067–4091. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00908-8>
- Lorenz, E. N., 1963. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of atmospheric sciences*, **20(2)**, 130-141.
- Lozano, M., and García-Martínez, C., 2010. Hybrid metaheuristics with evolutionary algorithms specializing in intensification and diversification: Overview and progress report. *Computers and Operations Research*, **37(3)**, 481–497. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.02.010>
- Mingjun, J., and Huanwen, T., 2004. Application of chaos in simulated annealing. *Chaos, Solitons and Fractals*, **21(4)**, 933–941. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2003.12.032>
- Özbay Altunbey F., and Özbay, E., 2022. Kaotik denizati optimizasyon algoritması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **(44)**, 51-58. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1216396>
- Şenol, M. E., and Baykasoğlu, A., 2022. Coalition of metaheuristics through parallel computing for solving unconstrained continuous optimization problems. *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, **39(8)**, 2895–2927. <https://doi.org/10.1108/EC-10-2021-0612>
- Tanyıldızı, E., and Cigali, T., 2017. Kaotik haritalı balina optimizasyon algoritmaları. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* **29(1)**, 307-317.
- Yıldızdan, G., 2023. Chaotic snake optimizer. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **23(5)**, 1122-1141.

İnşaat Mühendisleri için Açılan İş İlanlarının Metin Madenciliği ile Değerlendirilmesi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 27.11.2023

Kabul/Accepted: 13.05.2023

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Evaluation of Job Advertisements for Civil Engineers with Text Mining

Hakan ÖZBAŞARAN*^{ID}, Gökçenur TAŞCI^{ID}, Mert TUNA^{ID}, İpek KARATAŞ^{ID}, Arif ÇELİK^{ID}, Mesut GÜMÜŞ^{ID}
Mert BİRŞEN^{ID}

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu çalışmanın amacı, inşaat mühendisleri için açılan güncel iş ilanlarında aranan temel becerileri tespit etmek ve kariyer yolculuğuna yeni başlayacak inşaat mühendisleri için faydalı bir kaynak oluşturmaktır. Bu amaç doğrultusunda, çeşitli internet sitelerinde inşaat mühendisleri için verilen toplam 1374 benzersiz iş ilanı toplanarak metin madenciliği yöntemleri ile incelenmiştir. Web sitelerinden toplanan veri önce ön işleme tabi tutularak normalize edilmiş ve temizlenmiştir. Temizlenmiş veriye ait unigram, bigram ve trigram analizleri sunularak en sık tekrarlanan kelime ve kelime öbekleri tartışılmıştır. Temizlenmiş veride geçen kelimeler hiyerarşik kümeleme ile kümelere ayrılmış ve her kümede frekansı en yüksek olan kelimeler dikkate alınarak güncel iş ilanlarında aranan adayın profili belirlenmeye çalışılmıştır. Hiyerarşik kümeleme yoluyla çıkarılan bilgiye dayanarak, ideal adayın kişisel özellikleri, çalışma biçimi, teknoloji okuryazarlığı seviyesi, saha becerileri ve ofis becerileri belirlenmeye çalışılmıştır. İnşaat mühendisleri için verilen güncel iş ilanlarının genel yapısını okuyucular ile paylaşabilmek için yapay zekâ ile tipik bir iş ilanı oluşturulmuştur. Teknik bilgiden önce gelen beceriler ve tecrübeli aday kısır döngüsü gibi önemli bulgular ise son kısımda özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnşaat mühendisliği; İş ilanı; Metin madenciliği; N-gram; Hiyerarşik kümeleme; ChatGPT.

Abstract

The purpose of this study is to identify the essential skills sought in current job advertisements for civil engineers and to create a useful reference for junior civil engineers embarking on their career journey. In line with this objective, a total of 1374 unique job advertisements for civil engineers were collected from various websites and analyzed using text mining methods. The collected data from websites were first subjected to preprocessing, normalized, and cleaned. Unigram, bigram, and trigram analyses of the cleaned data were presented, discussing the most frequently repeated words and phrases. The words in the cleaned data were clustered through hierarchical clustering, and profiles of candidates sought in current job postings were attempted to be determined by considering the words with the highest frequencies in each cluster. Based on the information extracted through hierarchical clustering, the personal characteristics, working style, technological literacy level, field skills, and office skills of an ideal candidate were attempted to be determined. Finally, a typical job advertisement was generated by artificial intelligence to share the general structure of current job advertisements for civil engineers with the readers. The crucial findings, such as skills taking precedence over technical knowledge and the experienced candidate paradox, are summarized in the last section.

Keywords: Civil engineering; Job advertisement; Text mining; N-gram; Hierarchical clustering; ChatGPT.

1. Giriş

İş ilanı, bir şirket veya işverenin, ihtiyaç duyduğu bir pozisyon hakkında hedef kitlesini bilgilendirmek ve uygun nitelikteki adayları aramak için yayınladığı bir duyuru veya reklamdır. Haberleşmenin dijital ortamda yapılmadığı zamanlarda kişisel bağlantılar, gazeteler ve dergiler ile duyurulan iş ilanları, gelişen teknoloji ile internet siteleri, sosyal medya, danışmanlık firmaları ve iş fırsatı platformları üzerinden daha geniş kitlelere ulaştırılarak işgücü pazarında önemli bir role sahip olmuştur. Bu

durum işletmelere işe alım sürecini hızlandırma imkânı sağlarken, diğer taraftan adaylar da kendilerine yönelik iş ilanlarını kolayca takip edebilmekte ve zaman tasarrufu sağlayabilmektedirler. Günümüzde iş ilanları genellikle bir yapılandırılmış kısım ve bir serbest metin alanı olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Yapılandırılmış kısım her iş ilanında belirtilen temel başlıkları (tecrübe ve askerlik durumu gibi) içerir. Serbest kısımda ise işverene ait kısa tanıtım, aranan pozisyon için gereksinimler ve yapılacak işin tanımı yer almaktadır. Son yıllarda, çeşitli meslek

grupları için açılan iş ilanlarının değerlendirilmesi üzerine azımsanmayacak sayıda Türkçe çalışma yayımlanmıştır.

Beltekin (2014) iş ilanları yoluyla işgücü talebi ve eğitim ilişkisini eğitim ekonomisi kuramları çerçevesinde incelemiştir. İş ilanlarında işgücü talebi ve eğitim arasındaki ilişkiye dair “eğitim sermayedir, eğitim işgücünün potansiyelini gösterir ve eğitim eleme içindir” olmak üzere üç tema saptanmıştır. Erdem ve Gezen (2014) Türkiye’deki turizm işletmelerine yönelik iş ilanlarını içerik analizi yöntemiyle incelemiştir. Otel işletmelerinde en çok eleman aranan ilk üç departmanın ön büro, yiyecek-içecek ve kat hizmetleri olduğunu tespit etmişlerdir. Birçok turizm işletmesinin, nitelikli iş görenleri bünyelerine katmaya çalıştıkları ve böylece daha fazla rekabetçi kalmayı hedefledikleri sonucuna ulaşmışlardır. Çoban (2016) iş ilanları sitelerinde çalışma deneyimi olmayan üniversite mezunlarına uygun 500 iş ilanını içerik analizi yöntemiyle incelemiştir. İş ilanlarında aranan kriterler beş ana temaya ayrılmış ve bu temalara yapılan vurgulardan yola çıkılarak iş ilanlarında beklenen çalışan profilinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Üniversiteden mezun olmanın değerinin geçmişe kıyasla daha düşük olduğu ve mezuniyet sonrası sertifika, seminerlere katılma ve deneyim kazanmak için daha vasıfsız işlerde çalışmanın önemli olduğundan söz edilmiştir. Üniversite mezunlarının akademik başarılarından ziyade, teknik başarılarının, insan ilişkilerinin ve motivasyonlarının daha çok karşılaşılan başlıklar olduğu sonucuna varılmıştır. Özen Kutunis ve Çetinel (2016) kariyer.net sitesi üzerinden yayımlanan 158 adet bankacılık sektöründe yöneticilik pozisyonuna ait iş ilanını içerik analizi yöntemiyle inceleyerek, ilan içeriklerinin belirli cinsiyet özelliklerine göre hazırlanıp hazırlanmadığını araştırmışlardır. Çalışmada, kadınların çalıştıkları yerlerin halen eril özelliklerini korumaya devam ettiği sonucuna ve iş ilanlarında aranan niteliklerin de bunun yansıması olarak eril nitelikler taşıdığı bulgusuna ulaşılmıştır. Kadınların üst düzey çalışma oranını araştırmak için bankacılık sektörü örneği verilmiş olup, Türkiye’de faaliyet gösteren bankaların 47 genel müdürünün sadece 4’ünün kadın olduğu ifade edilmiştir. Dünyada da bu durumun çok farklı olmadığı, ancak Avrupa’da durumun daha iyi olduğu belirtilmiştir. Ayaz vd. (2018) denizcilik sektörüne yönelik iş ilanlarında bulunan bilgilerden ve adaylarda aranan niteliklerin neler olduğundan bahsetmişlerdir. Çalışmada, kariyer.net üzerindeki iş ilanları taranarak, bulunan iş ilanları içerik analizi yöntemiyle incelenmiştir. İlanların yarısından fazlasının İstanbul iline yönelik olduğu, operasyon departmanına ve uzman pozisyonuna yönelik ilanların

çoğunluğu oluşturduğu, ilanların neredeyse tamamında yabancı dil şartı bulunduğu ve ilanların büyük çoğunluğunun Microsoft Office programına hakimiyet istediği görülmüştür. Er-Koçoğlu (2018) Bilgi ve Belge Yönetimi Bölümü mezunlarının özel sektörde istihdamına yönelik çevrimiçi yayımlanan iş ilanlarını inceleyerek, beklenen becerilerin neler olduğunu, hangi illerde iş olanaklarının daha fazla olduğunu ve adayların hangi kuruluşlarda ve hangi unvanlarla istihdam edilme imkanlarının bulunduğunu belirlemiştir. İş ilanlarında mesleki olmayan bazı becerilerin de istenmekte olduğu ve verilen şartların bir bölümünün ülkenin tipik istihdam özelliklerinden kopuk olmadığı (erkek adaylar için askerliğini yapmış olmak ve gece vardiyasında erkek personel talebi gibi) sonuçlarına ulaşılmıştır. Oğuzbalaban (2019) konaklama işletmelerince turizm gazetesini.com sitesinde verilen iş ilanlarını incelemiş ve konaklama işletmelerinde çalışmak isteyen personel adaylarından istenen niteliklerin neler olduğundan bahsetmiştir. Konaklama işletmeleri ilanlarında en çok alt kademe çalışacak personel arandığı, en fazla personel ihtiyacı duyulan departmanın ön büro departmanı olduğu, iş ilanlarının çoğunda cinsiyet şartı aranmadığı ve cinsiyet şartının arandığı ilanlarda ise erkek adayların kadın adaylara göre daha fazla tercih edildiği sonuçlarına ulaşılmıştır. Süygün (2021) dış ticaret uzmanı mesleğinde aranan nitelikleri araştırmıştır. Araştırma kapsamında kariyer.net sitesi üzerinden yayımlanan 314 adet ilandan yararlanmıştır. Çalışmada, iş ilanlarının %62’sinin İstanbul’da bulunduğu, en çok dış ticaret uzmanı arayan sektörlerin sırasıyla kimya, endüstriyel ürünler ve otomotiv olduğu ve ilanların %91’inde en az bir adet destekleyici beceri beklendiği belirtilmiştir. Villi ve Saçkes (2021) konaklama işletmeleri tarafından verilen 218 adet iş ilanını incelemiştir. İş ilanlarında, beş yıldızlı otellerin diğer otellere göre daha fazla kelime ve görsel kullandığı ve oda fiyatları daha pahalı olan işletmelerin iş tanımı kısmına daha önem verdiği tespit edilmiştir. Yavaş (2021) havacılık yönetimi iş ilanlarını içerik analizi yöntemi ile inceleyerek genel istihdam durumunu araştırmıştır. Araştırmada, iş bulma ve havacılık işletmelerinin sitelerinde yayımlanan 165 adet iş ilanı incelenmiştir. Yıllık yaklaşık 7000 mezun veren bir sektör için 165 adet iş ilanının çok az olduğu vurgulanmıştır. Kaya (2023) serbest muhasebeci mali müşavirlere yönelik iş ilanlarını incelemiş ve aranan niteliklerin birbirine göre kayda değer bir üstünlüğünün bulunmadığından bahsetmiştir. Ayrıca çalışmada “bilgi teknolojilerini kullanma” ve “rapor yazma” becerilerinin rutin beceriler olduğu not edilmiştir.

Son yıllarda İngilizce dilinde yayımlanmış çalışmalar ise

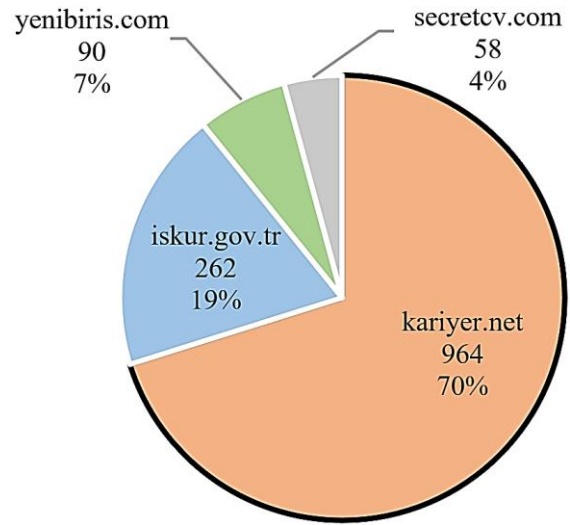
görece tarihi yeni olan meslekleri incelemiştir. Hong (2016) coğrafi bilgi sistemi (CBS) pozisyonları için verilmiş 946 iş ilanını inceleyerek adaylardan beklenen özellikleri incelemiştir. Deming ve Kahn (2018) iş ilanlarında bulunan anahtar kelimeleri 10 genel beceriye göre sınıflandırarak beceri gereksinimlerini sunmuşlardır. Gardiner vd. (2018) iş ilanı başlığında “büyük veri” ifadesi geçen 1216 iş ilanını inceleyerek bu iş ilanları ile çok yönlü becerilere sahip adaylar arandığını vurgulamışlardır. Suarta vd. (2018) Endonezya’daki iş ilanlarında vurgulanan becerileri incelemişler ve istihdam edilebilirlik becerileri için bir çerçeve geliştirmişlerdir. Verma vd. (2019) iş analisti, iş zekâsı analisti, veri analisti ve veri bilimci gibi adaylar arayan çevrimiçi iş ilanlarını inceleyerek analitik pozisyonlar için beklenen becerileri araştırmışlardır. Stewart (2020) Avustralya’daki çevre bilimi işverenlerinin ihtiyaç duyduğu becerileri belirlemek için 130 iş ilanını analiz etmiştir. Purwanto vd. (2020) kitle ve dijital medya sektöründe görev yapacak sekreterler için iş ilanlarını incelemişlerdir. Verma vd. (2021a) indeed.com üzerinden topladıkları iş ilanlarını inceleyerek giriş seviyesi pazarlama (sosyal medya yöneticisi ve pazarlamacısı) pozisyonları için gerekli becerileri araştırmışlardır. Verma vd. (2021b) yine indeed.com üzerinden yayımlanan artırılmış ve sanal gerçeklik iş ilanlarını incelemişler ve Verma vd. (2021c) benzer bir çalışmayı yapay zekâ ve makine öğrenmesi iş ilanları için yapmışlardır. Matsumoto (2022) Japon kütüphane personeli için iş ilanlarında listelenen gerekli beceri, bilgi ve tutumları belirlemeyi amaçlamıştır. Kovacs ve Vamosi Zarandne (2022) dijital pazarlama alanında işverenlerin giriş seviyesi pozisyonlar için talep ettiği becerileri incelemişlerdir. Graham ve Lu (2022) siber güvenlik ile ilgili 17929 iş ilanını inceleyerek, adaylardan beklenen önemli becerileri 3 kategori altında toplamışlardır. Bernhard ve Russmann (2023) Avusturya’da ve Almanya’da gazetecilik, halkla ilişkiler ve pazarlama alanlarında yayımlanan 336629 iş ilanını analiz ederek, iletişim ile ilgili mesleklerin bulanıklaşan sınırlarını göstermişlerdir.

Bu çalışmada, çeşitli internet sitelerinde inşaat mühendisleri için verilen iş ilanları toplanarak metin madenciliği yöntemleri ile incelenmiş ve adaylarda aranan temel becerilerin neler olduğu belirlenerek sektörde yer alması istenen adayların genel profili çizilmiştir.

2. Veri

Bu çalışmada kullanılan veri, popüler iş ilanı sitelerinden olan kariyer.net, iskur.gov.tr, yenibiris.com ve secretcv.com

üzerinden toplanmıştır. Veri toplama işinde ParseHub (İnt. Kyn. 1) ve Octoparse (İnt. Kyn. 2) web kazıma (web scraping) yazılımları kullanılmıştır. Toplanan veri, işveren tarafından yazılmış olan pozisyon isimleri, iş ilanı bağlantıları, iş ilanını veren firma adları ve ilanların içinde bulunan yapılandırılmamış (serbest) metinleri içermektedir. Çalışma kapsamında 16.03.2023 tarihinde yayında olan, kariyer.net üzerinden 964, iskur.gov.tr üzerinden 262, yenibiris.com üzerinden 90 ve secretcv.com üzerinden 58 olmak üzere toplam 1374 benzersiz iş ilanı veri tabanına aktarılmıştır. Toplanan verinin kaynaklara göre dağılımı Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Toplanan iş ilanlarının kaynaklara göre dağılımı

Elde edilen veri, Orange (İnt. Kyn. 3) yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Orange, 1996 yılında University of Ljubljana tarafından geliştirilmeye başlanmış, açık kaynak kodlu ve GPL v3 lisansını kullanan bir veri madenciliği araç takımudur. Açık kaynak kodlu olması, dileyen kullanıcıların yazılımı ücretsiz kullanabilmesine, dağıtabilmesine ve düzenleyebilmesine olanak sağlamaktadır. Ağırlıklı olarak Python programlama dili ile programlanan Orange, Windows, macOS ve Linux işletim sistemlerinde çalışabilmektedir.

Toplanan verinin ön işleme (preprocessing) “Text Mining” kategorisinde bulunan “Preprocess Text” aracı ile yapılmıştır. Ön işleme, veri seti üzerinde yapılan bir takım düzeltme, eksik veriyi tamamlama, tekrarlanan veriyi kaldırma, dönüştürme, bütünleştirme, temizleme, normalleştirme, boyut indirgeme vb. işlemlerinin tümüne verilen isimdir. Oluşturulan ön işleme boru hattının (pipeline) ilk adımı tüm harfleri küçük harfe çevirme adıdır. Böylece aynı ifadelerin küçük ve büyük harf farkından dolayı başka algılanmasının önüne geçilmiştir. İkinci adım, kelimelerden eklerin atılmasıdır; bu adımda

neredeyse aynı anlama gelen fakat ekleri sebebiyle farklı algılanacak kelimeler (“beceriye” ve “becerilere” gibi) normalize edilmiştir. Üçüncü ve son adım filtrelemedir. Bu adımda rakamlar, noktalama işaretleri ve belirlenen etkisiz kelimeler (stopwords) silinmiştir. Tüm metin madenciliği projeleri için geçerli olan bir etkisiz kelimeler listesi yoktur. Örneğin bu projede etkisiz kelime olan “mühendis” başka bir projede son derece önemli olabilir. Bu sebeple her proje için farklı bir etkisiz kelimeler listesi oluşturulmalıdır. Bu proje için oluşturulan etkisiz kelimeler listesine GitHub (Int. Kyn. 4) üzerinden ulaşılabilir. Söz edilen etkisiz kelimeler listesi bu proje için tam bir liste olmayabilir; ancak bu listenin içerisinde en sık geçen etkisiz kelimelerin bulunması yeterlidir. Çünkü bu çalışmaya konu olan metin madenciliği projesi, veri setinde en sık geçen kelime ve kelime öbekleri üzerine kuruludur. Ön işleme sonunda, ortalama (ve yaklaşık) 23 kelimelik 1374 ilandan oluşan, benzersiz 200 ve toplam 31821 kelime içeren bir veri seti elde edilmiştir. Veri setinde en sık geçen kelimelerden oluşturulan kelime bulutu Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Kelime bulutu

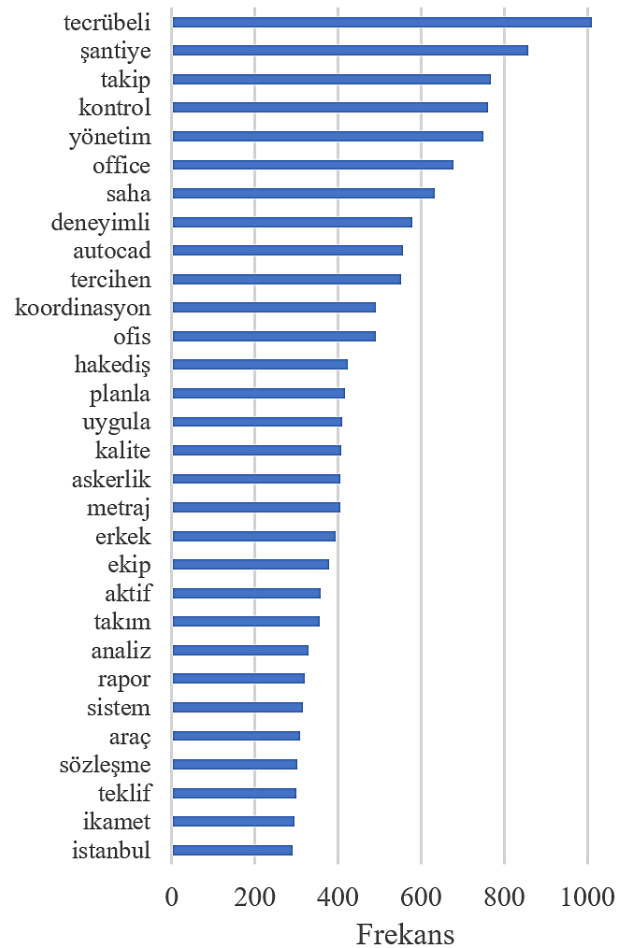
3. Bulgular

Metin madenciliğinde n-gram analizi ile kelimelerin ve kelime öbeklerinin incelenen veri seti içerisinde ne kadar baskın olduğu tespit edilir. Bir n-gram, n adet ardışık kelime dizisidir. Unigram (1-gram) kelime, bigram (2-gram) iki kelimelik dizi ve trigram (3-gram) ise üç kelimelik dizi olarak anlaşılmalıdır.

İş ilanları içerisinde en sık tekrarlanan 30 unigram, Şekil 3’te verilen grafikte sunulmuştur. Diğer bir deyişle, Şekil 3’te verilen grafik, 31821 kelimedenden oluşan veri setinin içerisinde en sık tekrar eden 30 kelimenin frekanslarını göstermektedir. Şekil 3’teki grafiğin ilk sırasında yer alan “tecrübeli” ile sekizinci sırada bulunan “deneyimli” kelimelerinin frekanslarının toplamı 1592 olmaktadır. Bu

da veri setindeki toplam kelime sayısının %5’idir. Bu yüksek oran, yeni mezun inşaat mühendislerinin kendilerine uygun iş ilanı bulmakta oldukça zorlanacağı anlamına gelmektedir. Yine Şekil 3’teki grafikten şantiye yönetimi becerisinin, teklif ve hakediş hazırlama gibi ofiste yapılacak işlere hakimiyetten daha önemli olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, Microsoft Office ve Autodesk AutoCAD programlarını kullanabilen adaylar için daha çok sayıda uygun iş ilanı olduğunu söylemek de yanlış olmaz.

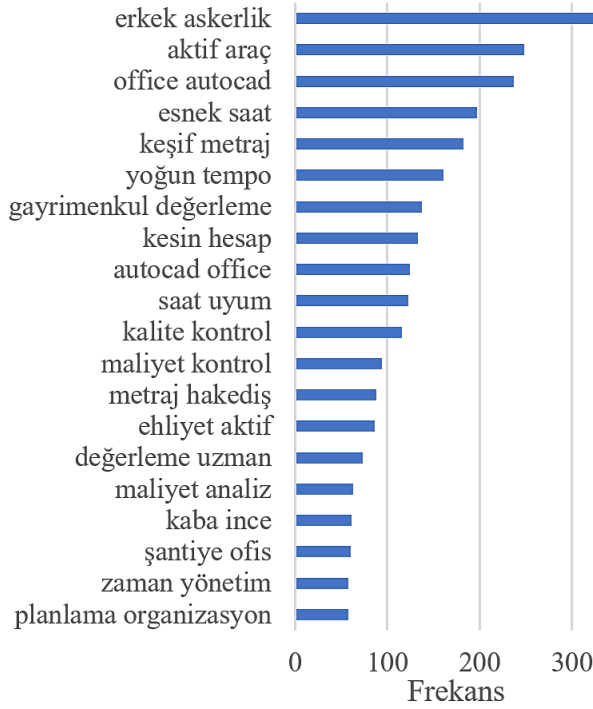
En sık tekrar eden 30 kelime arasına son sıradan da olsa girmeyi başarmış tek il ismi olan “İstanbul”, bu ilde önemli sayıda açık pozisyonun olduğunu göstermektedir. En sık tekrarlanan 20 bigram ise Şekil 4’te verilmiştir.



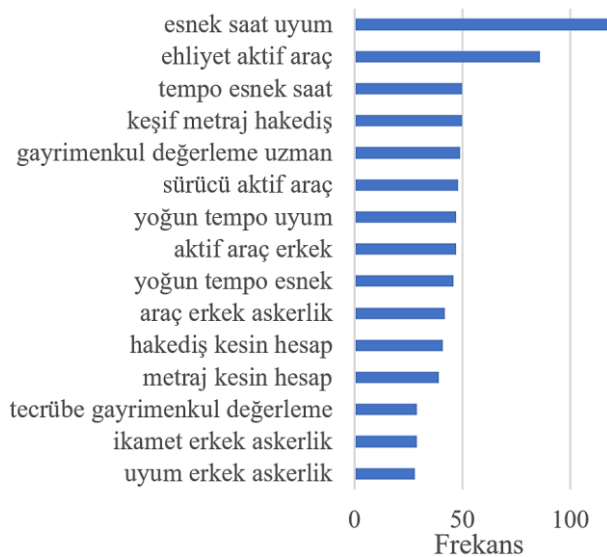
Şekil 3. En sık tekrarlanan 30 unigram

Şekil 4’te verilen grafikte görülen en yüksek frekanslı bigram olan “erkek askerlik”, ilanlara başvuracak erkek adayların askerlik ile ilişkisinin (en azından bir süre) olmaması talebinin fazlalığından kaynaklıdır. Şekil 4’e göre inşaat mühendisi pozisyonlarına başvuracak adaylarda aranan en önemli beceri Microsoft Office ve Autodesk AutoCAD programlarını kullanabilme becerisidir (“office autocad” ve “autocad office” bigram

frekansları toplamı 361 etmektedir). Takip eden en önemli beceri ise “yoğun tempoya ve esnek çalışma saatlerine uyum” olarak tespit edilmiştir (“esnek saat” ve “yoğun tempo” bigram frekansları toplamı 358’dir). Adaylardan beklenen diğer beceriler önem sırasına göre “aktif araç kullanabilme” ve “keşif, metraj ve hakediş konularına hakimiyet” olarak düşünülebilir. Şekil 5’te en sık tekrarlanan 15 trigram verilmiştir.



Şekil 4. En sık tekrarlanan 20 bigram



Şekil 5. En sık tekrarlanan 15 trigram

Şekil 5’e göre adaylarda olması beklenen beceriler önem sırasına göre “esnek çalışma saatlerine uyum”, “aktif araç kullanabilme” ve “keşif, metraj ve hakediş konularına hakimiyet” olarak okunmaktadır. Trigram analizi ile

çıkarılan bu bilgiler, Şekil 4’te bigram analizi ile çıkarılan bilgiler ile örtüşmektedir.

İş ilanlarında aranan özellikleri gruplandırarak incelemek ve her grupta aranan en önemli özellikleri belirleyebilmek için hiyerarşik kümeleme yapılmıştır. Hiyerarşik kümeleme, veri seti içerisindeki öğelerin sahip oldukları özelliklere göre belirli bir yakınlık ölçüsü ile değerlendirilerek gruplara ayrılmasıdır. Bu iş için önce iş ilanlarındaki kelimelerin fastText (İnt. Kyn. 5) kelime temsilleri (word embedding), Orange yazılımının “Text Mining” kategorisinde bulunan “Document Embedding” aracı ile çıkarılmıştır. Burada “kelime temsili” ifadesinden anlaşılacak şey benzer anlamı olan kelimelerin benzer sayısal vektörler ile gösterildiği bir temsil biçimidir. Bu temsiller ile kelimeler sayısallaştırılarak kelime benzerlikleri sayısal olarak ifade edilebilmektedir.

Daha sonra kelimeler, temsil vektörü çiftlerinin kosinüs benzerliklerine (1) göre, Louvain kümeleme algoritması (2) kullanılarak 5 gruba ayrılmıştır. Denklem 1’de, iki vektör olan A ve B arasındaki kosinüs benzerliğinin nasıl hesaplanacağı verilmiştir.

$$S_c(A, B) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}} \quad (1)$$

Louvain kümeleme algoritması ise Denklem 2’de verilen modülerlik skorunu (Q) maksimize etme prensibi ile çalışır.

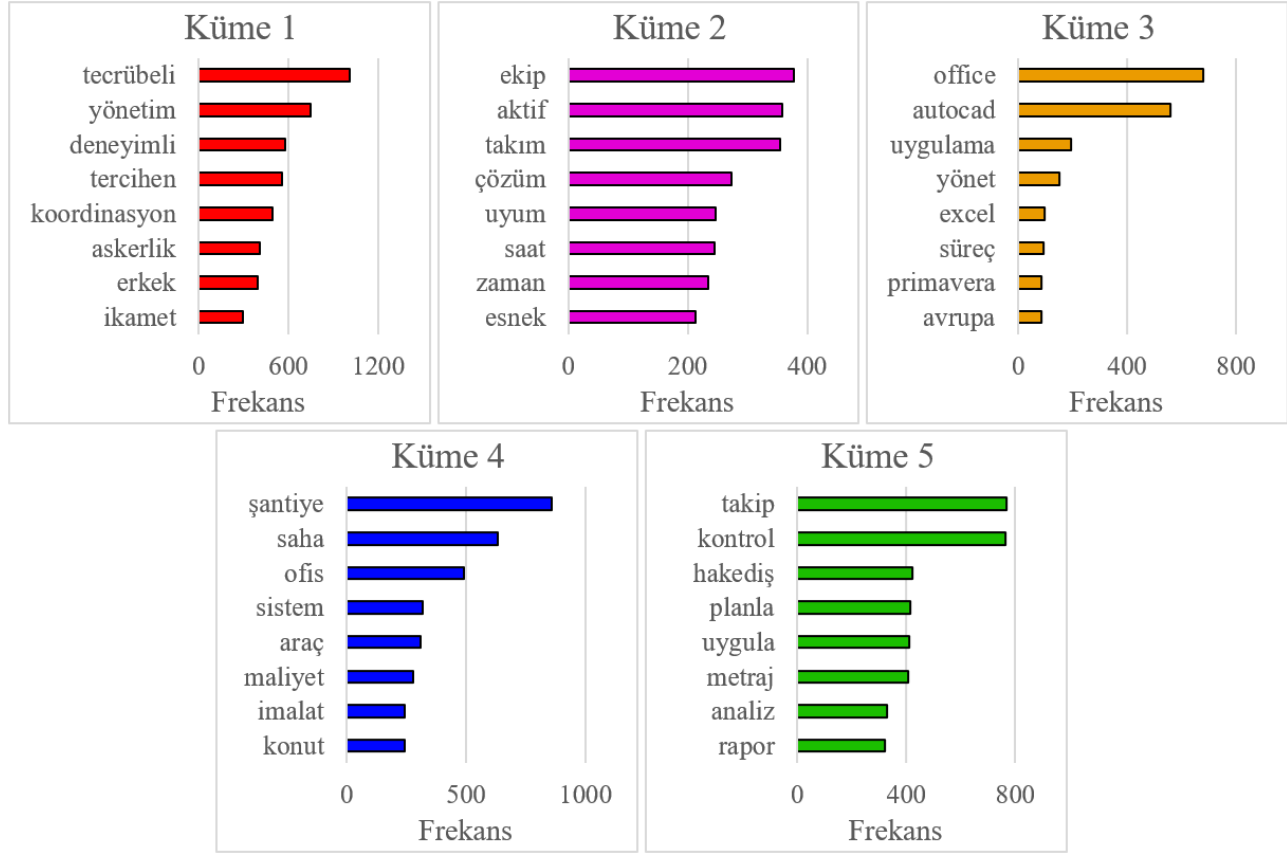
$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left[W_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j) \quad (2)$$

Denklem 2’de m , tüm kenar ağırlıklarının toplamını, W_{ij} , i ve j öğeleri arasındaki kenarın ağırlığını, k_i ve k_j sırasıyla i ve j öğelerine bağlanan tüm kenar ağırlıklarının toplamını, c_i ve c_j sırasıyla i ve j öğelerinin gruplarını ve son olarak δ , Kronecker delta fonksiyonunu temsil eder.

Anlamca birbirine göreli olarak yakın kelimelerin içinde bulunduğu 5 grup ve her gruptaki en yüksek frekanslı kelimeler Şekil 6’da verilmiştir. Şekil 6’da verilen Küme 1, adayın kişisel özelliklerini özetler. Yazının önceki bölümlerinde de vurgulandığı üzere adaydan beklenen temel özellikler tecrübeli olması, yönetim becerisinin yüksek olması ve erkek adaylar için askerlik ile ilişkisinin olmamasıdır. Küme 2 ise adayın çalışma biçimini tarif etmektedir. Adaydan esnek çalışma saatlerine uyum sağlaması ve takım çalışmasına yatkın olması beklenmektedir. Küme 3 ise adayın teknoloji okuryazarlığı

ile ilgili beklentileri sunmaktadır. Adaydan, yine yazının önceki bölümlerinde söz edildiği gibi, Microsoft Office ve Autodesk AutoCAD programlarına hâkim olması beklenmektedir. Küme 4, adayın saha becerilerini özetlemektedir. Bu kümedeki kelimeler, araç kullanabilen

ve konut imalatı aşamalarına hâkim bir adayı tarif etmektedir. Son olarak Küme 5, genel olarak adayın ofis becerilerini tanımlamaktadır. Keşif ve metraj konularına hâkimiyetin yanında takip ve kontrol becerileri öne çıkmaktadır.



Şekil 6. Kelime grupları

4. Tartışma

İnşaat mühendisleri için açılan iş ilanlarına başvuracak adaylardan beklenenler, iki metin madenciliği yöntemi olan n-gram analizi ve hiyerarşik kümeleme ile belirlenmiştir. N-gram analizleri ile elde edilen bulgular ve hiyerarşik kümeleme ile elde edilen bulguların örtüştüğü görülmektedir. İncelenen iş ilanlarından yola çıkılarak, bir adayın sahip olması gereken temel özellikler aşağıdaki şekilde tespit edilmiştir:

- Tecrübeli
- Şantiye yönetimi becerisine sahip
- Erkek adaylar için askerlik ile ilişkisi olmayan
- Microsoft Office ve Autodesk AutoCAD programlarına hâkim
- Esnek çalışma saatlerine uyum sağlayabilen
- Takım çalışmasına yatkın
- Ehliyeti olan ve aktif araç kullanabilen
- Keşif, metraj ve hakediş konularına hâkim

Bölüm 3'te, hiyerarşik kümeleme sonucunda bulunan 5 kümeden ve bu kümeler altında verilen kelimelerden söz edilmişti. Yüksek öneme sahip bu 40 kelime, frekans değerleri ile birlikte ChatGPT'ye (İnt. Kyn. 6) verilerek, ChatGPT'den inşaat mühendisi pozisyonu için bu önemli kelimeler etrafında kurgulanmış tipik bir iş ilanı oluşturulması istenmiştir. Bu istem sonucu elde edilen ve Şekil 7'de verilen iş ilanının, Türkiye'de inşaat mühendisi pozisyonu için verilen iş ilanlarının genelini temsil ettiği düşünülmektedir. Bu noktada düşülmesi gereken önemli bir not, aşağıdaki ilanın ChatGPT'nin 29.05.2023 tarihinde erişilebilir olan ücretsiz sürümü kullanılarak oluşturulduğudur.

5. Sonuçlar

İnşaat mühendisliği pozisyonu için dört farklı web sitesinde (kariyer.net, iskur.gov.tr, yenibiris.com ve secretcv.com) yer alan 1374 adet benzersiz iş ilanı metin madenciliği yöntemleri ile incelenerek adaylarda aranan

özellikler belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın önemli sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

Şirketimiz, deneyimli ve tecrübeli bir İnşaat Mühendisi aramaktadır. İş ilanımız aşağıda belirtilen nitelikleri taşıyan adaylara açıktır:

Adaylarda Aranılan Nitelikler:

- Üniversitelerin İnşaat Mühendisliği bölümlerinden mezun
- Yönetim becerileri gelişmiş
- İnşaat sektöründe en az 5 yıl deneyim sahibi
- Tercihen koordinasyon yeteneği yüksek
- Askerlik hizmetini tamamlamış (erkek adaylar için)
- İstanbul'da ikamet eden veya edebilecek
- Ekip çalışmasına yatkın ve aktif katılımla çalışabilen
- Takım ruhuna sahip, çözüm odaklı düşünebilen
- MS Office programlarına hâkim, özellikle AutoCAD uygulamasında deneyimli
- Yapı süreçlerini yönetebilen ve projeleri koordine edebilen
- İş takibi, kontrolü ve raporlama yeteneklerine sahip
- Hakediş, maliyet analizi, metraj ve planlama konularında tecrübeli
- Primavera P6 gibi proje yönetimi araçlarını kullanabilen
- Ofis ve saha arasında etkin iletişim kurabilen
- Sistemli ve düzenli çalışma prensibine sahip
- İnşaat sektöründeki yenilikleri takip eden
- Gece veya hafta sonu çalışmalarına esneklik gösterebilen

İş Tanımı ve Sorumluluklar:

- Ofis ve saha arasında koordinasyon sağlamak
- İnşaat projelerini yönetmek ve uygulamak
- Proje planları, metraj ve maliyet analizlerini hazırlamak
- Primavera P6 gibi proje yönetimi araçlarını kullanarak projeleri takip etmek
- İnşaat süreçlerini kontrol etmek ve raporlamak
- Hakedişlerin hazırlanmasını ve takibini yapmak
- İşin bütçe ve zaman çerçevesinde ilerlemesini sağlamak
- İmalat faaliyetlerini yönetmek ve denetlemek
- Konut veya ticari projelerin inşaatında görev almak

Eğer yukarıda belirtilen niteliklere sahipseniz, bize CV'nizi göndermek için lütfen aşağıdaki iletişim bilgilerinizi kullanın:

E-posta: example@example.com Telefon: 123456789

Not: Değerlendirme süreci için ilgili adaylarla iletişime geçeceğimiz için, lütfen iletişim bilgilerinizi eksiksiz ve doğru bir şekilde belirtin.

Şekil 7. ChatGPT tarafından oluşturulan iş ilanı

- Tecrübe, adaylarda aranılan en önemli özelliktir. Bu durum yeni mezun inşaat mühendislerinin kendilerine uygun iş ilanı bulmalarını zorlaştırmaktadır. Diğer taraftan, aranılan bu kriter bir kısır döngü oluşmasına sebep olmaktadır; yeni mezun inşaat mühendislerine şans tanınmayan bir ekosistemde, tecrübe kazanmış adayların bulunması beklenmez.

- “Tecrübe” kelimesinden sonra en sık tekrarlanan ilk dört kelime olan “şantiye”, “takip”, “kontrol” ve “yönetim” kelimelerinden, şantiye yönetimi becerisinin aranılan ikinci önemli özellik olduğu ortaya çıkmaktadır. İşverenlerin, şantiyede yürütülen çalışmaların takibini yapabilecek ve çıkması muhtemel problemleri işverene yansıtmadan çözüme kavuşturabilecek adaylara öncelik vermesi anlaşılır bir durumdur.
- Microsoft Office ve Autodesk AutoCAD programlarını bilen adaylar daha çok tercih edilmektedir. Microsoft Office, kelime işlemci ve elektronik tablo gibi bileşenleri bulunan bir ofis yazılımları paketidir. Autodesk AutoCAD ise vektör tabanlı bir bilgisayar destekli tasarım (CAD – Computer Aided Design) yazılımıdır. Adayların bilmesi beklenen programlar listesine bir proje ve portföy yönetimi yazılımı olan Oracle Primavera son sıralardan da olsa girmeyi başarmıştır.
- İnşaat işleri, her üyenin belirli görevlerinin olduğu bir takım çalışması şeklinde yürütülür. Bu sebeple “takım çalışmasına yatkın” adayların aranması son derece doğaldır. Diğer taraftan, inşaat işlerinin çoğunun sıkı zaman kısıtları vardır. Hazır beton firmasının takviminde sadece gece saatlerinde boşluk olması ve cadde üzerinde sadece gece çalışmaya izin verilmesi sıkı zaman kısıtı örnekleridir. Beklendiği üzere “esnek çalışma saatlerine uyum sağlayabilen” adaylar öne geçmektedir.
- İnşaat firmaları genellikle birden fazla şantiyede faaliyet gösterirler. İnşaat mühendisinden gerektiğinde farklı şantiyelere zaman kaybetmeden ulaşması ve oradaki işleri takip etmesi beklenmektedir. Şantiye yönetimi için inşaat mühendisi arayan şirketler için “ehliyeti olan ve aktif araç kullanabilen” adaylar ön sıradadır.
- Keşif, metraj ve hakediş, bir işin maliyetini hesaplamaktan başlayarak yapılan iş miktarı karşılığının alınmasına kadar işleyecek süreçte tamamlanması gereken önemli işlemlerdir. “Keşif, metraj ve hakediş konularına hâkim” adaylar, söz edilen işlemlerin tamamlanması konusunda işverenlerin yükünü hafifleteceğinden öncelikli olarak tercih edilmektedirler.
- İşe başlama tarihinden kısa bir süre sonra adayın askerlik hizmetini yerine getirmek üzere işten ayrılacak olması, yeni başlayacak ve devam eden işleri yürütebilmek için hızlıca yeni inşaat mühendisi bulunmasını gerektireceğinden işveren için zor bir durumdur. Bu sebeple iş ilanlarının çoğunda “erkek

adaylar için askerlik ile ilişkisi olmayan” şartı bulunmaktadır.

- “İstanbul”, en sık tekrar eden 30 kelime içerisinde bulunan tek il adıdır. Beklendiği üzere, İstanbul’da diğer illere göre çok daha fazla sayıda açık pozisyon bulunmaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Analiz, Yazma, Düzenleme

Yazar 2: Araştırma, Analiz, Yazma

Yazar 3: Araştırma, Analiz, Yazma

Yazar 4: Araştırma, Analiz, Yazma

Yazar 5: Araştırma, Analiz, Yazma

Yazar 6: Araştırma, Analiz, Yazma

Yazar 7: Araştırma, Analiz, Yazma

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

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

Teşekkür

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Hakan ÖZBAŞARAN tarafından yürütülen “Yapı Mühendisliğinde Yapay Zekâ Mühendislik Araştırmaları” lisans dersi kapsamında hazırlanmıştır.

6. Kaynaklar

Ayaz, İ.S., Baran, E. ve Açık, A., 2018. Denizcilik sektörüne yönelik iş ilanlarının analizi: Kariyer.net örneği. *2nd International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies*, Samsun, Türkiye.

Beltekin, N., 2014. İşgücü talebi ve eğitim ilişkisi üzerinde bir analiz (iş ilanları örneği). *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, **51(13)**, 226-240.

<https://doi.org/10.17755/esosder.72371>

Bernhard, J. and Russmann, U., 2023. Blurring boundaries: A longitudinal analysis of skills required in journalism, pr, and marketing job ads. *Journalism & Mass Communication Quarterly*.

<https://doi.org/10.1177/10776990231181544>

Çoban, S., 2016. Çalışmanın yeni biçimlerini okumak: Çalışma deneyimi olmayan üniversite mezunlarına yönelik kariyer sitelerindeki ilanlar. *Sosyoloji Konferansları*, **53**, 327-355.

<https://doi.org/10.18368/IU/sk.32133>

Deming, D.J. and Kahn, L.B., 2018. Skill requirements across firms and labor markets: Evidence from job postings for professionals. *Journal of Labor Economics*, **36**, 337-369.

<http://dx.doi.org/10.1086/694106>

Er-Koçoğlu, N., 2018. Türkiye’de bilgi ve belge yönetimi bölümü mezunlarının özel sektörde istihdamına yönelik çevrim içi yayımlanan iş ilanlarının içerik analizi. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, **58(1)**, 1138-1160.

Erdem, B. ve Gezen, T., 2014. Turizm işletmelerine yönelik iş ilanlarının içerik analizi yöntemiyle incelenmesi. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, **21(10)**, 19-42.

<https://doi.org/10.11122/ijmeh.2014.10.21.425>

Gardiner, A., Aasheim, C., Rutner, P.S. and Williams, S.R., 2018. Skill requirements in big data: A content analysis of job advertisements. *Journal of Computer Information Systems*, **58**, 374-384.

<https://doi.org/10.1080/08874417.2017.1289354>

Graham, C. and Lu, Y., 2022. Skills expectations in cybersecurity: Semantic network analysis of job advertisements. *Journal of Computer Information Systems*, **63**, 937-949.

<https://doi.org/10.1080/08874417.2022.2115954>

Hong, J.E., 2016. Identifying skill requirements for GIS positions: A content analysis of job advertisements. *Journal of Geography*, **115**, 147-158.

<http://dx.doi.org/10.1080/00221341.2015.1085588>

Kaya, A. (2023). Serbest muhasebeci mali müşavirlere yönelik iş ilanlarında aranan şartların karşılaştırmalı analizi: Türkiye, Amerika Birleşik Devletleri ve İngiltere örneği. *Muhasebe ve Vergi Uygulamaları Dergisi*, **16(2)**, 203-221.

<https://doi.org/10.29067/muvu.1177629>

Kovacs, I. and Vamosi Zarandne, K., 2022. Digital marketing employability skills in job advertisements – must-have soft skills for entry level workers: A content analysis. *Economics and Sociology*, **15(1)**, 178-192.

<https://doi.org/10.14254/2071-789X.2022/15-1/11>

Matsumoto, N., 2022. Knowledge, skills and attitudes required for Japanese library staff based on job advertisements. *Library Management*, **43(6/7)**, 507-520.

<https://doi.org/10.1108/LM-04-2022-0036>

- Oğuzbalaban, G., 2019. Konaklama işletmelerine yönelik iş ilanlarının içerik analizi: Turizm Gazetesi örneği. *Karadeniz Sosyal Bilimler Dergisi*, **11(11)**, 461-473.
- Özen Kutanis, R. ve Çetinel, E., 2016. Örgütsel yapılanmadaki gizli bileşen: Cinsiyet. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İİBF Dergisi*, **6(1)**, 61-86.
- Purwanto, P., Rusdiyanto, W. and Respati, Y.A., 2020. Analysis of secretary job advertisement content for secretarial skills needs. *Jurnal Economia*, **16**, 44-55. <http://dx.doi.org/10.21831/economia.v16i1.29872>
- Stewart, B.A., 2020. An empirical approach to identifying employability skills required of graduates in the environmental sciences. *Industry and Higher Education*, **35(2)**, 89-101. <https://doi.org/10.1177/0950422220936869>
- Suarta, I. M., Suwintana, I. K., Sudhana, I. G. P. F. P. and Hariyanti, N. K. D., 2018. Employability Skills for Entry Level Workers: A Content Analysis of Job Advertisements in Indonesia. *Journal of Technical Education and Training*, **10(2)**.
- Süygün, M. S., 2021. Dış ticaret uzmanı mesleğine yönelik iş ilanlarının analizi: Kariyer.net örneği. *Uluslararası İşletme, Ekonomi ve Yönetim Perspektifleri Dergisi*, **5(2)**, 798-809. <http://dx.doi.org/10.29228/ijbemp.54005>
- Verma, A., Frank, P. and Lamsal, K., 2021a. An exploratory study of skill requirements for social media positions: A content analysis of job advertisements. *ArXiv*, abs/2106.11040.
- Verma, A., Lamsal, K. and Verma, P., 2021c. An investigation of skill requirements in artificial intelligence and machine learning job advertisements. *Industry and Higher Education*, **36(1)**, 63-73. <https://doi.org/10.1177/0950422221990990>
- Verma, A., Purohit, P., Thornton, T. and Lamsal, K., 2021b. An examination of skill requirements for augmented reality and virtual reality job advertisements. *Industry and Higher Education*, **37(1)**, 46-57. <https://doi.org/10.1177/0950422221109104>
- Verma, A., Yurov, K.M., Lane, P.L. and Yurova, Y.V., 2019. An investigation of skill requirements for business and data analytics positions: A content analysis of job advertisements. *Journal of Education for Business*, **94(4)**, 243-250. <http://dx.doi.org/10.1080/08832323.2018.1520685>
- Villi, B. ve Saçkes, E., 2021. Konaklama işletmelerine yönelik iş ilanlarının içerik analizi yöntemi ile incelenmesi: Kariyer.net örneği. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, **24(46-1)**, 1501-1519. <https://doi.org/10.31795/baunsobed.1025490>
- Yavaş, V., 2021. Havacılık yönetimi öğrencilerine yönelik iş ilanlarının analizi. Manisa Celal Bayar Üniversitesi *Sosyal Bilimler Dergisi*, **19**, 121-136. <https://doi.org/10.18026/cbayarsos.679704>

İnternet kaynakları

1-<https://www.parsehub.com/>, (25.08.2023)

2-<https://www.octoparse.com/>, (25.08.2023)

3-<https://orangedatamining.com/>, (25.08.2023)

4-<https://github.com/ozbasaran/ce-job-adverts/blob/main/stopwords.txt>, (25.08.2023)

5-<https://fasttext.cc/docs/en/crawl-vectors.html>, (25.08.2023)

6-<https://chat.openai.com/>, (25.08.2023)

Sulu Ortamda Anodik Yükseltgenmeyle Elde Edilen Nanotüp Yapılı TiO₂ Elektrotların Fotoelektrokimyasal Performansı

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 05.06.2023

Kabul/Accepted: 06.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Photoelectrochemical Performance of Nanotube Structured TiO₂ Electrodes Produced by Anodic Oxidation in Aqueous Medium

Levent ÖZCAN *, 

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Levha halindeki titanyum metalinin yüzeyinde iki farklı yöntemle TiO₂ oluşturulmuştur. Kullanılan ilk yöntem termal yükseltgenme ikincisi ise anodik yükseltgenmedir. Termal yükseltgenme ile TiO₂ eldesi, Ti levhanın hava ortamında laboratuvar fırınında 3 saat ısıtılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Anodik yükseltgenme HF içeren sulu elektrolit içerisinde 20 V sabit gerilimin Ti levhaya uygulanmasıyla yapılmıştır. Anodik yükseltgenme yöntemi ile Ti levha yüzeyinde nanotüp yapılı amorf TiO₂ elde edilmektedir. Amorf yapının kristallenmesi için hava ortamında laboratuvar fırınında 3 saat ısıtma uygulanmıştır. Her iki yöntemde de elektrotlar 400, 500, 550, 600, 650 ve 700 °C'de ısı muameleye tabi tutulmuştur. Elde edilen elektrotlar XRD ve SEM yöntemleri kullanılarak karakterize edilmiştir. XRD sonuçları, 500 °C'ye kadar kalsine edilen elektrotların yüzeyindeki TiO₂'nin çoğunun amorf yapıda olduğunu, 600 °C ve daha yüksek sıcaklıklarda kalsine edilenlerin çok büyük oranda kristal yapıda olduğunu göstermiştir. Hazırlanan elektrotların 0,5 M Na₂SO₄ çözeltisinde UV ışığı altında fotoakım değerleri ölçülmüş ve fotoelektrokimyasal performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı yöntemler kullanılarak ve farklı sıcaklıklarda elde edilen elektrotların performansları karşılaştırıldığında en yüksek fotoakım değeri, Ti levha yüzeyinde 20 dakikalık anodik yükseltgenmeyle üretilen ve 650 °C'de kalsine edilen elektrotla (TiNT-HF-650-20dk) elde edilmiştir. Anodik yükseltgenme yöntemiyle hazırlanan nanotüp yapılı TiO₂'nin UV ışığı altında elde edilen fotoakım değerinin termal yükseltgenme ile elde edilene kıyasla 1,5 kata yakın daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 20 dakikalık kısa bir sürede anodik yükseltgenme ile sulu ortamda nanotüp yapılı olarak elde edilebilen TiO₂ elektrodunun fotoelektrokimyasal performansında kayda değer bir iyileşme olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: TiO₂; Fotoakım; Termal Yükseltgenme; Anodik Yükseltgenme; Nanotüp Yapılı TiO₂; Fotoelektrokimya.

Abstract

TiO₂ was formed on the surface of the titanium plate by two different methods. The first method used is thermal oxidation and the second is anodic oxidation. The production of TiO₂ by thermal oxidation was carried out by heating the Ti plate in an air environment in a laboratory oven for 3 hours. The anodic oxidation was carried out by applying a constant voltage of 20 V to the Ti Plate in an aqueous electrolyte containing HF. Nanotube-structured amorphous TiO₂ is obtained on the Ti plate by anodic oxidation method. To crystallize the amorphous structure, it was heated in the laboratory oven for 3 hours in an air environment. The electrodes were heat treated at 400, 500, 550, 600, 650, and 700 °C in both methods. The obtained electrodes were characterized using XRD and SEM methods. XRD results showed that most of the TiO₂ on the surface of the electrodes calcined up to 500 °C was amorphous, while those calcined at 600 °C and higher temperatures were largely crystalline. Photocurrent values of the prepared electrodes in 0.5 M Na₂SO₄ solution were measured under UV light and their photoelectrochemical performances were examined comparatively. When the performances of the electrodes obtained by using different methods and at different temperatures were compared, the highest photocurrent value was obtained with the electrode (TiNT-HF-650-20min) produced by anodic oxidation for 20 minutes on the Ti plate surface and calcined at 650 °C. It was determined that the photocurrent value obtained under UV light of nanotube-structured TiO₂ prepared by the anodic oxidation method was approximately 1.5 times higher than that obtained by thermal oxidation. It has been determined that there is a remarkable improvement in the photoelectrochemical performance of the TiO₂ electrode, which can be obtained as a nanotube structure in an aqueous medium by anodic oxidation in a short time of 20 minutes.

Keywords: TiO₂; Photocurrent; Thermal Oxidation; Anodic Oxidation; Nanotube Structured TiO₂; Photoelectrochemistry.

1. Giriş

Pek çok alanda yaygın olarak kullanılan TiO₂'nin fotoelektrokimyasal sistemlerde kullanımıyla ilgili çalışmalarda dikkate değer bir artış vardır. Fotoelektrokimyasal sensör uygulamaları (Özcan and Efe 2019, Syrek *et al.* 2019, Wang *et al.* 2022), organik

kirlenmelerin bozundurulması (Yılmaz *et al.* 2021, Zheng *et al.* 2022), güneş hücreleri (Sabzi and Mousavi Anijdan 2019, Vural *et al.* 2023) ve fotokatalizör (Tekin vd. 2016, Özcan *et al.* 2018) çalışmaları öne çıkan alanlar olarak görülmektedir. Fotoelektrokimyasal çalışmalarda kullanılan malzemeler arasında TiO₂'nin ayrı bir önemi

vardır. Çünkü TiO₂ UV ışığı altında yüksek fotoelektrokimyasal aktivite göstermekte ve ışıkla uyarıldığında kuvvetli yükseltgeme gücüne sahip olmaktadır (Wang *et al.* 2009). Bu durum, TiO₂'nin bant aralığı enerjisi ile açıklanabilir. TiO₂'nin anataz, rutil ve brukit fazdaki yapılarının bant aralıkları sırasıyla 3,2 eV, 3,0 eV ve 3,1 eV'tur (Mahlambi *et al.* 2015). Geniş bant aralıklı bir yarı iletken olan TiO₂ (3,0–3,2 eV) UV ışığı altında iyi çalışır (Arora *et al.* 2022). TiO₂ yarı iletkeni, boş bir iletkenlik bandı (İB) ve dolu bir değerlik bandı (DB) ile karakterize edilen elektronik yapısı nedeniyle farklı dalga boylarındaki ışığı absorplayan bir katalizör olarak kullanılır. Foto(elektro)katalitik süreçte, yarı iletkenin bant aralığına eşit veya bunu aşacak ışın enerjisiyle uyarılması, bir elektronun DB'den İB'ye uyarılmasıyla sonuçlanır (Malato *et al.* 2009). Bu durumda, katalizörün yüzeyine göç edebilen, yüzeysel bölgelerde sıkışıp kalan ve adsorbe edilen türlerle reaksiyona girebilen elektron-boşluk çiftleri (e⁻/h⁺) oluşur [Herrmann 1999]. TiO₂'in DB'inde oluşan boşluklar, katalizörün yüzeyine bağlı su molekülleri veya hidroksil iyonları gibi elektron veren türlerle reaksiyona girerek, karşılaştıkları organik molekül vb. türlerin yükseltgenmesinden sorumlu olan hidroksil radikallerini ([•]OH) oluşturur (Zhang and Itoh 2006).

Ayrıca TiO₂'in biyolojik uyumluluğunun iyi olması, pahalı olmaması, çevre açısından güvenli oluşu, kimyasal ve termal olarak kararlı olması onu biyomolekül immobilizasyonu için de uygun bir elektrot malzemesi yapmaktadır (Chen *et al.* 2010). Bu özelliklerinden dolayı TiO₂ fotoelektrokimyasal çalışmalarda büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle de TiO₂ temelli elektrotların performansının geliştirilmesi üzerine yoğun çaba sarf edilmektedir. Özellikle yüzey alanlarının artırılması bu elektrotların performansını arttırmaktadır. Yüzey alanının artırılması için nanoboyutta üretime imkân veren yöntemlerin kullanılması ve geliştirilmesi üzerine son yıllarda daha fazla çalışılmaktadır (Ma *et al.* 2020, Çetinkaya *et al.* 2022, Durdu *et al.* 2023). Literatürde anodik yükseltgenme yoluyla nanotüp yapılı TiO₂ eldesi etilen glikol (Alijani *et al.* 2021), gliserin, dimetil sülfoksit (Su *et al.* 2009) gibi organik çözücüler içinde yapılmaktadır. Ayrıca, sulu ortamda elde edilen nanotüp yapılı TiO₂'nin kullanıldığı farklı disiplinler ile ilgili çalışmalar da bulunmaktadır (Albu *et al.* 2008, Xing *et al.* 2010, Rios *et al.* 2022). Bu çalışmada, kolay ulaşılması ve ucuzluğu gibi etkenler dikkate alınmış ve nanotüp yapılı TiO₂ eldesi için HF içeren sulu elektrolit ortamı tercih edilmiştir. Ayrıca farklı alanlardaki fotoelektrokimyasal temelli çalışmalarda kullanılmasına yönelik bilgiler elde etmek amacıyla, Ti levha yüzeyinde nanotüp şeklinde üretilen TiO₂ elektrotlar ile nanoyapılı olmayanların UV

ışığı altındaki fotoelektrokimyasal performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Cihaz ve malzemeler

Analitik saflıktaki kimyasallar Sigma-Aldrich ve Merck firmalarından satın alınmıştır. Çözeltilerin hazırlanmasında kullanılan deiyonize suyun direnci 18,2 MΩ'dur. Fotoelektrokimyasal ölçümlerde referans elektrot olarak Ag/AgCl (3,0 M KCl), karşıt elektrot olarak 1cmx1cm boyutlu Pt levha kullanılmıştır. Çalışma elektrodu olarak ise elde edilen TiO₂ elektrotların 1cmx1cm'lik kısımları kullanılmıştır. Ölçümlerden önce elektrolit çözeltilerden 5 dakika süreyle azot gazı geçirilmiştir. Fotoelektrokimyasal ölçümler potansiyostat-galvanostat cihazı ile (Ivium marka, Vertex model) üç elektrotlu hücrede gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). UV ışık kaynağı olarak yan yana konumlandırılmış 8 W'lık 3 tane floresan lambadan (Philips) yararlanılmıştır.

Levha halindeki Ti elektrotların temizlenmesi ultrasonik banyo (LC30, Elma) kullanılarak yapılmıştır. Düzenli bir karıştırma sağlanması gerektiğinde ve elektrot hazırlama işlemlerinde manyetik karıştırıcı (IKA) kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklarda elektrotların hazırlanması sıcaklık programlamalı laboratuvar fırını (Protherm) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Anodik yükseltgeme ile elektrot hazırlaması doğru akım (DC) güç kaynağı (Meili, MCH-305D-II model, MCH Instrument) kullanılarak iki elektrotlu sistemde yapılmıştır. Elektrot karakterizasyonları için yapılan XRD analizleri Bruker marka D8 Advance model cihazla ve SEM ölçümleri FEI marka Nova NanoSEM 650 model cihazla yapılmıştır.

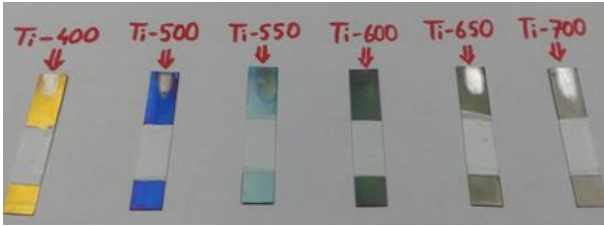


Şekil 1. Fotoelektrokimyasal ölçüm sistemi.

2.2 Termal yükseltgeme ile Ti levha yüzeyinde TiO₂ hazırlanması

Ticari olarak satın alınan Ti levhalar (0,127 mm kalınlıkta, % 99,7 saflıkta) 1cmx5cm boyutlarında kesilmiş ve ultrasonik su banyosunda sırasıyla aseton, etanol ve saf su

içinde onar dakika temizlenmiştir. Oda sıcaklığında kurutulan bu elektrotlar kapalı bir ortamda muhafaza edilmişlerdir. Termal yükseltgeme işlemi Özcan vd. (2017)'nin çalışması temel alınarak yapılmıştır. Ti levha (1cmx5cm), yüzeylerinin termal yükseltgeme yöntemiyle ince bir TiO₂ tabakasıyla kaplanması için hava atmosferinde 400 ile 700 °C arasında değişen sıcaklıklarda ısı muameleye tabi tutulmuşlardır. Isıl muamelenin yapılacağı sıcaklığa dakikada 3 °C'lik artışla ulaşılmış ve sonrasında bu sıcaklıkta 3 saat bekletilmişlerdir. Fırın içindeki sıcaklık ortam sıcaklığına gelinceye kadar elektrotlar fırında bekletilmiştir (Özcan *et al.* 2017). Hazırlanan elektrotlar Ti-X olarak adlandırılmış olup burada 'X' uygulanan sıcaklığı °C cinsinden ifade etmektedir. Örneğin elektrot 600 °C'de hazırlanmış ise Ti-600 olarak isimlendirilmiştir. Şekil 2'de bu yöntemle farklı sıcaklıklarda hazırlanan elektrotlar görülmektedir. Elde edilen elektrotların UV ışığı altında sadece 1cmx1cm'lik kısmından sinyal elde edilmesini sağlamak amacıyla Şekil 2'de görüldüğü gibi elektrotların çözeltiye dalan diğer kısmı teflon bant ile sarılmıştır.



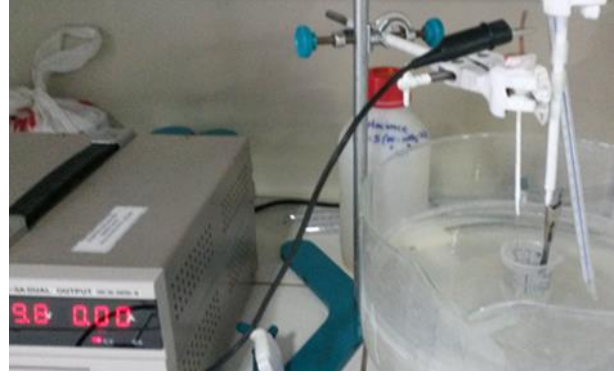
Şekil 2. Termal yükseltgenme ile Ti yüzeyinde farklı sıcaklıklarda hazırlanmış TiO₂ elektrotlar.

2.3 Anodik yükseltgenme ile Ti levha yüzeyinde nanotüp yapısında TiO₂ hazırlanması

Anodik yükseltgeme, doğru akım güç kaynağı kullanılarak iki elektrotlu sistemde yapılmıştır. Anot olarak yükseltgenmenin gerçekleşeceği Ti metali ve katot olarak Pt levha kullanılmıştır. Anot ve katot arasındaki mesafe 2,0 cm'dir. Literatürde anodik yükseltgenme yöntemiyle nanotüp şeklinde TiO₂ eldesi farklı çözücü sistemlerinde gerçekleştirilmektedir (Su *et al.* 2009, Alijani *et al.* 2021). Bu çalışmada çözücü olarak sulu elektrolit ortam tercih edilmiştir. Şekil 3'te anodik yükseltgenme işleminin gerçekleştirildiği sistem görülmektedir. Anodik oksidasyon sırasında elektrolitin karıştırılma hızı 200 devir/dakikadır.

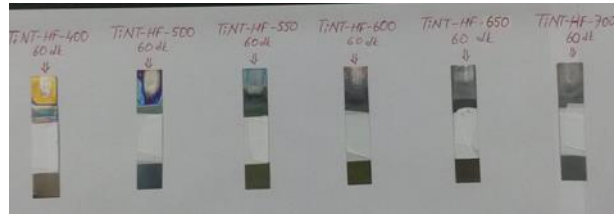
Anodik yükseltgeme, Xing vd. (2010) ve Özcan vd. (2017)'nin çalışmalarından faydalanılarak gerçekleştirilmiş olup işlemin uygulanışına ait ayrıntılı bilgiler şu şekildedir: Ti levhalar (1cmx5cm) ultrasonik su banyosunda sırasıyla aseton, etanol ve saf su içinde onar dakika temizlenip kurutulmuştur. Kurutulan Ti levhalar

hacimce % 10 HF, % 40 HNO₃ ve % 50 su içeren çözeltide 30 saniye bekletilip çıkarılmış ve saf su ile temizlenmiştir. Ardından ultrasonik olarak saf su içinde 5 dakika temizlenerek oda sıcaklığında kurutulmuşlardır. Yukarıdaki gibi temizlenip kurutulan Ti levhalara 0,15 M HF sulu çözeltisinde 20 V sabit gerilim belli bir süreyle uygulanmış ve levha yüzeyinde nanotüp şeklinde amorf yapıda TiO₂ oluşturulmuştur.



Şekil 3. Anodik yükseltgenme işleminin uygulandığı iki elektrotlu sistem.

Bu yöntemle elde edilen elektrot Ti-NT-HF olarak gösterilmiştir. Oluşan amorf yapının kristallenmesi için elektrotlara 400 ile 700 °C arasındaki sıcaklıklarda ısı işlem uygulanmıştır (Özcan *et al.* 2017). Uygulanan ısı işlem sonucu elde edilen elektrotlar Ti-NT-HF-X-Ydk şeklinde isimlendirilmiş olup burada 'X' °C cinsinden uygulanan kalsinasyon sıcaklığını, Y ise dakika cinsinden elektroda uygulanan elektroliz süresini ifade etmektedir. Örneğin Ti-NT-HF-500-60dk, sulu çözeltide 60 dakika boyunca 20 V gerilim uygulanarak elde edilen ve sonra 500 °C'de ısı muameleye tabi tutularak (3 saat) hazırlanan elektrotu ifade etmektedir. Şekil 4'te anodik yükseltgenmeyle hazırlanıp farklı sıcaklıklarda ısı muamele uygulanan elektrotlar görülmektedir.



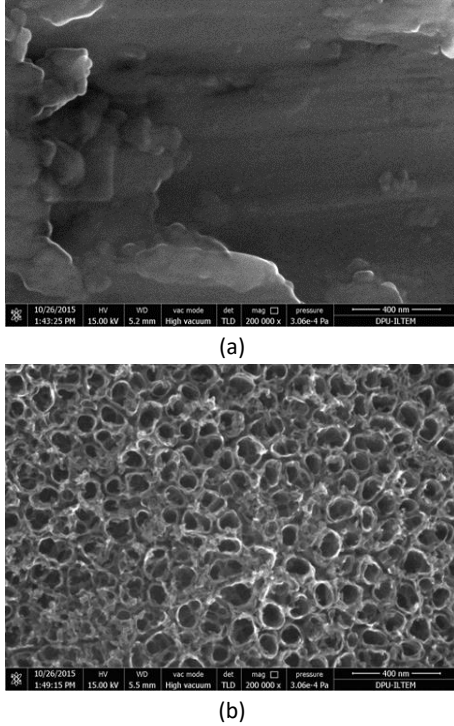
Şekil 4. Anodik yükseltgenme ile 60 dakika elektrolizle hazırlanmış ve farklı sıcaklıklarda kalsine edilmiş elektrotlar.

3. Bulgular

3.1. Nanotüp yapıları TiO₂ morfolojisi

Şekil 5(a)'daki SEM görüntüsü, anodik yükseltgenme işlemi öncesinde HF/HNO₃ çözeltisinde işlem görmüş Ti levha yüzeyine aittir. Anodik yükseltgenme öncesi ve sonrası arasındaki fark Şekil 5(a) ve 5(b)'nin

karşılaştırılmasıyla net bir şekilde görülmektedir. Şekil 5(b)'deki SEM görüntüsü anodik yükseltgenme sonrası Ti levha yüzeyinde oluşan nanotüp yapıları amorf TiO_2 'ye aittir. Nanotüp çapları 65-100 nm arasında ve nanotüp et kalınlığı ise 6-13 nm arasında değişmektedir.

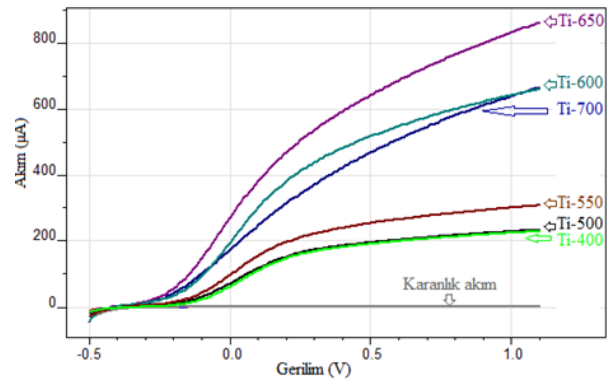


Şekil 5. Anodik yükseltgenme öncesi Ti levha yüzeyinin (a) ve Ti-NT-HF-60dk-amorf elektrot yüzeyinin (b) SEM görüntüleri.

3.2. Termal yükseltgenmeyle elde edilen TiO_2 elektrotların fotoelektrokimyasal performansları

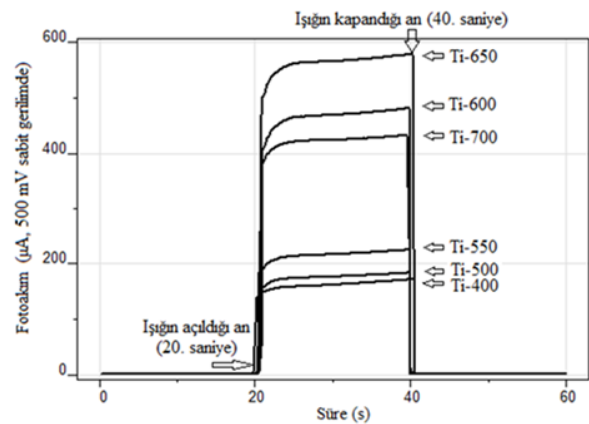
Ti bir levha yüzeyinde TiO_2 oluşturulması için uygulanabilecek basit bir yöntem Ti metalinin yüzeyine oksijen varlığında belli bir süre için ısı işlem uygulanmasıdır. Belli bir süre uygulanan bu işlem sonucu yüzeyde ince bir tabaka halinde TiO_2 oluşur. Oluşan TiO_2 , alttaki Ti ile sağlam bir şekilde bağlı olup özellikle fotoelektrokimyasal çalışmalarda rahatlıkla kullanılabilir. Fotoelektrokimyasal performansın iyileşmesini sağlamak için sıcaklık muamelesinden önce Ti metalinin yüzeyi farklı işlemlere tabi tutularak modifiye edilebilir. Özellikle yüzey alanının artmasını sağlamak amacıyla nanotüp şeklinde TiO_2 oluşturulması önemli iyileşmeler sunabilecektir. Bu nedenle bu çalışmada ilk olarak termal yükseltgenme yöntemiyle elde edilen elektrotların fotoakım değerleri ölçülmüş ve ardından nanotüp yapıları elde edilenlerin fotoakım değerleri de belirlenerek sonuçlar kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla termal yükseltgenme yöntemiyle farklı sıcaklıklarda hazırlanan elektrotlar (Ti-X) kullanılarak 0,50 M Na_2SO_4 çözeltisinde UV ışığı altında doğrusal taramalı voltametrik ölçümler yapılmıştır (Şekil

6). Şekil 6 incelendiğinde en yüksek fotoakım değerine (0,50 V'ta 643 μA) Ti-650 elektrotu ile ulaşılmıştır. Şekil 6'daki voltamogramlar incelendiğinde Ti-X elektrotların fotoakım değerlerinin 300 mV'a kadar daha hızlı arttığı ve daha yüksek gerilimlere gidildikçe artış devam etmekle beraber artış hızında bir yavaşlama gerçekleştiği görülmektedir. Hem çok yüksek olmayan bir gerilim değeri olması hem de fotoakım değerinin makul bir seviyede belirlenebilmesi nedeniyle Ti-X elektrotlar ile sabit gerilimdeki (kronoamperometrik) fotoakım ölçümleri için 500 mV değerinin uygun olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 6. Termal yükseltgenme ile elde edilen elektrotlar ile 0,50 M Na_2SO_4 çözeltisinde karanlıkta ve UV ışığında elde edilen doğrusal taramalı voltamogramlar.

Şekil 7'de ise 500 mV sabit gerilimde Ti-X elektrotlar ile UV ışığı altında gerçekleştirilen kronoamperometrik ölçümler görülmektedir. Bu ölçümlerde, başlangıçta karanlıkta ölçülen akım değeri çok düşük seviyelerde iken UV ışığı açılınca oluşan fotoakım nedeniyle sinyal değerinde ani bir artış meydana gelmektedir. Doğrusal taramalı voltametrik sonuçlar (Şekil 6) ile kronoamperometrik sonuçların (Şekil 7) uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 7 incelendiğinde 500 mV sabit gerilimde en yüksek fotoakım değerine Ti-650 ile (30. saniyede 566 μA) ulaşılmıştır.

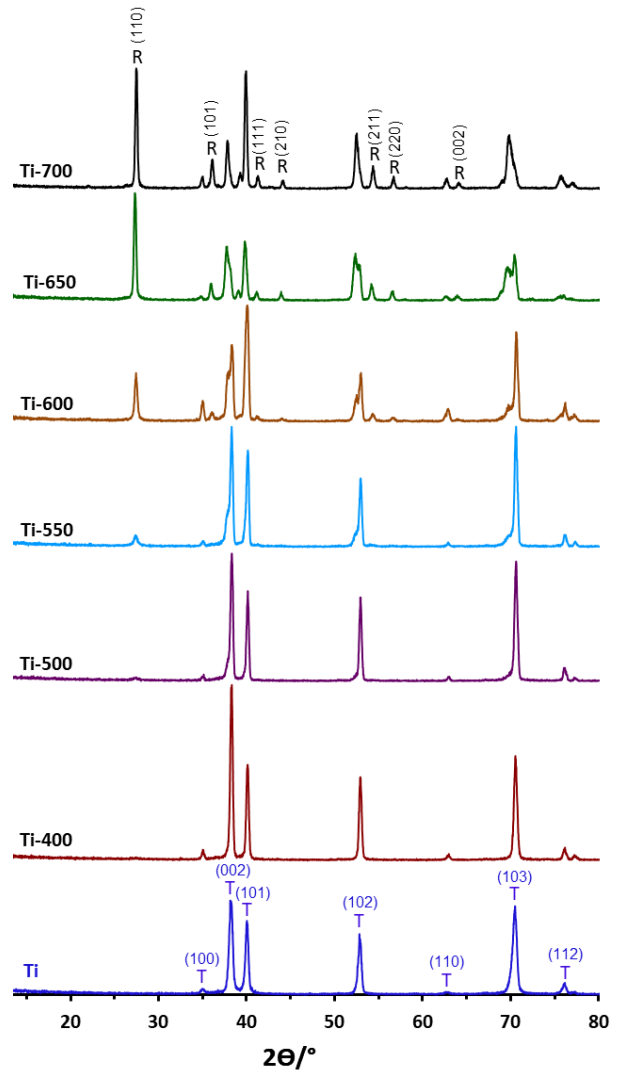


Şekil 7. Termal yükseltgenme ile elde edilen elektrotlar ile 500 mV sabit gerilimde 0,50 M Na_2SO_4 çözeltisinde elde edilen kronoamperogramlar.

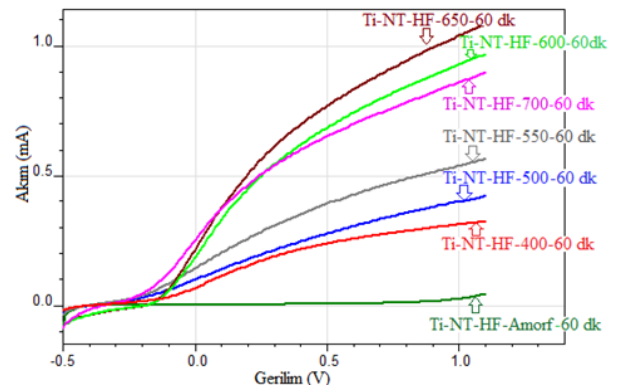
Ti ve Ti-X elektrotlar için yapılan XRD ölçümleriyle düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça nasıl bir değişim gerçekleştiği Şekil 8'de görülmektedir. XRD sonuçları, TiO₂ oluşturmak için uygulanan sıcaklık arttırıldıkça amorf yapıdan kristal yapıya dönüşüm gerçekleştiği ve kristalinitenin giderek arttığını göstermektedir. TiO₂ için 2 θ = 27,46°, 36,06°, 41,23°, 44,05°, 54,36°, 56,64° ve 62,76° açıları için elde edilen pikler, rutil fazının (110), (101), (111), (210), (211), (220) ve (002) kristal düzlemlerine (JCPDS No: 00-004-0551) karşılık gelmektedir. Ti metali için 2 θ = 34,98°, 38,14°, 40,04°, 52,90°, 62,90°, 70,50° ve 76,16°'de elde edilen pikler ise titanyumun 00-044-1294 nolu JCPDS kart numarası ile uyumlu olup bu değerlere karşılık gelen hkl parametreleri (100), (002), (101), (102), (110), (103) ve (112)'dir. Ti-X numuneleri rutil fazını içermekte olup ısı işlem sıcaklığının artmasıyla rutil faza ait pik şiddetlerinin arttığı görülmektedir. Ti-400 ve Ti-500 eser miktarda, Ti-550 ise az miktarda rutil faz piki içerir. 600 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda hazırlanan numunelerin (Ti-600, Ti650 ve Ti-700) rutil pikleri keskin ve belirgindir. Ti-X elektrotların hazırlanma sıcaklığı arttıkça rutil faza ait pikler giderek keskinleşmekte ve belirginleşmektedir (Özcan *et al.* 2013). Bir başka deyişle Ti yüzeyinde oluşan TiO₂'ler, sıcaklık artışıyla amorf yapıdan kristal yapıya dönüşmektedir. Öyleki Ti-400 ve Ti-500 elektrotların yüzeyindeki TiO₂'nin amorf karakteri yüksek iken Ti-600 ve daha yüksek sıcaklıkta üretilen elektrotların yüzeyindeki TiO₂ çok büyük oranda kristal yapıdadır.

3.3. Anodik yükseltgenmeyle nanotüp yapısında elde edilen TiO₂ elektrotların fotoelektrokimyasal performansı

Literatürde Ti metalinin yüzeyinde TiO₂ farklı morfolojik yapılarda da elde edilmektedir (Çetinkaya *et al.* 2022). Bunlar arasında nanotüp morfolojisinde elde edilen yapılar yaygınlık kazanmaktadır. Nanotüp yapısının elde edilmesi için özellikle anodik yükseltgenme yöntemi etkin ve yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Anodik yükseltgenme yönteminde elektrolit ortamı sulu veya susuz çözeltiler olabilmektedir (Smith *et al.* 2013). Bu çalışmada kolay ulaşılması, ucuzluğu ve yaygın kullanımı nedeniyle sulu elektrolitte çalışma tercih edilmiştir. Anodik yükseltgenme ile elde edilip 400-700 °C arası sıcaklıklarda ısı muamale uygulanarak hazırlanan Ti-NT-HF-X-60dk elektrotların fotoelektrokimyasal performansları da 0,50 M Na₂SO₄ çözeltisinde UV ışığı altında doğrusal taramalı voltametri ile belirlenmiştir (Şekil 9).



Şekil 8. Ti ve Ti-X elektrotların XRD difraktogramları. R: Rutil Fazı; T:Titanyum.



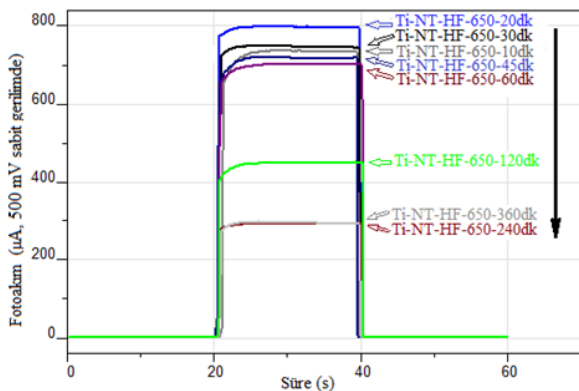
Şekil 9. Anodik yükseltgenme ile elde edilen nanotüp yapıları ile 0,50 M Na₂SO₄ çözeltisinde UV ışığında elde edilen doğrusal taramalı voltamogramlar.

Şekil 9 incelendiğinde kalsinasyon sıcaklığı 400 °C'den 650 °C'ye yükselirken fotoakım değerinde de artış gözlenmekte ve en yüksek fotoakıma Ti-NT-HF-650-60dk ile (0,50 V'ta 777 μ A) ulaşıldığı görülmektedir. Sıcaklık 650 °C'nin üzerine çıkarıldığında ise fotoakım değerinde azalma olmuştur. Sıcaklık artışıyla beraber oluşan rutil faz

miktarı ve kristalinite artmakta olup, 650 °C'ye kadarki sıcaklık değerine kadar bu artışın fotoakım değerinin de artmasına katkıda bulunduğu görülmektedir. Ancak 650 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda kalsine edilen ve daha yüksek kristaliniteye sahip TiO₂ oluşumunun fotoakım değerlerini daha fazla artırmayacağı değerlendirilmiştir. Şekil 9'daki değerler 60 dakikalık sabit elektroliz süresinde elde edilen Ti-NT-HF-X-60dk elektrotlarına aittir. Nanotüp elde etmek için uygulanan elektroliz süresi de fotoakım değerini etkileyecek önemli bir parametredir. Bu nedenle elektroliz süresinin akıma etkisini incelemek amacıyla en yüksek fotoakımın elde edildiği sıcaklık olan 650 °C için farklı elektroliz süreleri uygulanarak elektrotlar (Ti-NT-HF-650-Ydk) hazırlanmıştır.

Bu elektrotlar (Ti-NT-HF-650-Ydk) kullanılarak 500 mV gerilimde elde edilen kronoamperometrik ölçümler Şekil 10'da görülmektedir. Şekil 10 incelendiğinde 500 mV sabit gerilimde en yüksek fotoakım (30. saniyede 791 µA) değerine Ti-NT-HF-650-20dk ile ulaşıldığı görülmektedir. Şekil 10'daki veriler, elektrot hazırlama süresinin 60 dakika kadar uzun olmasına gerek olmadığını çok daha kısa oksidasyon süreleri kullanılarak hazırlanan nanotüp yapıları TiO₂ elektrotları ile de yeterli fotoakım değerlerine ulaşılabilirdiğini göstermektedir.

Ti-NT-HF-650-Ydk elektrotlar ile elde edilen fotoakım değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 11'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde 2 saat ve daha uzun sürelerde elde edilen elektrotların fotoakım değerlerinde ciddi azalmalar meydana gelmiştir. Dolayısıyla HF içeren sulu çözeltide nanotüp yapıları TiO₂ elde ederken bu hususlara dikkat edilmelidir.

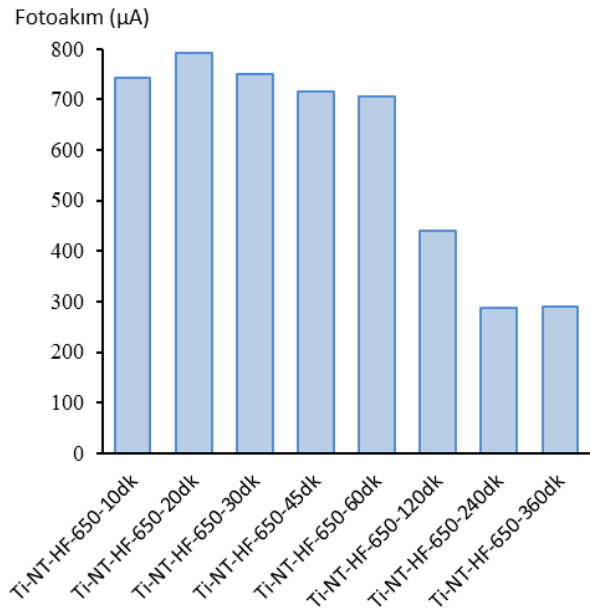


Şekil 10. Ti-NT-HF-650-Ydk elektrotlar ile 500 mV sabit gerilimde elde edilen kronoamperogramlar (0,50 M Na₂SO₄ çözeltisinde, 20. ve 40. saniyeler arası UV ışığı uygulanmıştır).

4. Tartışma ve Sonuç

Ti yüzeyinde TiO₂ oluşturmak için termal yükseltgenme ve anodik yükseltgenme yöntemleri kullanılmış ve bu yöntemlerdeki önemli parametreler optimize edilerek elektrotların fotoelektrokimyasal performansları UV ışığı

altında incelenmiştir. Termal yükseltgenme yöntemiyle hazırlanan elektrotlardan en yüksek fotoakım değerine (566 µA) 650 °C'de oluşturulan Ti-650 ile ulaşılmıştır. Anodik yükseltgenme ile HF içeren sulu çözeltide farklı elektroliz sürelerinde üretilen nanotüp yapısındaki elektrotlardan ise, 20 dakikalık yükseltgenme süresinde ve 650 °C'de elde edilen Ti-NT-HF-650-20dk elektrotu en yüksek fotoakım değerine ulaşmıştır (791 µA). Böylece kullanılan anodik yükseltgenme yönteminin fotoakım değerini arttırdığı tespit edilmiş ve anodik yükseltgenme süresinin de fotoakımı etkileyen önemli bir parametre olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 11. Ti-NT-HF-650-Ydk elektrotlarının 500 mV sabit gerilimde kronoamperometrik yöntemle elde edilen fotoakım değerleri. (0,5 M Na₂SO₄ çözeltisinde elde edilen veriler üç ölçümün ortalamasıdır).

Bunun yanında 20 dakika gibi kısa bir elektroliz süresinin uygulanmasıyla etkin TiO₂ nanotüplerinin üretilebileceği görülmektedir. Termal yükseltgenme yöntemiyle kıyaslandığında anodik yükseltgenme yönteminin TiO₂'nin UV ışığı altındaki fotoakım değerini 1,5 kata yakın arttırdığı görülmektedir. Dolayısıyla nanotüp yapıları olarak elde edilen bu elektrotların fotoelektrokimyasal çalışmaların çoğunda etkin olarak kullanılması mümkündür. Çevre kirleticilerinin ileri yükseltgenme işlemleriyle zararsız hale getirilmesi, fotoelektrokimyasal sensör ve biyosensörlerin üretilmesi, güneş hücreleri vb. alanlar bu konular arasında yer almaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazar tüm etik standartlara uyduklarını beyan eder.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar: Fikir Sahibi, Araştırma, Metodoloji, Deney, Analiz ve yorumlama, Yazma

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarın bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edeceği hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

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

Teşekkür

Bu araştırma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje No: 13.FENED.09)

5. Kaynaklar

- Albu, S.P., Ghicov, A., Aldabergenova, S., Drechsel, P., LeClere, D., Thompson, G.E., Macak, J.M. and Schmuki, P., 2008. Formation of double-walled TiO₂ nanotubes and robust anatase membranes. *Advanced Materials*, **20(21)**, 4135 – 41393.
<https://doi.org/10.1002/adma.200801189>
- Alijani, M., Sopha, H., Ng, S. and Macak, J.M., 2021. High aspect ratio TiO₂ nanotube layers obtained in a very short anodization time. *Electrochimica Acta*, **37620**, Article number 138080.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138080>
- Arora, I., Chawla, H., Chandra, A., Sagadevan, S. and Garg, S., 2022. Advances in the strategies for enhancing the photocatalytic activity of TiO₂: Conversion from UV-light active to visible-light active photocatalyst. *Inorganic Chemistry Communications*, **143**, Article number 109700.
<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109700>
- Chen, D., Zhang, H., Li, X. and Li, J., 2010. Biofunctional titania nanotubes for visible-light-activated photoelectrochemical biosensing. *Analytical Chemistry*, **82**, 2253-2261.
<https://doi.org/10.1021/ac9021055>
- Çetinkaya, S., Khamidov, G., Özcan, L., Palmisano, L. and Yurdakal, S., 2022. Selective photoelectrocatalytic oxidation of glycerol by nanotube, nanobelt and nanosponge structured TiO₂ on Ti plates. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **10(2)**, Article number 107210.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107210>
- Durdu, S., Yalçın, E., Altınkök, A. and Çavuşoğlu, K., 2023. Characterization and investigation of electrochemical and biological properties of antibacterial silver nanoparticle-deposited TiO₂ nanotube array surfaces. *Scientific Reports*, **13(1)**, Article number 4699.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-31937-6>
- Herrmann J.M., 1999. Heterogeneous photocatalysis: Fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis Today*, **53**, 115–129.
[https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00107-8](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00107-8)
- Ma, X., Chen, Q. Liu, G., Zhou, Y., Ma, D., Xin, S., Yu, C., Zhang, B. and Xin, Y. 2020. Construction of netlike 3D Z-scheme photoelectrodes with improved photocatalytic performance based on g-C₃N₄ nanosheets modified TiO₂ nanobelt-tubes. *Chemical Engineering Science*, **22623**, Article number 115844.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115844>
- Mahlambi M. M., Ngila C. J. and Mamba, B. B., 2015. Recent developments in environmental photocatalytic degradation of organic pollutants: The case of titanium dioxide nanoparticles-A review. *Journal of Nanomaterials*, Article ID 790173.
<https://doi.org/10.1155/2015/790173>
- Malato S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado M.I., Blanco J. and Gernjak, W., 2009. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. *Catalysis Today*, **147**, 1–59.
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.06.018>
- Özcan L., Yurdakal S., Augugliaro V., Loddo V., Palmas S., Palmisano G. and Palmisano L., 2013. Photoelectrocatalytic selective oxidation of 4-methoxybenzyl alcohol in water by TiO₂ supported on titanium anodes. *Applied Catalysis B: Environmental*, **(132–133)**, 535–542.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.12.030>
- Özcan L., Yalçın P., Alagöz O. and Yurdakal S., 2017. Selective photoelectrocatalytic oxidation of 5-(hydroxymethyl)-2-furaldehyde in water by using Pt loaded nanotube structure of TiO₂ on Ti photoanodes. *Catalysis Today*, **281**, 205–213.
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.07.024>
- Özcan, L., Mutlu, T. and Yurdakal, S., 2018. Photoelectrocatalytic degradation of paraquat by Pt loaded TiO₂ nanotubes on Ti anodes. *Materials*, **11(9)**, Article number 1715.
<https://doi.org/10.3390/ma11091715>
- Özcan, L. and Efe, E., 2019. Photoelectrochemical determination of paracetamol by using TiO₂ modified FTO Electrodes. *Analytical and Bioanalytical Electrochemistry*, **11(8)**, 1117-1128.
- Rios, J., Santini, V.N., Pereira, K.D., Luchessi, A.D., Lopes, É.S.N., Caram, R. and Cremasco, A., 2022. Self-

- organized TiO₂ nanotubes on Ti-Nb-Fe alloys for biomedical applications: Synthesis and characterization. *Electrochemistry Communications*, **138**, Article number 107280.
<https://doi.org/10.1016/j.elecom.2022.107280>
- Sabzi, M. and Mousavi Anijdan, S.H., 2019. Microstructural analysis and optical properties evaluation of sol-gel heterostructured NiO-TiO₂ film used for solar panels. *Ceramics International*, **45(3)**, 3250-3255.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.229>
- Smith, Y.R., Ry, R.S., Carlson, K., Sarma, B. and Misra, M., 2013. Self-ordered titanium dioxide nanotube arrays: anodic synthesis and their photo/electro-catalytic applications. *Materials*, **6**, 2892-2957.
<https://doi.org/10.3390/ma6072892>
- Su, Y.-L., Zhang, F.-B., Du, Y.-X. and Xiao, Y.-T., 2009. Preparation of TiO₂ nanotubes by anodization and its photocatalytic properties. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, **25(11)**, 1994-2002.
- Syrek, K., Skolarczyk, M., Zych, M., Sołtys-Mróz, M. and Sulka G.D., 2019. A photoelectrochemical sensor based on anodic TiO₂ for glucose determination. *Sensors*, **19(222)**, Article number 4981.
<https://doi.org/10.3390/s19224981>
- Tekin, T., Tekin, D. ve Kızıldaş, H., 2016. TiO₂ ve AgS katkılı TiO₂ nanotüp fotokatalizörlerinin sentezlenmesi ve karakterizasyonu. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, **31(ÖS 2)**, ÖS 181-ÖS 186.
<https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.316757>
- Vural, K.B., Kaderoğlu, Ç. and Ellialtıoğlu, Ş., 2023. Density functional theory investigation of Pr adsorption on the anatase TiO₂(101) surface for photovoltaic applications. *Applied Surface Science*, **613**, Article number 156042.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.156042>
- Wang, G.-L., Xu, J.-J., Chen, H.-Y. and Fu, S.-Z., 2009. Label-free photoelectrochemical immunoassay for α -fetoprotein detection based on TiO₂/CdS hybrid. *Biosensors and Bioelectronics*, **25**, 791-796.
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2009.08.027>
- Wang, M., Zhan Y., Wang H., Zhang, C., Li G. and Zou, L., 2022. A photoelectrochemical sensor for glutathione based on Bi₂S₃-modified TiO₂ nanotube arrays. *New Journal of Chemistry*, **46(17)**, 8162-8170.
<https://doi.org/10.1039/D1NJ06045G>
- Xing, L., Jia, J., Wang, Y., Zhang, B. and Dong, S., 2010. Pt modified TiO₂ nanotubes electrode: Preparation and electrocatalytic application for methanol oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, 12169-12173.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.162>
- Yılmaz, H.Ç., İlhan C., Akgeyik E. and Erdemoğlu S., 2021. Preparation and characterization of Co doped TiO₂ for efficient photocatalytic degradation of ibuprofen. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*, **8(2)** 553-566.
<https://doi.org/10.18596/jotcsa.855107>
- Zhang F.-S. and Itoh, H., 2006. Photocatalytic oxidation and removal of arsenite from water using slag-iron oxide-TiO₂ adsorbent. *Chemosphere*, **65**, 125-131.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.02.027>
- Zheng C., Lin J., Song X., Gan Q. and Lin X., 2022. TiO₂-Nanoparticle-shelled light-driven microcleaner for fast and highly efficient degradation of organic pollutants. *ACS Applied Nano Materials*, **5(11)**, 16573-16583.
<https://doi.org/10.1021/acsanm.2c03659>

Karahallı (Uşak, GB Türkiye) Havzasında Bulunan Pliyo-Pleistosen Yaşlı Gömülü Sedimanter Birimlerin Mineralojisi ve Jeokimyası

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 06.11.2023

Kabul/Accepted: 08.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Mineralogy and Geochemistry of Plio-Pleistocene aged Buried Sedimentary Units in the Karahallı Basin (Uşak, SW-Türkiye)

Tülay ALTAY^{1*}, Ali KORKMAZ²

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

²Adıyaman Belediyesi, Adıyaman, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Karahallı havzası Batı Anadolu da KD-GB uzanımlı Çivril-Baklan Grabeni'nin kuzeybatısında bulunur. Tektonik aktivitenin etkin olarak gözlemlendiği çalışma alanında ilk kez tanımlanan gömülü Pliyo-Pleistosen yaşlı birimlerin mineralojik, jeokimyasal özelliklerinin incelenmesi ve havzanın tektono-sedimanter gelişiminin ortaya konulması amaçlanmıştır. Çalışma amacı kapsamında, arazi çalışmalarıyla birlikte 10 adet derin sondaj logu kullanılmış ve birbirleriyle korele edilmiştir. Derinliği 342 m ile 670 m arasında değişen sondajlarda yüzlerce metre kalınlığa sahip fluvial ve gölsel birimler kesilmiştir. Fluvial birimler zayıf pekişmiş çakıltaşı, yer yer çapraz tabakalı kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı gibi kırıntılı birimlerden oluşmaktadır. Gölsel tortullar yaygın olarak, fosilli, organik malzeme içeren kalkerli çamurtaşı, kilttaşı, killi kireçtaşı, kireçtaşı, marn, kömür ve travertenlerden oluşmaktadır. Karahallı havzasının akarsular tarafından sürekli olarak beslendiği ve batıya ve kuzeydoğuya doğru giderek derinleşen bir göl havzası olduğu belirlenmiştir. İncelenen örneklerde XRD analizleri ile kil mineralleri, kalsit, dolomit, feldispat, kuvars, jips ve anhidrit belirlenmiştir. Traverten ve kireçtaşlarının başlıca kalsit mineralinden oluştuğu; marn, çamurtaşı ve killi kireçtaşların da ise kil, kalsit ve dolomit mineralinin bulunduğu belirlenmiştir. Kil minerallerinin analizi ile Mg-simektit, Na-simektit, illit ve kaolinit tespit edilmiştir. SEM çalışmalarında simektit tipik bal peteği ve mısır gevreği morfoloji göstermiştir. Küçük, iyi gelişmemiş romboedrik kalsit ve dolomit kristalleri gözlenmiştir. Jeokimyasal analiz sonuçları değerlendirildiğinde kayaçların aynı kökenden kaynaklandığı ve yaygın olarak asidik bileşimli birimlerden oluştuğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karahallı Havzası; Pliyo-Pleistosen; G-B Türkiye; Kil; Karbonat.

Abstract

Karahallı basin is located in the northwest of the NE-SW trending Çivril-Baklan Graben in Western Anatolia. It is aimed to examine the mineralogical and geochemical properties of the buried Plio-Pleistocene aged units identified for the first time in the study area where tectonic activity is actively observed and to reveal the tectono-sedimentary development of the basin. 10 deep drilling logs were used and correlated with each other besides field observations. In drillings with depths ranging from 342 m to 670 m, fluvial and lacustrine units with a thickness of hundreds of meters have been cut. Fluvial sediments consist of clastic units such as weakly consolidated conglomerate, locally cross-layered sandstone, mudstone and siltstone. Lacustrine sediments commonly consist of calcareous, fossiliferous mudstone containing organic material, clayey limestone, limestone, claystone, marl, coal and travertine. It has been determined that the Karahallı basin is a lake basin that is constantly fed by rivers and gets deeper towards the west and northeast. Calcite, dolomite, anhydrite, gypsum, feldspar, quartz and clay minerals were determined in the examined samples by XRD analysis. Travertine and limestone are mainly composed of calcite minerals; marl, mudstone and clayey limestone contain clay, calcite and dolomite. From the clay minerals, Mg-smectite, Na-smectite, illite and kaolinite were detected. In SEM studies, smectite showed typical honeycomb and cornflake morphology. Small, poorly developed rhombohedral calcite and dolomite crystals are observed. According to geochemical analysis results, it was determined that the rocks originate from the same origin and commonly consist of units with acidic composition.

Keywords: Karahallı Basin; Plio-Pleistocene; S-W Türkiye; Clay; Carbonate.

1. Giriş

Karahallı havzası, Batı Anadolu genişlemeli tektonik rejimi içerisinde gelişen, doğuda Isparta büklümü ile batıda Gediz ve Büyük Menderes grabenlerinin arasında kalan, önemli tektonik yapılardan biri olan Çivril-Baklan grabenin kuzey kesiminde yer almaktadır (Şekil 1). Bölgedeki graben havzalarda tektonik aktivite, stratigrafi ve çökeltme sistemleri ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Eriç 1957, Ünal 1981, Koçyiğit 1984, Çakmakçoğlu 1986, Konak vd.

1986, Göktaş vd. 1988, Öztürk ve Öztürk 1989, Savaşçın and Güleç 1990, Özkul et al. 2002, Toker 2009, Boyraz 2011, Emre et al. 2011, Gürbüz et al. 2012, Altay ve Dumlupınar 2013, Altay et al. 2018, Özalp et al. 2018, Korkmaz 2018, Özsayın et al. 2020). Bölgedeki kömür içeren Neojen havzaların linyit potansiyeli ve oluşumu (Konyalı 1970, Karayığıt et al. 2015, Bechtel et al. 2016, Koralay 2020) ve havzaların paleoklimsel ve paleoortamsal durumu hakkında da önemli çalışmalar

bulunmaktadır (Çakır 1999, Akgün et al. 2007, Özkul et al. 2013, Alçıçek et al. 2015, Toker 2017, Kayseri-Özer and Emre 2022, Tagliasacchi et al. 2024, Alçıçek et al. 2023).

Özalp vd. (2018)'de Çivril Graben Sistemi üzerinde tektonik amaçlı yaptıkları çalışmada, Çivril ve Dinar fayları ayrıntılı olarak çalışılmıştır. Graben dolgularının Pliyo-Kuvaterner yaşlı göl ve akarsu sedimanlarından, Geç Pleistosen-Holosen dönemindeki taşkın düzlüğünden, göl-bataklık ve alüvyal yelpaze çökellerinden oluştuğunu belirtmişlerdir. Radyometrik yaş, duraylı izotop ($\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^{13}\text{C}$) ve palinolojik (polen ve spor) bulgular ile havzanın paleoiklimsel ve paleovejetasyonel durumu Tagliasacchi et al. (2024) tarafından incelenmiştir. Palinomorf birlikteliği, çökeltme alanının çevresindeki bataklık ortamını ve alçak-orta rakımlı alanı gösterdiği belirtilmiştir. Orta Pleistosen'de Uşak-Karahallı bölgesindeki paleoiklimsel sinyaller, ağırlıklı olarak ılıman iklimin hüküm sürdüğünü, ayrıca ortamın kurudan neme dönüştüğünü göstermektedir. Tüm bulgular, kırıntılı ve karbonat yataklarının çökmesinin topografya, tektonik aktivite ve iklimden etkilendiğini göstermektedir. Büyüme fayları gibi tektonik yapılar gölün dolgusunda çok önemli rol oynayarak çökmeye neden olmuş ve bu da sedimantasyon hızını etkilemiştir. Ayrıca hidrotermal su akışının traverten oluşmasında önemli bir rol oynadığı ve bu durumun çalışma alanındaki aktif fay sistemleriyle güçlü bir şekilde ilgili olabileceği düşünülmektedir (Tagliasacchi et al. 2024).

Yukarıda verilen çalışma alanı ve çevresinde bugüne kadar yapılan çalışmalar yüzey verilerine dayalı Batı Anadolu'nun jeolojik evrimine ışık tutan ve daha çok havzanın ekonomik önemi ile ilgili çalışmalardır. Bu çalışma kapsamında ise Karahallı havzasında ilk kez tanımlanan gömülü sedimanter birimlerin mineralojik ve jeokimyasal özelliklerinin incelenmesiyle oluşum süreçleri ve kökenlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmalar kapsamında araziden örnekleme ile beraber bölgede TKİ Genel Müdürlüğü tarafından kömür arama amacıyla yapılan derin sondajlar takip edilmiş, sondaj karotlarından örnekleme yapılmıştır. Sondaj logları, ayrıntılı olarak ele alınmış ve birbirleriyle korele edilmiştir. Böylelikle tektonik olarak oldukça aktif bir konuma sahip havzada tektonik hareketlerin varlığına bağlı olarak havzanın sedimanter gelişimi ortaya konulmuştur.

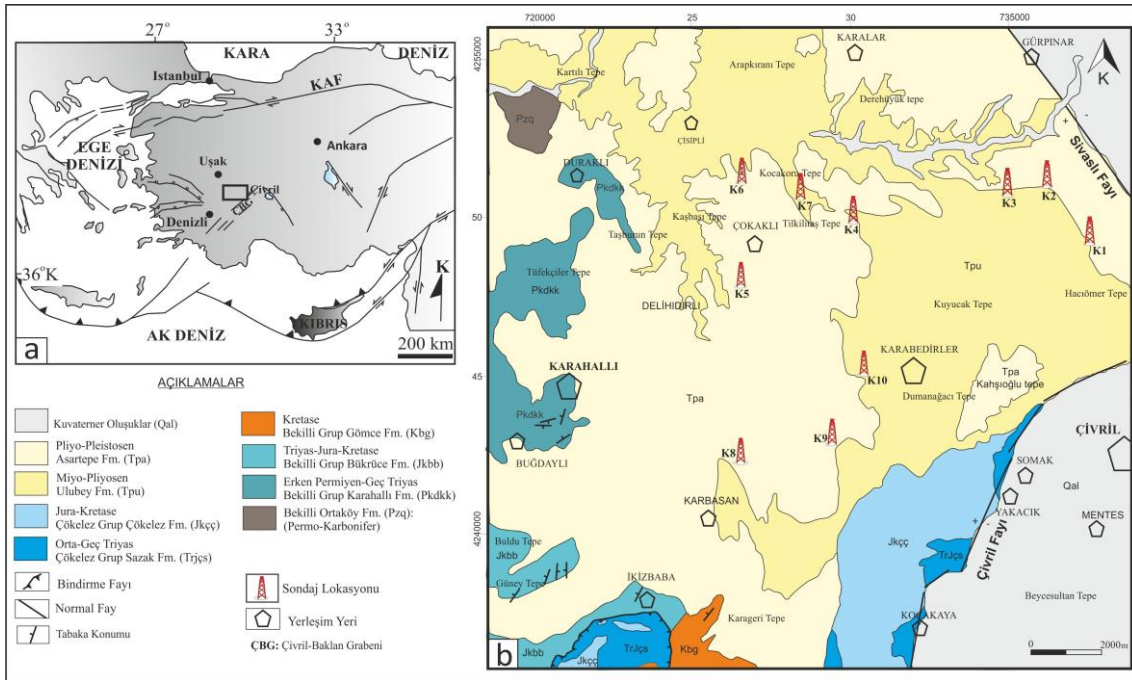
2. Materyal ve Metot

İnceleme alanında çalışmanın amacına uygun olarak 10 sondajdan ve araziden örnek alınmıştır (K1:342.5 m, K2:407 m, K3:364 m, K4:670 m, K5:466 m, K6:405 m, K7:350 m, K8:372 m, K9:391 m, K10:354 m (Şekil 1b, Çizelge 1). Derlenen örnekler sondaja ve alındığı metreye

göre adlandırılmıştır. Öncelikle çalışmanın amacına uygun olarak X-ışını difraksiyonu (XRD) analizi için 7 sondajdan seçilen 50 adet örnek havada kurutulduktan sonra Afyon Kocatepe Üniversitesi (AKÜ), Maden Mühendisliği, Cevher Hazırlama Laboratuvarında halkalı değirmende -100 μm boyutunda öğütülmüştür. Örnekler toz haline getirildikten sonra tüm kayaç mineralojik bileşimleri X-ışınları difraksiyon (XRD) analizi ile belirlenmiştir. X-ışınları çekimleri ile elde edilen difraktogramlardan itibaren mineral tanımlamaları JCPDS (1993) kartlarından faydalanarak yapılmıştır. Gündoğdu (1982) kütle absorpsiyon katsayıları kullanılarak minerallerin % içerikleri tespit edilmiştir. Bu yöntemin nispi doğruluğu % ± 15 dir.

Tüm kaya XRD grafikleri değerlendirildikten sonra kil içeriği yüksek 4 adet örneğin kil ayırma işlemi yapıldıktan sonra, normal, etilen glikol ve 550 °C fırınlı XRD çekim işlemleri yapılmıştır. Etilen glikol ile örnek 60 °C'de etüvde en az 1 saatten az olmamak üzere bekletilmiş, sonrasında ara vermeden XRD analizi yapılmıştır. Fırınlı çekimde ise örnek 550 °C etüvde 1 saatten az olmamak üzere bekletilmiştir. Yaklaşık 20 dakika kadar soğuduktan sonra XRD analizi yapılmıştır. Örneklerin normal çekimleri $2\theta=2^\circ-70^\circ$, etilen glikollü ve fırınlı çekimleri $2\theta=0^\circ-30^\circ$ aralığında yapılmıştır. X-ışını difraksiyonu analizleri, AKÜ - Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUAM) laboratuvarında Shimadzu 6000 model ve Bruker D8 Advance X-ışınları difraktometreleri kullanılarak yapılmıştır.

Seçilen örneklerin AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (TUAM) LEO VP-1430 model taramalı elektron mikroskop (SEM) ile minerallerin morfolojileri ile neoformasyon minerallerin ilişkileri, kristal büyüklükleri incelenmiştir. EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analizleri yapılarak minerallerin yarı nicel kimyasal bileşimleri belirlenmiştir. Örneklerin yüzey nemi uzaklaştırıldıktan sonra mineral görüntülerinin daha net olması amacıyla örnekler karbon ile kaplatılmıştır. Mineralojik analizlerin değerlendirilmesinden sonra çalışmanın amacına uygun olarak, havzayı temsil etmesi açısından K1, K4 ve K9 nolu sondajlardan belirlenen karbonat ve kilce zengin 26 adet örnek jeokimyasal özelliklerinin belirlenebilmesi için Acme (Kanada) Laboratuvarlarında, ana element oksit, iz ve nadir toprak elementleri, toplam C (TOT/C), toplam S (TOT/S) içerikleri belirlenmiştir. Analizlerde ICP-MS ve EAS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry, Emission Spectrometry) ile ana oksit ve iz element, ateşte kayıp, Leco analizi ile toplam C ve S analizleri yaptırılmıştır (Acme Laboratuvarı analiz kodu: LF200).



Şekil 1. (a) Çalışma alanının yer bulduru haritası, (b) Çalışma alanının jeoloji haritası (Konak vd. 1986, Erinç 1957'den faydalanılarak hazırlanmıştır) ve sondaj lokasyonları

3. Genel Jeoloji

Neojen tortullar ile doldurulmuş olan Karahallı havzasının temelini Menderes Masifi'nin örtü metamorfiteğine karşılık gelen Bekilli Grubu ve Çökelez Grubuna ait mermer, fillit, şist, gnays, dolomit, metaçakıtaşı, metakumtaşı ve metasilttaşı birimleri oluşturur (Şekil 1). Havza kuzeydoğudan ve güneydoğudan faylar ile sınırlandırılmıştır. Havzayı kuzey doğudan sınırlayan ve yaklaşık K-G uzanımlı, havza kenarını oluşturan Sivaslı (Gürpınar) fayı başlıca Neojen birimleri metamorfik kayalardan ayıran, büyüme fayı özelliğine sahip bir faydır (Yağmurlu vd. 2017). Fay yaklaşık 26 km uzunluğunda olup, Çivril ve Sivaslı ilçeleri arasında yer almakta olup, B-eğimli normal fay düzlemleri ile temsil edilmektedir. Havzayı dolaylı olarak kontrol eden bir diğer önemli yapı ise Çivril Fayı'nın Akpınar segmentidir (Özalp et al. 2018). Bu bölüm yaklaşık 12 km uzunluğunda olup Çivril ile Işıklı'nın kuzeyi arasında uzanır. K60D gidişli olup, metamorfik temel kayaları ve Neojen çökellerini Kuvaterner alüvyonlarıyla yan yana getiren GD eğimli normal fay düzlemleri ile karakterize edilir (Özsayın et al. 2020).

Havzada temel birimler üzerine uyumsuz olarak Miyö-Pliyosen yaşlı kiltası ve marn ara düzeylerinden oluşan Ulubey Formasyonu gelir (Konak vd. 1986, Erinç 1957). Ulubey Formasyonunun üzerine çalışmamızın da konusunu oluşturan Pliyo-Pleistosen yaşlı akarsu ve göl ortamında oluşan konglomera, kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı, kömür, marn, killi kireçtaşı ve travertenden oluşan Asartepe Formasyonu gelir. Asartepe

formasyonuna ait iri-orta taneli kırıntılılardan oluşan fluvial birimler Pliyosen yaşlıdır. İnce taneli kırıntılılar (çamurtaşı), kömür ve karbonatlardan (killi kireçtaşı, marn) oluşan göl çökelleri ise Pliyosen de çökelmiştir. Daha sonra (?) Erken-Orta Pleistosen yaşlı killi kireçtaşı, marn ve travertenler bu göl sisteminde çökelmiştir. Travertenler üzerinde yapılan ölçümler, bu karasal karbonatların Orta Pleistosen'de (~288 bin yıl) çökelmeye devam ettiğini göstermektedir (Tagliasacchi et al. 2024). Havza da geniş yayılım gösteren travertenler, istifin üst bölümünde diğer gölsel ve fluvial birimler ile beraber, oldukça kalın bir istif sunmaktadır (Şekil 1) Asartepe formasyonunun üzerine Kuvaterner yaşlı alüvyon çökeller gelir (Şekil 1b) (Konak vd. 1986, Erinç 1957).

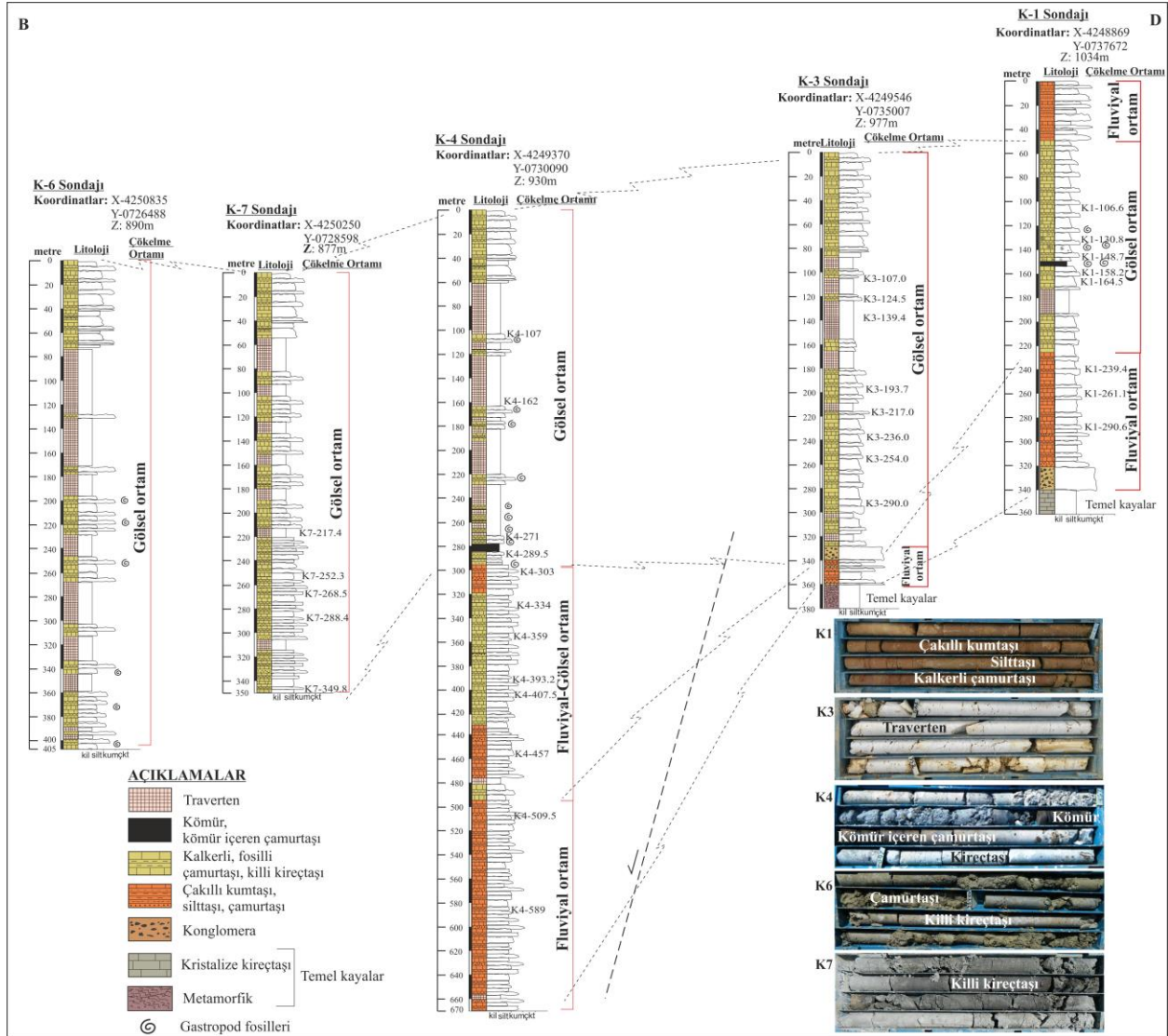
4. Bulgular

4.1. Sondaj Karotlarının Litolojisi

İnceleme alanında TKİ tarafından kömür arama amaçlı yapılan 10 adet derin sondajların derinliği 342 m ile 670 m arasında değişmektedir. En derin sondaj (K4) havzanın ortasında yapılırken, en sığ sondaj (K1) doğuda havza kenarında Sivaslı fayına yakın yapılmıştır (Şekil 1b). K1, K2, K3, K5, K8 ve K9 sondajlarında temel kayalara kadar sondaj devam etmiştir (Korkmaz 2018). Menderes Masifinin kenar zonuna ait litolojilerden taşınarak gelmiş olan metamorfik kayalardan oluşan temel kayalar (mermer, rekristalize kireçtaşları, fillit, kuvars-şist ve sleyt), K1 sondajında 339. metrede, K2 sondajında 399. metrede, K3 sondajında 360. metrede, K5 sondajında 460. metrede, K8 sondajında 365. ve K9 sondajında 390. metrede kesilmiştir. En derin sondaj olan K4 sondajında

temel kayalara ulaşmamıştır. Sondajlarda temel kaya birimlerinin üzerine fluvial ortamda oluşan karasal kırıntılılar (çakıltaşı, yer yer çapraz tabakalı çakilli kumtaşı, siltaşı, çamurtaşı) gelmektedir. Yüzlerce metre kalınlık

sunan bu istif, yanal ve düşey yönde geçişli gösel tortullar (kalkerli, fosilli, organik malzeme içeren çamurtaşı, kiltası, killi kireçtaşı, kömür, marn ve traverten) ile yer yer ardalanmalı olarak bulunmaktadır (Şekil 2 ve Şekil 3).



Şekil 2. Çalışma alanında yapılan sondajların B-D doğrultulu korelasyonu, karot fotoğrafları (Sondaj kesitleri üzerinde örnek numaraları ve yerleri gösterilmiştir, sondajların lokasyonu için Şekil 1b'ye bakınız).

K1 ve K10 sondajında üst seviyelerde fluvial ortamda oluşan karasal kırıntılı birimler, yaklaşık 50 metre kalınlıkta gözlenirken diğer sondajlarda, bu karasal kırıntılılar üst seviyelerde gözlenmeyip gösel karbonatlı tortullar yüzeye kadar ulaşan kalın istifler sunmaktadır. K4 sondajında yüzeyden 295 m ye kadar gösel birimler kesilmiştir. 295 m den 475 m ye kadar fluvial ve göl ortamına ait birimler yanal düşey geçişli olarak gözlenmiştir. 475 m den kuyu tabanına kadar (670 m) ise fluvial ortamda oluşan karasal kırıntılılar gözlenmiştir. K6 (405 m) ve K7 (350 m) sondajlarında sadece gösel çökeller gözlenmiştir. Havzanın doğusunda bulunan K2 sondajında yüzeyden 350 m ye kadar, K3 sondajında 330 m ye kadar, havzanın güneyinde bulunan K9 sondajında yüzeyden 210 m, K8 sondajında ise 255 m ye kadar gösel birimler

gözlenmiştir. Bu sondajlarda belirtilen metrelere göre yaklaşık 20-170 m kalınlıkta fluvial ortamda oluşan karasal kırıntılı birimler gözlenmiş ve daha sonra temel birimlere girilmiştir. K1, K2 ve K3 sondajlarında temel kayalar deniz seviyesine göre birbirine yakın yükseklikte yer almaktadır. Fluvial ortam kırıntılılarının kalınlığı doğudan batıya doğru azalırken, gösel çökellerin kalınlığı artar, bu da gömülü faylara bağlı olarak havzanın batıya doğru derinleşmesini temsil eder (Şekil 2). Sondaj logları incelendiğinde havza da oldukça kalın seviyeler halinde gözlenen travertenler, yaygın olarak istifin üst bölümünde bulunur ve diğer gösel ve fluvial birimler ile beraber, gömülü fayların etkisi ile batıya doğru ve havzanın kuzey doğusundaki Sivaslı fayına doğru kalınlığı artmaktadır.

K4 sondajının 275. metrelerinde, siyahımsı, koyu kahve renkleri arasında değişen, kömür ile organik madde içeriği yüksek yer yer kömür izli çamurtaşı ardalanmasından oluşan yaklaşık 7 m kalınlıkta bir istife rastlanılmıştır. Bu organik maddece zengin katmanın içinde kalınlığı 2 ile 25 cm arasında değişen ince kömür seviyeleri bulunmaktadır. Bu kömürler siyahımsı, ortaç pekleşmiş ve mat görünüm göstermektedir (Şekil 2 ve Şekil 3).

K10 sondajında ise organik maddece zengin kömürlü seviyeler, K4 sondajı ile yakın metrelerde ama daha ince bir damar olarak kesilmiştir. K1 sondajında 152 ile 154 m arasında, başlıca kömür içeren çamurtaşı ve kiltaşından oluşan bir seviye kesilmiştir. Bu kömürlü seviye içinde kalınlığı 20 cm ve siyahımsı renkli, sert linyitten oluşan kömür damarı kesilmiştir. İncelenen sondajlarda, kalkerli çamurtaşı, killi kireçtaşlarının içinde yer yer gösel ortamı karakterize eden yoğun gastropod kavkalarına rastlanılmıştır (Şekil 2 ve Şekil 3).

4.2. Mineralojik İncelemeler

XRD çalışmalarıyla kil mineralleri, kalsit, dolomit, feldispat, kuvars, jips ve anhidrit tespit edilmiştir (Çizelge 1, Şekil 4a, b, c ve d). Örneklerde karbonat ve kil mineralleri yaygın olarak bulunmaktadır. Fluvial ortamda oluşan karasal kırıntılılar da kil, kuvars ve feldispat mineralleri yüksek, karbonat minerallerinden kalsit ve daha az oranda dolomit içermektedir. Gösel ortamda oluşmuş traverten ve kireçtaşlarının başlıca kalsit mineralinden oluştuğu; marn, çamurtaşı ve killi kireçtaşlarında ise kil, kuvars, feldispat, kalsit ve dolomit minerallerinin bulunduğu belirlenmiştir. Çoğunlukla havzanın üst seviyelerinde gösel ortamda oluşmuş kiltaşları az oranda kuvars, feldispat, kalsit ve dolomit içermektedir. Sülfat minerallerinin (jips ve anhidrit) yalnız K1, K3 ve K4 sondajlarındaki gösel ortamda oluşmuş marn ve killi dolomitik kireçtaşı örneklerinde bulunduğu tespit edilmiştir. K1 ve K3 sondajında anhidrit bulunurken, K4 sondajının alt seviyelerinde anhidrit üst seviyelerinde ise jips bulunmaktadır (Çizelge 1).

Havzadaki sondaj örneklerinden marn ve kiltaşlarında yapılan kil boyu XRD normal çekimlerinde 14.73 Å, 14.83 Å da, etilen glikol uygulanan çekimlerinde 17.40 Å, 18.42 Å da pik veren Mg-Simektit gözlenmiştir. Simektitlerin $d_{(060)}$ piki 1.54 Å dur. Bu parametrenin 1.51 Å üzerinde gözlenmesi trioktaedrik karakteri belirtir. Ayrıca, normal çekimlerinde 12.62, 12.68 Å da, etilen glikol uygulanan çekimlerinde 17.33 Å, 17.15 Å da pik veren Na-Simektit mineralleri tespit edilmiştir. Bu minerallerin yanında illit ve kaolinit mineralleri belirlenmiştir. İllit mineralinin; normal, 550 °C de ve etilen glikollü çekimlerde 10.30 Å,

10.12 Å da pikleri gözlenmiştir. Kaolinit mineralinin ise E.G. de 7.15 Å, normal çekimde ise 7.13 Å daki pikleri gözlenmiştir. 550 °C de yüksek sıcaklık pikinin elde edilmemesi ile kaolinit tespit edilmiştir (Şekil 4e ve f).

4.3 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve EDS İncelemeleri

Taramalı elektron mikroskop (SEM) çalışması ile inceleme alanında tespit edilen minerallerin morfolojileri, kristal büyüklükleri, bileşimi, birbirleri ile olan ilişkileri ve oluşumunun incelenmesi hedeflenmiştir. İncelenen örneklerde simektit tipik mısır gevreği ve bal peteği morfoloji gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 5a). Aksesuar olarak dolomit içeren K1-106.6 nolu kiltaş örneğinde (Çizelge 1) Mg-simektitlerin EDS analizinde yüksek, Si, Al ve Mg ve az oranda Ca ve Fe tespit edilmiştir (Şekil 5b). Ayrıca gösel ortamda oluşmuş marnlarda yapılan incelemelerde tespih tanesi şeklinde muhtemelen mikro fosillerin (diatom?) varlığı tespit edilmiştir (Şekil 5c). Söz konusu oluşumların EDS analizinde Si, Al içerikleri yüksek, Mg, Ca, Fe ve K içeriği düşük çıkmıştır. Bu mineralleşmelerle birlikte feldispat kristalleri de gözlenmiştir (Şekil 5c). Feldispatın EDS analizinde Si, Al içerikleri yüksek, K, Ca ve Mg içeriği düşük çıkmıştır (Şekil 5d). Killi dolomitik kireçtaşı örneğinin SEM incelemelerinde kaolinitin psödohekzagonal levhaları, kitapçıkları ve akordiyon yapıları gözlenmiştir (Şekil 5e). SEM çalışmalarında killi dolomitlerde yer yer düzensiz gelişmiş romboedrik dolomit kristalleri belirlenmiştir. Dolomitlerin aşamalı büyüdüğü gözlenmiş ve dolomit mineralleri üzerinde büyüme izleri gözlenmiştir (Şekil 5f ve Şekil g). Killi kireçtaşı örneklerinde kalsit minerallerinin ise küçük, özşekilsiz, yarı özşekilli olduğu gözlenmiştir (Şekil 5h).

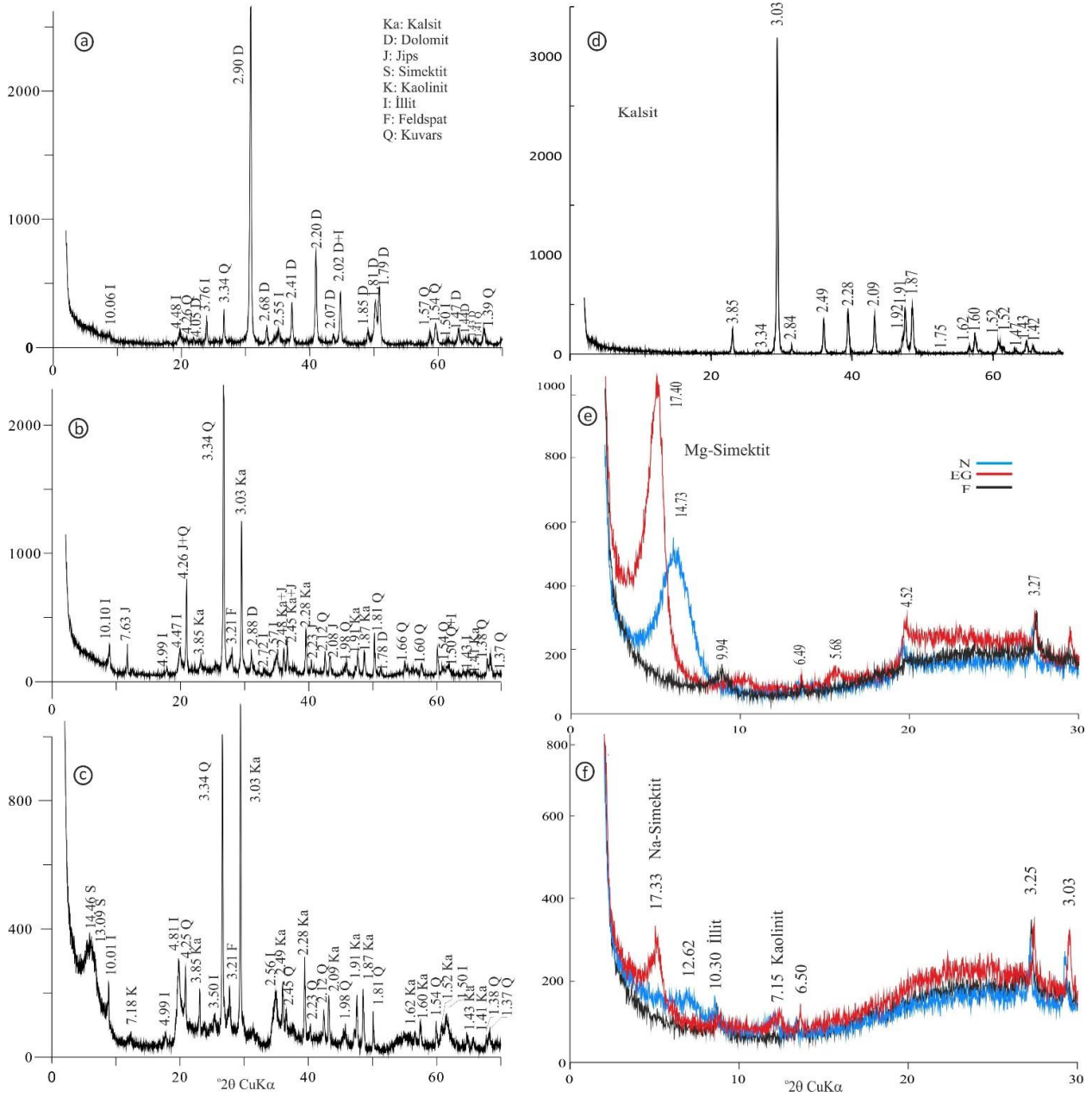
4.4. Jeokimyasal İncelemeler

Kimyasal analizi yapılan örneklerin ana element oksit, ateşte kayıp (AK), toplam C, toplam S ve iz element içerikleri Çizelge 2' de verilmiştir. K1 sondajı havzanın kuzeydoğusunda Sivaslı fayına yakın, K4 sondajı havzanın merkezi kesiminde yer alırken, K9 sondajı havzanın güney kesiminde yer almaktadır. Analizlere bakıldığında kil içeriği yüksek gösel ortamda oluşmuş marn, kiltaş ve fluvial ortamda oluşmuş çamurtaşı örneklerinde SiO₂ içeriği yüksektir (37.42-58.1%). Al₂O₃ içeriğine bakıldığında SiO₂ ile K1 ve K4 sondaj örneklerinde paralel hareket ederken, K9 sondaj örneklerinde belirgin bir ilişki gözlenmemiştir. MgO içeriğinin özellikle K1 sondaj örneklerinde yüksek olduğu gözlenmiştir. K₂O ile SiO₂ ve Al₂O₃ arasında K1 ve K4 sondajında pozitif, K9 da ise bir ilişki gözlenmemiştir. CaO içeriği özellikle karbonat içeriği

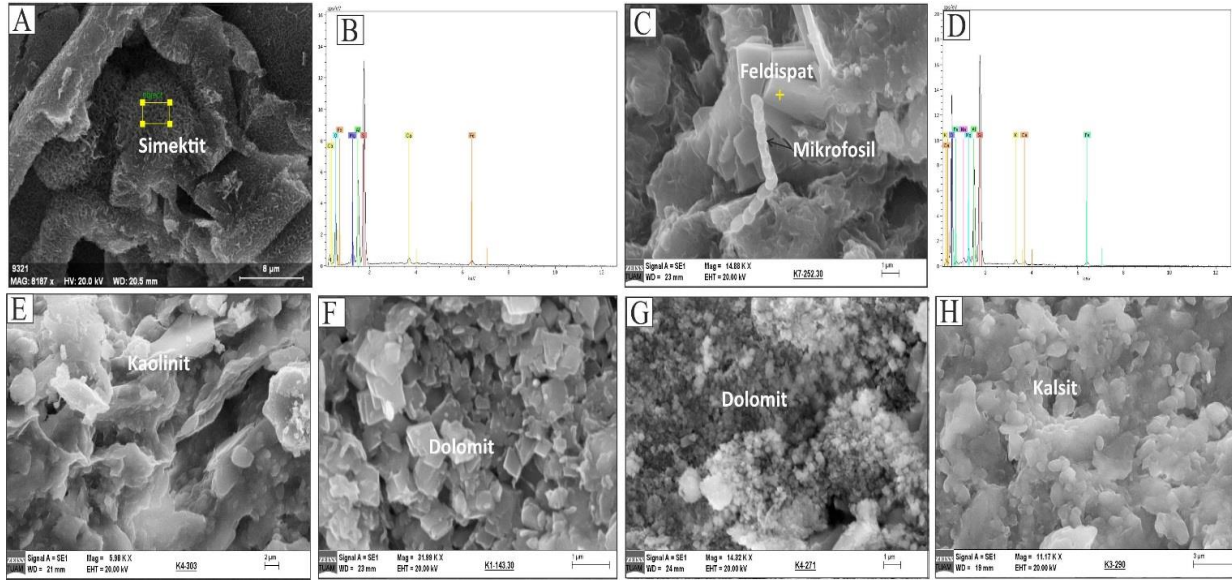
yüksek gösel ortamda oluşmuş killi kireçtaşı ve dolomit örneklerinde (K1-143.3, K1-148.7, K1-158.7, K4-271, K9-158) yüksektir (24.82-38.58%) CaO ile Toplam C tüm sondaj örneklerinde paralel hareket etmektedir (Çizelge 2, Şekil 6). Toplam S içeriği jips mineral içeriğine bağlı olarak iki marn örneğinde (K4-289.5, K4-303) tespit edilmiştir (sırasıyla 1.06, 1.32%).

Örnekler de Sr içeriği 140.6ppm ile 2977.5 ppm arasında değişmektedir. Sr içeriğinin karbonatça zengin olan

örneklerde kilce zengin olan örneklere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle killi dolomitik kireçtaşı örneklerinde (K1-148.7, K4-271) Sr içeriğinin en yüksek değerlerde olduğu gözlenmiştir (sırasıyla 1303.9 ppm, 2977.5 ppm). İncelenen örneklerde Ba; 75-830 ppm, Rb; 7.2-202.1 ppm, Zr; 10.3-667.5 ppm, Sc; 1-17 ppm, V; 8-118 ppm, Ni; 20-350 ppm arasında değişmektedir. Kilce zengin marn ve kiltası örneklerinde ise karbonat içeriği yüksek örneklere göre daha yüksek miktarda V, Sc, Cr, Co, As, Ba, Rb, Th içerikleri belirlenmiştir (Çizelge 2).



Şekil 4. a) K1-143.3 nolu killi dolomit, b) K4-289.5 nolu marn, c) K8-71.3 nolu karbonatlı killi kireçtaşı, d) K4-107 nolu traverten örneğinin tüm kayaç XRD grafikleri e) K1-106.6 nolu örneğinin kil boyu XRD grafiği, f) K9-190.2 nolu örneğinin kil boyu XRD grafiği (N: Havada kurutulmuş, EG: Etilen glikol ile muamele edilmiş, F: 550 °C'de fırınlanmış).



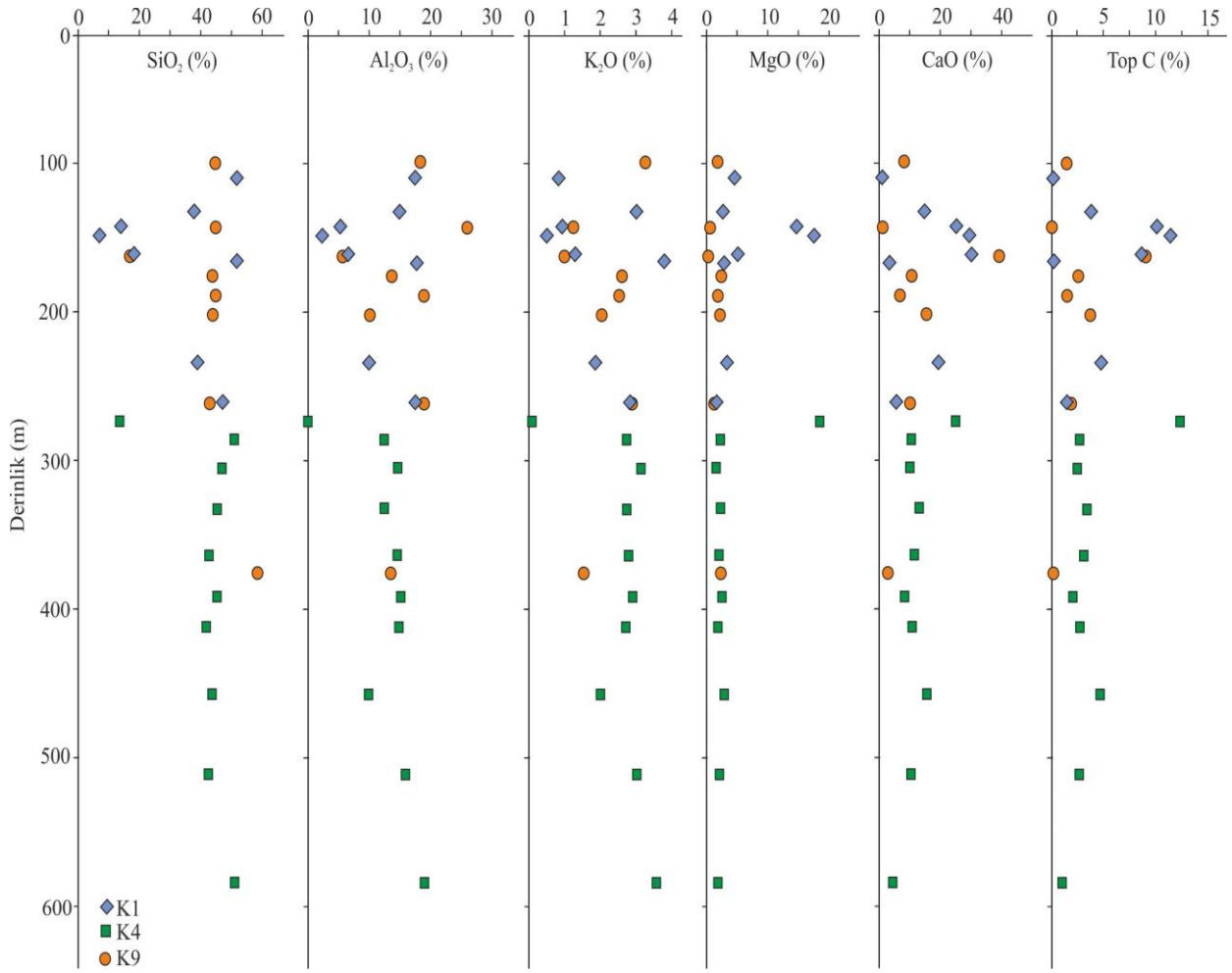
Şekil 5. a) Bal peteği morfolojisi gösteren simenkit (K1-106.6), b) Simenkitin EDS analizi c) kil mineralleşmelerinin içerisinde gözlenen mikro fosiller (diatom?) ve prizmatik feldispat kristalleri d) feldispatın EDS analizi, e) psödoheksagonal kaolinit levhaları, f) romboedrik şekillerde gözlenen dolomitler ve dolomitlerde gözlenen aşamalı büyüme, g) küçük, düzensiz gelişmiş dolomitler, h) özşekilsiz, yarı özşekilli kalsit kristalleri.

Çizelge 2. Sondajlardan seçilen örneklerin ana element oksit, AK, toplam C, toplam S (%) ve iz element (ppm) içerikleri.

Örnek	K1-106.6	K1-130.8	K1-143.3	K1-148.7	K1-158.2	K1-164.5	K1-239.4	K1-261.1	K4-271	K4-289.5	K4-303	K4-334	K4-359	K4-393.2	K4-407.5	K4-457	K4-509.5	K9-589	K9-100	K9-144.5	K9-158	K9-174.3	K9-190.2	K9-200.25	K9-262.5	K9-371.2
SiO ₂	51.7	37.96	13.54	6.86	18.1	51.75	37.42	47.37	12.81	51.05	47.2	46.41	44.43	46.8	43.51	45.17	43.21	50.24	43.75	45.41	17.29	43.66	45.73	43.09	43.32	58.1
Al ₂ O ₃	17.45	14.73	4.45	2.14	6.38	17.29	10.02	17.41	0.61	11.97	14.42	11.97	13.86	15.45	14.53	9.48	16.43	18.53	19.02	26.45	5.21	13.84	18.77	11.22	18.73	13.55
Fe ₂ O ₃	2.01	4.71	2.06	1.17	2.26	5.5	4.01	7.11	0.23	4.42	5.29	4.0	4.92	5.39	5.25	2.98	4.74	5.57	6.99	5.69	2.15	5.76	4.54	4.49	3.34	4.89
MgO	4.27	2.81	14.74	16.78	5.32	2.64	3.55	2.06	17.91	1.82	2.03	2.53	2.44	2.78	2.18	2.83	2.0	2.36	1.78	1.04	1.09	2.48	2.19	1.9	1.78	2.4
CaO	1.62	14.64	24.82	29.04	31.79	3.02	18.59	6.57	25.01	11.76	10.73	13.02	12.01	8.11	12.32	16.67	11.24	4.18	8.06	1.49	38.58	11.98	7.48	16.45	10.13	3.66
Na ₂ O	0.39	0.2	0.14	0.1	0.07	1.49	0.1	0.25	0.1	0.47	0.5	0.48	0.39	0.34	0.31	0.47	0.32	0.7	0.33	0.46	0.1	0.26	0.69	0.36	1.69	0.51
K ₂ O	0.92	3.08	0.9	0.43	1.3	3.97	1.92	2.81	0.12	2.74	3.22	2.79	2.84	2.91	2.72	2.13	3.04	3.49	3.36	1.38	1.01	2.68	2.67	2.19	2.94	1.63
TiO ₂	0.38	0.59	0.16	0.1	0.2	0.55	0.46	0.8	0.03	0.59	0.65	0.52	0.49	0.52	0.5	0.66	0.69	0.83	0.36	0.26	0.67	0.58	0.4	0.59	0.59	
P ₂ O ₅	0.04	0.22	0.05	0.04	0.04	0.14	0.07	0.11	0.02	0.09	0.1	0.09	0.08	0.06	0.09	0.09	0.09	0.12	0.07	0.07	0.05	0.09	0.11	0.08	0.17	0.06
MnO	0.01	0.08	0.04	0.03	0.05	0.05	0.06	0.05	0.01	0.05	0.07	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.02	0.06	0.02	0.1	0.04	0.03	0.04	0.05	0.06
Cr ₂ O ₃	0.002	0.018	0.006	0.004	0.006	0.004	0.016	0.023	0.002	0.018	0.017	0.015	0.014	0.015	0.017	0.017	0.017	0.018	0.03	0.005	0.011	0.029	0.016	0.025	0.006	0.022
AK	20.9	20.7	38.7	42.8	34.2	13.3	23.6	15.2	42.5	14.8	15.6	17.9	18.2	17.4	18.3	19.4	17.9	13.8	15.5	17.3	34	18.3	16.9	19.4	17.1	14.3
Top C	99.74	99.81	99.67	99.55	99.77	99.76	99.81	99.83	99.35	99.84	99.83	99.82	99.79	99.78	99.79	99.8	99.8	99.78	99.84	99.79	99.91	99.84	99.77	99.84	99.76	99.85
Top S	0.17	3.42	10.16	11.78	8.4	0.46	4.84	1.46	12.39	2.78	2.5	3.15	3.09	1.91	2.96	4.24	2.62	0.98	1.7	0.16	8.77	2.63	1.58	3.76	2.24	0.67
Ba	181	325	89	213	140	301	252	350	75	317	327	275	281	271	331	295	471	465	418	323	157	272	749	234	830	259
Ni	<20	109	86	27	45	52	70	130	<20	67	83	56	72	97	110	46	84	96	166	350	61	184	118	115	88	105
Sc	2	13	4	2	5	5	9	16	<1	10	12	9	11	11	11	8	14	14	17	3	5	12	10	9	3	11
Be	3	<1	<1	<1	1	2	<1	6	<1	4	3	<1	2	7	1	<1	3	3	3	3	3	4	2	4	9	4
Co	5.4	13.4	6.7	2.5	12.7	16	11.9	21.1	1.7	12.8	14.8	9.8	12.1	14.9	19.7	7.6	13.2	17.4	25.3	1.4	14.8	22.6	20.1	16	19.9	15.1
Cs	1.1	9.1	4.9	3.2	4.8	19.3	6.4	10.2	2.1	8.4	10.3	11	14	15.5	13.7	5.6	13.1	16.9	40.5	12.7	8.9	12.2	10.5	9.3	4.3	8.7
Ga	20	20.1	5.4	2.3	7.6	21.2	13.1	22.4	<0.5	13.8	17.5	15.2	17.9	19.5	18.3	11.6	19.7	23.8	24.1	36	5.5	16.7	20.6	13.3	23.8	15.5
Hf	15.1	4.2	1.3	0.7	2	11.7	3.5	5.3	0.1	6	6	6.6	6.4	7.5	5.9	5	6.6	5.5	4.8	17.7	1.7	4.9	9.9	5.6	7.4	5
Nb	59.9	20.7	6.8	3.3	9.1	55.2	11.6	22.3	1.7	20.6	24.1	25.4	27.5	29.6	27.1	14.6	24.4	24.7	21.2	33.4	7	18.6	30.6	18.2	27.2	13.9
Rb	32.6	144.5	48.4	26	111.1	185.3	100.4	147.2	7.2	137.4	158.8	163.3	188.9	212	202.1	97.7	174.3	192.1	180.4	76.9	55.2	133.4	123.2	110.2	86.3	98.8
Sr	340.7	408.2	459.9	1303.9	718.8	263.9	519	198.4	2977.5	271	261.4	341.6	458.5	446.2	417.2	647.8	309.7	424.1	140.6	276.9	259.1	270.1	380.2	282	669.8	190.8
Ta	3.4	1.2	0.4	0.2	0.6	2.7	0.8	1.7	<0.1	1.2	1.6	1.5	1.8	2.1	1.9	1	1.5	1.5	1.3	6	0.4	1	2.2	1.2	2	0.9
Th	48.2	15.9	5.3	2.2	7.6	35.9	11.2	18.1	0.6	18.5	22.3	25.3	27.1	30.2	28.2	13.8	28.5	29.3	15.2	105.9	6.1	16.5	49.1	17.6	68.3	12.9
V	20	9.3	28	19	52	45	70	118	8	76	87	61	81	76	90	61	101	101	146	<8	33	83	65	80	40	57
W	0.6	1.8	0.9	0.5	0.8	3.7	1.3	2	<0.5	1.6	2.8	2.3	3.4	2.9	2.5	1.7	3.5	2.5	1.8	1.6	0.8	2.3	3.1	2	2.7	2.5
Zr	667.5	167.7	51.1	29.2	79.5	503.4	128.6	199.5	10.3	229.6	228.5	253.3	238.8	270.9	230	191.8	265.6	222.8	173.5	385.5	77.2	178	345.7	233.3	225.8	207.1
Y	20.2	28	7.6	4.5	11.2	26.5	24.1	33.8	1.2	33.5	31	29.4	28.6	25	31.7	29.5	31.1	30.3	14.2	13.2	11.2	17.5	23.8	22.5	16.1	28.2

Analizi yapılan numunelerin NTE (Nadir toprak element) içerikleri, NTE anomali ve oranları Çizelge 3'de verilmiştir. Örneklerin toplam NTE içerikleri 9.12 ile 546.99 ppm arasında değişmektedir. Killi kireçtaşı ve dolomit gibi karbonatça zengin örneklerin (K1-143.3, K1-148.7, K1-

158.7, K4-271, K9-158) toplam NTE içeriklerinin kil oranı yüksek marn, kıltaşı gibi örneklerle oranla oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, K4-271 nolu killi dolomit örneğinde toplam NTE miktarı en düşük oranda (9.12 ppm) tespit edilmiştir (Çizelge 3).



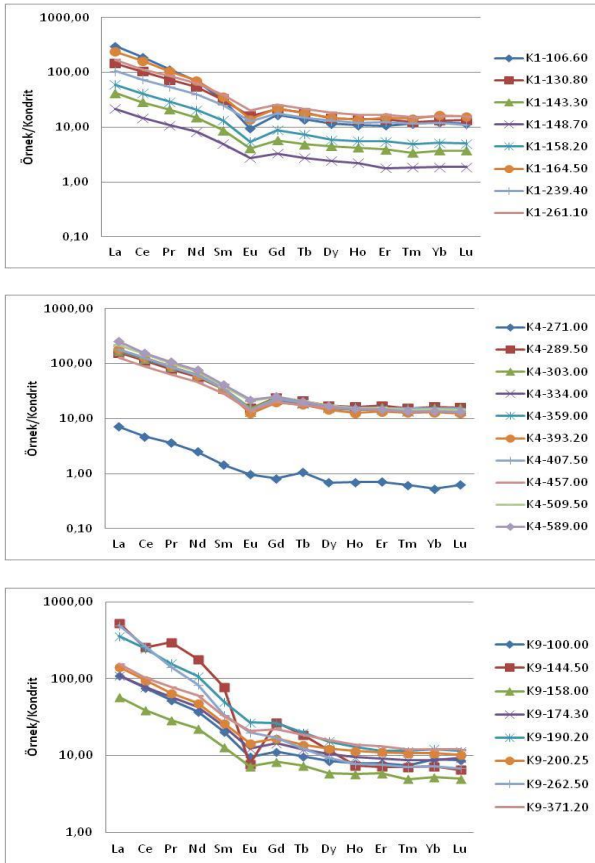
Şekil 6. Sondaj örneklerine ait elementlerin düşey dağılımı.

Çizelge 3. Sondajlardan seçilen örneklerin NTE içerikleri (ppm), anomali ve oranları

Örnek	K1-106.6	K1-130.8	K1-143.3	K1-148.7	K1-158.2	K1-164.5	K1-239.4	K1-261.1	K4-271	K4-289.5	K4-303	K4-334	K4-359	K4-393.2	K4-407.5	K4-457	K4-509.5	K4-589	K9-100	K9-144.5	K9-158	K9-174.3	K9-190.2	K9-200.25	K9-262.5	K9-371.2	
La	92.9	45.4	12.9	6.7	18.4	73.9	32.5	52	2.2	48.8	52.8	53.4	56.5	55.8	55.8	39.4	67	78.6	34.4	164.3	17.9	34.4	111.5	43.7	154.8	48	
Ce	152	83	23.1	11.8	33.4	131	59.8	90	3.8	91.2	98.7	99.8	99.5	103.2	102.1	72.2	119.6	125.4	62.2	207.3	31.7	62.7	201.6	77.3	214.3	83.1	
Pr	13.62	8.88	2.54	1.31	3.52	12.53	6.64	10.42	0.44	9.63	10.47	10.36	10.59	10.86	10.53	7.7	12.3	12.9	6.47	36.26	3.56	7.13	19.26	7.99	17.25	9.54	
Nd	41.5	32.3	8.9	4.9	12.3	42.4	23.5	37.2	1.5	34.9	37.2	36.6	37.6	36.4	36.6	27.4	43.4	45.2	22.5	107.7	13.5	25.8	64.4	28.6	50.4	36.5	
Sm	6.14	6.1	1.7	0.96	2.56	6.92	4.87	7.53	0.28	6.69	6.79	6.8	6.81	6.56	6.87	5.5	7.54	8.01	4	15.2	2.52	4.67	9.8	5.15	6.68	6.38	
Eu	0.69	1.17	0.3	0.2	0.4	1.01	0.93	1.48	0.07	1.14	1.13	0.97	0.97	0.92	1.05	1.01	1.55	1.61	0.71	0.57	0.53	0.91	1.97	1.06	1.47	1.53	
Gd	4.28	5.59	1.49	0.85	2.27	5.67	4.58	6.63	0.21	6.23	6.15	5.69	5.66	5.12	5.97	5.26	6.45	6.44	2.92	7.03	2.17	3.78	6.81	4.27	4.36	5.74	
Tb	0.65	0.87	0.23	0.13	0.35	0.84	0.71	1.02	0.05	0.99	0.92	0.87	0.9	0.84	0.92	0.82	1	0.97	0.46	0.89	0.35	0.57	0.95	0.66	0.59	0.88	
Dy	3.69	4.69	1.45	0.78	1.88	4.81	4.17	5.94	0.22	5.52	5.49	5.17	5	4.61	5.37	5.09	5.53	5.44	2.73	3.75	1.88	3.37	4.93	3.94	2.99	5.12	
Ho	0.77	0.99	0.3	0.16	0.4	0.98	0.85	1.19	0.05	1.17	1.11	1.1	1.03	0.9	1.13	1.05	1.11	1.06	0.57	0.53	0.41	0.69	0.93	0.83	0.56	1	
Er	2.24	2.88	0.82	0.37	1.15	3.13	2.62	3.53	0.15	3.59	3.33	3.27	3.01	2.8	3.26	2.98	3.3	3.09	1.66	1.5	1.24	1.9	2.44	2.33	1.6	2.77	
Tm	0.37	0.4	0.11	0.06	0.16	0.46	0.38	0.49	0.02	0.5	0.47	0.44	0.43	0.41	0.5	0.42	0.47	0.44	0.24	0.23	0.16	0.28	0.37	0.35	0.23	0.39	
Yb	2.54	2.74	0.78	0.39	1.08	3.41	2.47	3.3	0.11	3.41	3.21	3.01	3.16	2.72	3.23	2.96	3.07	2.85	1.85	1.52	1.1	1.83	2.54	2.25	1.53	2.52	
Lu	0.37	0.43	0.12	0.06	0.16	0.5	0.35	0.5	0.02	0.51	0.49	0.44	0.4	0.49	0.43	0.47	0.42	0.28	0.21	0.16	0.3	0.37	0.33	0.22	0.39		
NASC'a göre																											
Eu/Eu*	0.62	0.92	0.86	1.02	0.76	0.74	0.90	0.96	1.32	0.81	0.80	0.72	0.72	0.73	0.75	0.86	1.02	1.03	0.95	0.25	1.04	0.99	1.11	1.04	1.25	1.16	
Ce/Ce*	1.06	1.03	1.00	0.99	1.03	1.07	1.01	0.96	0.96	1.04	1.04	1.05	1.01	1.04	1.05	1.03	1.03	0.98	1.03	0.67	0.99	0.99	1.08	1.03	1.03	0.96	
Kondrit'e göre																											
Eu/Eu*	0.41	0.61	0.58	0.68	0.51	0.49	0.60	0.64	0.88	0.54	0.53	0.48	0.48	0.49	0.50	0.57	0.68	0.69	0.64	0.17	0.69	0.66	0.74	0.69	0.83	0.77	
Ce/Ce*	1.03	0.99	0.97	0.96	1.00	1.04	0.98	0.93	0.93	1.01	1.01	1.02	0.98	1.01	1.01	1.00	1.00	0.95	1.00	0.65	0.96	0.96	1.05	1.00	1.00	0.93	
HNTE/ONTE	18.50	8.74	8.67	8.02	8.60	12.84	7.60	7.97	9.02	8.49	9.23	9.72	10.02	10.88	9.62	7.83	10.45	11.14	11.02	18.43	8.48	9.29	15.63	9.91	26.23	8.58	
HNTE/ANTE	54.35	26.29	25.92	28.08	26.52	34.64	21.04	24.25	26.47	23.04	26.56	27.96	29.00	32.58	27.41	21.61	33.15	38.54	31.16	149.0	25.06	30.17	69.36	29.96	122.0	29.18	
NTE	321.7	195.4	54.74	28.67	78.03	287.6	144.3	221.2	9.12	214.3	228.3	227.9	231.6	231.5	233.8	172.2	272.8	292.4	140.9	546.9	77.2	148.3	427.9	178.8	456.9	203.9	

Not: Eu/Eu* = $Eu_N / [Sm_N Gd_N]^{1/2}$, Ce/Ce* = $Ce_N / [La_N Pr_N]^{1/2}$, NTE (Nadir Toprak Element) = La-Lu, HNTE (Hafif Nadir Toprak Element) = La-Nd, ONTE (Ortalama Nadir Toprak Element) = Sm-Ho, ANTE (Ağır Nadir Toprak Element) = Er-Lu

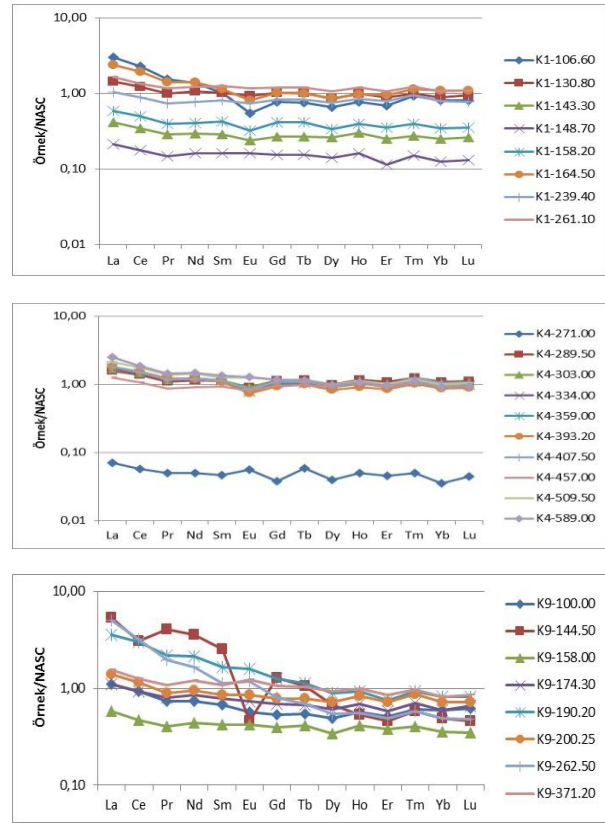
Havzadaki sedimanter birimlerin kökenlerini belirlemek amacı ile örneklerin NTE içerikleri Kondrit'e göre (Boynton 1984, Sun and McDonough 1989) ve NASC (Kuzey Amerikan Şeylleri)'a göre (Gromet et al. 1984, Taylor and McLennan 1985, Condie 1993) normalize edilmiştir. NT elementlerinin Kondrit'e göre normalleştirilmiş değerlerine bakıldığında hafif nadir toprak elementlerinin ağır nadir toprak elementlerine oranla zenginleşme gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 7). NT elementlerinin NASC'a göre normalize edilmiş değerlerine bakıldığında NTE eğilimlerinin yataya yakın ve dolayısıyla NASC değerlerine paralel olduğu görülmektedir (Şekil 8).



Şekil 7. Sondaj örneklerinin NT elementlerinin Kondrit'e göre değişim diyagramları.

NT elementlerinde NASC'a göre Eu* anomalisi 0.25 ile 1.32 arasında değişmektedir. Ce* anomalisi ise 0.67 ile 1.08 arasında değişmektedir (Çizelge 3). Kondrit'e göre ise Eu* anomalisi 0.17-0.88 arasında değişmekte olup, negatif anomalisi gözlenmiştir. Ce* anomalisi ise NASC'a benzer olup 0.65-1.05 arasında değişmektedir (Çizelge 3).

Sondaj örneklerinin HNTE/ONTE (hafif NTE /ortalama NTE) oranları 7.6 ve 26.23 arasında değişmektedir. Sondaj örneklerinin HNTE/ANTE (Hafif NTE/ağır NTE) oranları ise 21.04 ve 149.01 arasında değişmektedir. HNT elementlerin ONT ve özellikle ANT elementlere göre belirgin olarak zenginleşme gösterdiği tespit edilmiştir (Çizelge 3).



Şekil 8. Sondaj örneklerinin NT elementlerinin NASC'a göre değişim diyagramları.

5. Tartışma ve Sonuç

İnceleme alanı Uşak Neojen havzasının doğu bölümünde Çivril-Baklan grabeninin kuzeybatı kesiminde bulunur. Uşak havzası çoğunlukla K-G ve KD-GB uzanan faylarla kontrol edilir. Metamorfiklerden oluşan temel kayalar, havzanın güneyinde, doğusunda ve batısında bulunur. Temel kaya birimlerinin üzerine fluvial ortamda oluşan karasal kıvrıntılar (çakıltaşı, yer yer çapraz tabakalı kumtaşı, çamurtaşı, silttaşı) gelmektedir. Yüzlerce metre kalınlık sunan bu istif, yanal ve düşey yönde geçişli, karbonatça zengin kalın gösel tortullar (kalkerli, fosilli, organik malzeme içeren çamurtaşı, kömür, kıltaşı, killi kireçtaşı, kireçtaşı, marn ve traverten) ile yer yer ardalanmalı olarak bulunmaktadır. Sondaj logları korele edilip birimlerin yanal ve düşey devamlılıkları ile havzanın tektono-sedimanter gelişimi değerlendirildiğinde; tektonik olarak oldukça aktif bir konuma sahip, Batı Anadolu'nun genişlemeli tektonik rejimi içerisinde gelişen Karahallı havzasının akarsular tarafından sürekli olarak beslendiği ve batıya ve kuzeydoğuya doğru giderek derinleşen bir göl havzası olduğu belirlenmiştir.

Havzada temele kadar ilerleyen sondaj faaliyetleri sonucunda havzanın temel topoğrafyası hakkında çok önemli sayılabilecek veriler elde edilmiştir. Buna göre, K-4, K-6, K-7 ve K-10 sondajları havzanın orta kesiminde bulunmakta olup, bu bölgede temel kayaların bulunduğu

derinliğin yanı sıra, Neojen istifin kalınlığı da artmıştır. Karahallı havzasında temel kayaları etkileyen gömülü faylar, aynı zamanda sedimanter birimlerin kalınlığını ve havza içindeki fasiyeslerin dağılımını kontrol eden yapısal unsurlardır. Sondaj logları korele edildiğinde K-4 ve K-10 ile K-3 sondajları arasında olduğu düşünülen gömülü fay, havzanın orta kesiminde yaygın olan göl ve fluviyal-göl ortamında oluşan sedimanter birimler ile havzanın doğu kesimlerinde yaygın olan fluviyal birimler arasındaki yapısal sınırı oluşturur. Bu gömülü fayın doğusunda kalan bölgelerde, ani gelişen subsidansa bağlı kırıntılı tortul çökelişi gelişmiş olmalıdır.

Havzada fluviyal ve fluviyal-göl ortamında çökelmiş birimlerin dikey ve yanal yönde geçiş oluşturduğu fasiyes gelişimleri, daimi karakterli düşük-orta enerjili bir göl ortamını vurgulamaktadır. Fluviyal birimler su seviyesinin arttığı yüksek enerjili evrelerde çökelmiş olup, göl ortamında kurak iklim periyotlarını yansıtan karbonat ve evaporit (jips, anhidrit) oluşumları ile yakın ilişkilidirler. Havzadaki göl ortamında zaman zaman suların çekilmesiyle bataklık ortamı egemen olmuştur. Tagliasacchi et al. (2024), ortamdaki palinomorf birlikteliği, çökeltme alanının çevresindeki bataklık ortamını ve alçak-orta rakımlı alanı gösterdiğini belirtmiştir. Karasal organik malzemenin bataklık ortamında birikimi ile sondajlar içerisinde birkaç seviyede tespit edilen ince kömür damarları oluşmuştur. Kömürleşme sonucu ortaya çıkan organik asitler de paleogölün nötr-asidik bir ortama dönüşmesine olanak sağlamıştır. Dinar-Baklan havzasında MTA tarafından önemli ekonomik kömür rezervi (950 milyon ton) tespit edilmiştir. Ancak Karahallı havzasında derinleşme ve çok fazla kırıntı girdisi kömür oluşumunu olumsuz yönde etkilemiş, ekonomik olarak işletilebilecek bir kömür varlığı bulunamamıştır.

Kalsit ve dolomit havzada yaygın olarak bulunan karbonat mineralleridir. İncelenen numunelerde kalsitin egemen olduğu evreler, kalsitin çökelişi sırasında göl ortamında tuzluluğun düşük olduğunu gösterir. Ortam tuzluluğunun ve alkalinitesinin kısmen artması ile Mg' ca zenginleşmesi dolomitin çökelişini sağlamıştır. Havzadaki karbonatın kaynağı havzayı çevreleyen, yaygın olarak kireçtaşı ve mermerlerden oluşan Neojen öncesi temel birimlerdir. XRD çalışmaları ile dolomit mineralinde Ca/Mg oranı belirlenebilmektedir (Goldsmith and Graf 1958). Havza da bulunan dolomitlerin çoğunluğunun Ca-dolomit (2.89-2.90 Å) olduğu tespit edilmiştir. İlk kez Graf ve Goldsmith (1956) tarafından tanımlanmış olan Ca' ca zengin proto-dolomitler göl basenlerinde oluşabilmektedir. SEM çalışmalarında dolomitlerin aşamalı büyüdüğü gözlenmiş

ve dolomitler üzerinde büyüme izleri tespit edilmiştir. Bu durum dolomitlerin otijenik oluştuğunu göstermektedir.

Havzada karbonat minerallerinin çökmesinden sonra, tuzlu suyun doygunluğa ulaşması ile Sivaslı fayına doğru jips kristallenmesinin başladığı görülmektedir. Jips kristallenmesinin başlayabilmesi için yüksek pH ve sıcaklık gerekmektedir (Eardley and Stringham 1952). Jips derinlere gömüldüğünde anhidrite dönüşür. Jips ve anhidritin çözünürlük eğrileri 42°C de kesişmekte ve bu sıcaklık üzerinde anhidrit duraylı olmaktadır (Hardie 1967). Yüksek sıcaklık, düşük H₂O aktivitesi (yüksek tuzluluk) jips yerine anhidritin çökelişini destekler (Braitsch 1971). Havzada sülfat mineralleri ile birlikte dolomit minerallerinin bulunması Pliyo-Pleistosen yaşlı birimlerin çökeldiği ortamın alkalın göl koşullarını yansıttığını gösterir.

Ayrıca karbonat ve sülfat mineralleri ile birlikte kaolin, illit ve simektit grubu kil minerallerinin gözlenmesi asidik çözeltilerin kısmen minerallerin çökeliş sonrasında ortaç-alkalin özellik kazandığını gösterir. SEM de gözlenen tespih tanesi şeklinde muhtemelen mikro fosillerin (diatom?) varlığı simektit oluşumunda gözenek sularında bulunan biyolojik aktivite ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 5c). Bu mineralleşmelerle birlikte feldispat kristalleri de gözlenmiştir. Bu durum, ortamda silis aktivitesi ve Mg artışı ile simektitin alkalın ortamda feldispat minerallerinden oluştuğu şeklinde yorumlanmıştır.

SEM çalışmalarında kaolinit levhaların kenarlarının düzgün olmaması, levhaların sıkı paketli olmaması ve kaolinit kristallerinin ince taneli olması yaygın olarak degradasyonu gösterir (Keller 1976, 1977). Örneklerde ayrıca kaolinitle beraber kuvars ve feldispat minerallerinin gözlenmesi de kaolinitin oluşumunda kırıntılı malzemedeki ikincil dönüşümün rol oynadığını göstermektedir. HNTE'nin, ONTE ve ANTE'ne göre zenginleşmesi ve Eu* anomalilerinin varlığı sondajlardaki kil minerallerinin feldispatın bozuluşu ile oluştuğunu göstermektedir (Toulkeridis et al. 1998).

Düşük tuzluluk koşullarında çözünmüş HNTE çözeltilerinden uzaklaşırken, yüksek tuzluluk koşulları altında ANTE çözeltilerinden uzaklaşmaktadır (Sholkovitz and Szymezak 2000). Tuzlu sudan itibaren oluşan kalsitin dolomitleşmesi ile NTE çözeltilere geçer. Kalsitçe zengin örnekler dolomitçe zengin örneklerden daha çok NTE içerirler. Dolomitçe zengin K4-271 nolu örnek de NTE: 9.12 ppm, kalsit içeriği yüksek örneklerde ise 77.18-78.03 ppm arasında değişmektedir. NTE elementler hareketsiz elementlerdir ve jeolojik süreçlerde korunduklarından köken belirlemede kullanılmaktadır. HNTE uyumlu iken, ANTE

uyumsuz elementlerdir. Bu elementlerin birbirlerine oranları ve dağılımları köken kayaç ayırımında kullanılır (Taylor and McLennan 1985, Wronkiewicz and Condie 1987, 1989). Örneklerin NTE diyagramları incelendiğinde benzer bir dağılım göstermesi havzada çökelen sedimanter kayaçların aynı köken kayaçtan kaynaklandığına işaret eder.

NT elementlerinin NASC'a göre yapılan değişim diyagramları incelendiğinde Eu* anomalisinin değişken, Ce* da hafif negatif veya Ce* anomalisi gözlenmediği tespit edilmiştir. Kondirit'e göre yapılan değişim diyagramları incelendiğinde ise Eu* da negatif anomali ve Ce anomalilerinin NASC'a benzer bulunması feldispat minerallerinin kalsiyum içeriğinin düşük oranda olduğunu ve kalsiyumun feldispat yapısından ayrıldığını göstermektedir. Örneklerin NT elementlerinin Kondrit ve NASC'a göre olan değişimleri havzanın kıtasal kabuk kökenli olduğu ve asidik kaynaktan beslendiğini gösterir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışma Dr. Öğr. Üyesi Tülay Altay danışmanlığında Ali Korkmaz tarafından 2018 tarihinde tamamlanan "Çivril, Karahallı (Denizli) arasında bulunan Neojen yaşlı sedimanter birimlerin mineralojik ve jeokimyasal özelliklerinin incelenmesi" başlıklı Yüksek Lisans Tezi (Tez No: 506931) ve AKU BAP Koordinatörlüğü tarafından desteklenen 18.KARİYER.117 nolu projeden türetilmiştir. Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Proje yönetimi, Arazi ve laboratuvar çalışmalarının yapılması ve takibi, sonuçların değerlendirilmesi ve yorumlanması, Makale yazımı, İnceleme ve düzenleme, Danışmanlık
Yazar 2: Arazi çalışmalarının yürütülmesi, Analizlerin yapılması ve sonuçların yorumlanması, Araştırma, Makale yazımı

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

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

Teşekkür

Bu araştırma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje no: 16.FEN.BİL.45 ve 18.KARİYER.117). Maddi destek veren Afyon Kocatepe Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne, arazi ve sondaj çalışmalarındaki desteklerinden dolayı TKİ Genel Müdürlüğü'nün kömür aramaları proje ekibine teşekkür ederiz. Ayrıca makaleyi inceleyen, makalenin yayınlanmasında değerli görüş ve önerileriyle katkı sağlayan hakemlere ve dergi editörüne teşekkür ederiz.

6. Kaynaklar

- Akgün, F., Kayseri, M.S. and Akkiraz, M.S., 2007. Palaeoclimatic evolution and vegetational changes during the Late Oligocene–Miocene period in the Western and Central Anatolia (Turkey). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **253**, 56–106.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.03.034>
- Alçıçek, H., Wesselingh, F.P. and Alçıçek, M.C., 2015. Paleoenvironmental evolution of the late Pliocene–early Pleistocene fluvio-deltaic sequence of the Denizli Basin (SW Turkey). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **437**, 98–116.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.06.019>
- Alçıçek, H., Gross, M., Bouchal, J.M., Wesselingh, F.P., Neubauer, T.A., Meijer, T., van den Hoek Ostende, L.W., Tesakov, A., Murray, A.M., Mayda, S. and Alçıçek, M.C., 2023. Paleobiodiversity and Paleoenvironments of the eastern Paratethys Pleistocene lacustrine-palustrine sequence in the Baklan Basin (SW Anatolia, Turkey). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **626**, 111649.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2023.111649>
- Altay, T. ve Dumlupınar, İ., 2013. Dinar (Afyon)-Baklan (Denizli) Kömür Havzalarında Bulunan Killerin Jeolojik ve Mineralojik İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **13/2**, 1–10.
<https://doi.org/10.5578/fmbd.6425>
- Altay, T., Korkmaz, A., Yağmurlu, F., Şentürk M. ve Murat, A., 2018. Geological and Mineralogical Properties of Coal-bearing Neogene sedimentary units between Karahallı (Uşak) and Çivril Towns (Denizli), Western Turkey. *Academic Journal of Science*, **08 (02)**, 25–34.
- Bechtel, A., Karayığit, A.İ., Bulut, Y., Mastalerz, M. and Sachsenhofer, R.F., 2016. Coal characteristics and biomarker investigations of Dombayova coals of Late Miocene-Pliocene age (Afyonkarahisar-Turkey). *Organic Geochemistry*, **94**, 52–67.
<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2015.12.008>
- Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of rare earth elements: meteorite studies. Pp. 63–114 in: Rare Earth Element Geochemistry (P. Henderson, ed.). Elsevier, Amsterdam.
- Boyraz, S., 2011. Denizli yöresi (Çal, Çivril, Baklan) Neojen yaşlı eski toprakların (Paleosol) sedimentolojisi, Güneybatı Anadolu, Türkiye. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 295.
- Braitsch, O., 1971. Salt deposits their origin and composition (translated by P.J. Burek and A.E.M. Nairn), Springer-Verlag, 297.

- Condie, K.C., 1993. Chemical Composition and Evolution of the Upper Continental Crust; Contrasting Results from Surface Samples and Shales. *Chemical Geology*, **104**, 1-37.
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90140-E](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90140-E)
- Çakır, Z., 1999. Along-strike discontinuity of active normal faults and its influence on Quaternary travertine deposition: Examples from western Turkey. *Turkish Journal of Earth Science*, **8**, 67-80.
- Çakmaköğlü, A., 1986. "Çivril-Banaz-Sandıklı-Dinar arasındaki bölgenin jeolojisi". Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor no: 8062, Ankara (yayımlanmamış).
- Eardley, A.J. and Stringham, B., 1952. Selenite crystal in the clays of Great Salt Lake, *Journal of Sedimentary Petrology*, **22**, 234-238.
- Emre, Ö., Doğan, A., Özalp, S., and Yıldırım, C., 2011. 1:250 000 Scale Active Fault Map Series of Turkey, Denizli (NJ 35-12) Quadrangle. MTA report no: 12, Ankara.
- Erinç, S. 1957, Orta Ege Bölgesinin Jeomorfolojisi, *MTA Rapor no: 2217*, Ankara.
- Goldsmith, J. R., and Graf, D.L., 1958. Relations between lattice constants and compositions of the Ca-Mg carbonates, *American Mineralogist*, **43**, 84-101.
- Göktaş, F., Çakmaköğlü, A., Tari, E., Sütçü, Y.F. ve Sarıkaya, H., 1988. Çivril-Çardak arasındaki jeolojisi, *MTA Rapor No: 8701*, Ankara.
- Graf, D.L. and Goldsmith, J.R., 1956. Some hydrothermal synthesis of dolomite and protodolomite. *Journal of Geology*, **64**, 173-186.
- Gromet, L. P., Haksin, L. A., Korotev, R. L. and Dymek, R. F., 1984. The North American Shale Composite: its compilation, major and trace element characteristics, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48**, 2469-2482.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90298-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90298-9)
- Gündoğdu, N.M., 1982. Neojen yaşlı Bigadiç sedimanter baseninin jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 386.
- Gürbüz, A., Boyraz, S., and Ismael, M.T., 2012. Plio-Quaternary development of the Baklan-Dinar graben: implications for cross-graben formation in SW Turkey. *International Geology Review*, **54**, 33-50.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2010.496543>
- Hardie, L.A. 1967. The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure. *American Mineralogist*, **52**, 121-200.
- JCPDS, 1993. Mineral Powder Diffraction File Databook, Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Swarthmore, Pennsylvania, 781.
- Karayiğit, A.İ., Oskay, R.G., Christanis, K., Tunoğlu, C. and Bulut, Y., 2015. Paleoenvironmental reconstruction of the Çardak coal seam, SW Turkey. *International Journal of Coal Geology*, **139**, 3-16.
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.04.009>
- Kayseri-Özer, M. and Emre, T., 2022. Palaeovegetation and paleoclimate in the SW Turkey - a study based on the early-middle Miocene coal-bearing sediments from the Büyük Menderes Graben. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **297**, 104560.
<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2021.104560>
- Keller, W. D., 1976. Scan electron micrographs of kaolins collected from diverse environments of origin. *Clays and Clay Minerals*, **24**, 107-113.
<https://doi.org/10.1346/CCMN.1976.0240301>
- Keller, W. D., 1977. Scan electron micrographs of kaolins collected from diverse environments of origin. IV. Georgia kaolin and kaolinizing source rocks. *Clays and Clay Minerals*, **25**, 311-345.
<https://doi.org/10.1346/CCMN.1977.0250501>
- Koçyiğit, A., 1984. Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında Levha içi yeni tektonik gelişim. *TJK Bülteni*, **27(1)**, 1-12.
- Konak, N., Akdeniz, N. ve Çakır, H., 1986, Çal-Çivril Karahallı Dolayının Jeolojisi. MTA Rapor No: 894, Ankara.
- Koralay, D.B., 2020. Deposition characteristics of Pliocene coals in the Denizli region (SW Turkey) via organic petrography, geochemistry, and stable isotope composition. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **84**, 103619.
<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103619>
- Korkmaz, A., 2018. Çivril, Karahallı (Denizli) arasında Bulunan Neojen Yaşlı Sedimanter Birimlerin Mineralojik ve Jeokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 84.
- Özalp, S., Emre, Ö., Şaroğlu, F., Özaksoy, V., Elmacı, H. and Duman T.Y., 2018. Active fault segmentation of the Çivril Graben System and surface rupture of the 1 October 1995 Dinar Earthquake (Mw 6.2), Southwestern Anatolia, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, **166**, 136-151.
<https://doi.org/10.1016/j.jseae.2018.07.037>
- Özkul, M. Varol, B. and Alçiçek, M.C., 2002. Depositional environments and Petrography of Denizli Travertines. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, **125**, 13-29.
- Özkul, M., Kele, S., Gökgöz, A., Shen, C.C., Jones, B., Baykara, M.O., Fórizs, I., Németh, T., Chang, Y.W. and Alçiçek, M.C., 2013. Comparison of the Quaternary travertine sites in the Denizli extensional basin based

- on their depositional and geochemical data. *Sedimentary Geology*, **294**, 179-204.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.05.018>
- Özsayın, E., Tekin, U.K., Üner, S. ve Bayram. L., 2020. Dinar Fayının Kinematik Özellikleri ve Bölge Depremselliğindeki Önemi (pp, 1-43). Scientific Projects Coordination Unit project, No: FHD-2018-17203. Hacettepe University, Ankara.
- Öztürk, E. ve Öztürk Z., 1989. Balçıkhisar, Karadilli Afyon Dereköy Isparta Dolayının Jeolojisi. MTA Rapor No: 8946, Ankara.
- Savaşçın, M.Y. and Güleç, N., 1990, Neogene volcanism of Western Anatolia, Field Excursion B3, Intern. Earth Sci. Con. On Aegean Region, *IESCA Publ. No. 3*, 78.
- Savaşçın, M.Y., Güleç, N. and Tankut, A., 1990. Geochemical character and tectonic significance of Neogene volcanism extending from Aegean to Central Anatolia, IAVGE. Mainz 1990, *Inter. Vol. Cong. Abstracts*.
- Sholkovitz, E. and Szymezak, R., 2000. The estuarine chemistry of rare earth elements: comparison of the Amazon, Fly, Sepik and Gulf of Papua systems. *Earth and Planetary Science Letters*, **179(2)**, 299–309.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00112-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00112-6)
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition processes. Pp. 313–345 in: Magmatism in the Ocean Basins (A.D. Saunders and M.J. Norry, editors). *Special Publication 42, Geological Society*, London.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. The continental Crust: Its Composition and Evolution, Blackwell, London, 312.
- Tagliasacchi, E., Kayseri-Özer M.S, and Altay, T., 2024, Environmental, vegetational and climatic investigations during the Plio-Pleistocene in SW-Anatolia: A case study from the fluvio-lacustrine deposits in Uşak-Karahallı area, *Palaeobiodiversity nd Palaeoenvironments*, **104**, 29-51.
<https://doi.org/10.1007/s12549-023-00590-2>
- Toker, E., 2009, Acıgol-Cardak (Denizli) Grabenin kuzeyindeki Tersiyer Çökellerinin Tektono-Sedimanter Gelişiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, Suleyman Demirel Üniveristesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 242.
- Toker, E., 2017. Quaternary fluvials tufas of Sarıkavak area, southwestern Turkey: Facies and depositional systems. *Quaternary International*, **437**, 37-50.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.06.034>
- Toulkeridis, T., Podwojewski, P. and Clauer, N., 1998. Tracing the source of gypsum in New Caledonian soils by REE contents and S–Sr isotopic compositions. *Chemical Geology*, **145**, 61–71.
[https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00160-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00160-5)
- Ünal, D., 1981. Denizli-Çivril-Tokça kömürlü Neojen havzası jeoloji raporu, *MTA Rapor No: 7016*, Ankara.
- Wronkiewichz, D. J. and Condie, K. C., 1987. Geochemistry of Archean shales from the Witwaterstrand Supergroup, South Africa; source-area weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **51**, 2401-2416.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90293-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90293-6)
- Wronkiewichz, D. J. and Condie, K. C., 1989. Geochemistry and provenance of sediments from the Pangola Supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0 Ga-old continental craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **53**, 1537-1549.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90236-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90236-6)
- Yağmurlu, F., Şentürk, M. ve Altay, T., 2017, Türkiye Kömür İşletmeleri Batı ve Orta Anadolu Kömür Araştırma Projesi Raporu: Denizli Çevresi Sahaları, *TKİ Raporu*, 94, Ankara.

Fourier Kanunuyla Çalışan Isı İletim Katsayısı Ölçüm Cihazı Tasarımı ve Üretimi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 12.10.2023

Kabul/Accepted: 06.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Design and Fabrication of Thermal Conductivity Coefficient Measurement Device Working with Fourier's Law

Umut MELİKOĞLU , Bahri DAMAR , Mustafa MUTLUBAŞ , Osman YELER* 

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Geçmişten günümüze insanlar, gıdalarını dondurmaktan kışın ısınmaya kadar her türlü günlük ihtiyaçlarında iletimle olan ısı transferi yöntemini kullanmışlardır. İletimle olan ısı transferinin en önemli parametresi, malzemelerin ısı iletim katsayısının belirlenmesidir. Bu çalışmada, yağın malzemelerin ısı iletim katsayısını kararlı rejim koşulları altında Fourier yasası yardımıyla laboratuvar ortamında mutlak teknik yöntemiyle ölçülebilen düşük bütçeli bir ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı geliştirilmiştir ve üretilmiştir. Bu kapsamda, geliştirilen tek boyutlu bir ısı akışı düzeneği ile; bakır, pirinç ve alüminyum malzemelerinin ısı iletim katsayısı değerleri deneysel olarak belirlenmiştir ve hesaplanan değerler, literatürdeki mevcut değerlerle karşılaştırılmıştır. Üretilen cihazın ölçüm değerlerindeki belirsizlik analizi %2,87 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, üretilen cihazdan hesaplanan değerler ile literatür değerler arasında genel olarak uyum içinde olduğu (bakır ve pirinç numune de tam olarak uyum sağlanmış olup, alüminyum numunede %12'lik bir fark söz konusudur) tespit edilmiştir. Bununla birlikte laboratuvarlarda kullanılan profesyonel ısı iletim katsayısı ölçüm cihazlarının doğruluğu genellikle %5 civarında iken, geliştirilen düşük bütçeli cihazın doğruluğu %0,1-12 arasında olduğu belirlenmiştir. Buradan geliştirilen cihazın performansı, yüksek bütçeye sahip profesyonel cihazlara göre kabul edilebilir seviyede olduğu ifade edilebilmektedir. Ayrıca bu çalışmada, geliştirilmek istenen düşük bütçeli cihazın ön araştırma sonuçları paylaşılmış olup, tasarlanan cihazın performansının artırılması ve eksik yönlerinin geliştirilmesi için tasarlanan cihazda yapılması gereken ilave iyileştirmeler maddeler halinde de sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Isı transferi; Isı iletim katsayısı ölçüm cihazı; Fourier kanunu; Mutlak teknik.

Abstract

From past to present, humanity has used thermal conductive heat transfer method in all their daily needs, ranging from freezing food to heating during winter. The most important parameter of the heat transfer by conduction is determination of the thermal conductivity coefficient of materials. In this study, a low-budget thermal conductivity coefficient measurement device that can measure the thermal conductivity coefficient of bulk materials by means of Fourier's Law under steady-state conditions using absolute technical method in laboratory environment has been improved and fabricated. With a one-dimensional heat flow mechanism, heat conduction coefficient values of copper, brass and aluminum materials were determined experimentally, and calculated values were compared with existing values in the literature. The uncertainty analysis in measurement values of the fabricated device was calculated as 2.87%. According to the experimental results, it was determined that values calculated from fabricated device are in good agreement with literature values (copper and brass samples are in full compliance, but there is a 12% difference in aluminum sample). On the other hand, while accuracy professional thermal conductivity coefficient measurement devices used in laboratories is generally around 5%, accuracy of the developed low-budget device has been determined to be between 0.1-12%. It can be stated here that performance of the device developed is acceptable level compared to professional devices with high budgets. Also, in this study, preliminary research results of the low-budget device are shared, and additional improvements that need to be made in the fabricated device to increase the performance and to improve its shortcomings are also presented.

Keywords: Heat transfer; Thermal conductivity coefficient measuring device; Fourier's law; Absolute technique.

1. Giriş

Isı, sıcaklıkları farklı iki madde arasında transfer edilen enerjidir. Normal koşullarda yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru transfer edilir. Aksi isteniyorsa belirli bir enerji harcamak gerekir. Isı transferi; iletim, taşınım ve ışınım olmak üzere 3 yol ile gerçekleşir. Bu ısı transferlerinden iletim, malzemenin bir tarafından diğer tarafına atomların etkileşimleri ve titreşimleri aracılığıyla

olan ısı transferidir. Her malzemenin ısıyı iletme hızı birbirinden farklıdır (Çengel 2012). Örneğin; altın, alüminyum, bakır, gümüş, demir ve çelik gibi malzemeler ısıyı hızlı iletirken; plastik, tahta, pamuk, poliüretan köpük gibi malzemeler ısıyı yavaş iletirler. Bu hız durumu iletimle ısı transferinde, ısı iletim katsayısı (k) olarak ifade edilmektedir ve maddeleri birbirinden ayıran karakteristik bir özelliktir. Aynı zamanda ısı iletim katsayısı,

malzemelerin iç yapısal özelliklerine ve sıcaklıklarına bağlı olarak da değişmektedir.

Mühendislik hesaplamalarında, kullanılan malzemelerin ısı özelliklerini belirlemek çok önemlidir. Çünkü birçok mühendislik uygulamasında çeşitli faktörlerden dolayı ısı enerjisi ile bir şekilde karşı karşıya kalınmaktadır. Bununla birlikte her geçen gün farklı özelliklere sahip yeni birçok farklı malzemeler geliştirilmektedir ve bu malzemelerin, mühendislik hesaplarında en çok kullanıldığı değerlerden biri olan ısı iletim katsayısı değerlerinin bir şekilde ölçülmesi ve belirlenmesi gerekmektedir. Işiker ve Yeşilata (2017) çalışmasında, yapı malzemelerinin ısı iletim katsayısının ölçülmesinde sıcaklığın homojen olarak dağılması ve yayılması için yeni bir metot araştırmışlardır. Isıl performansları belirlenecek parçayı, çalışma kapsamında geliştirilen adyabatik bir kutuya yerleştirmişler ve sıcaklığın homojen yayılımını gözlemek için termal kamera kullanmışlardır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, en yüksek ısı iletim katsayısının katkısız betonda ve en düşüğünün ise %2 palmiye lifi katkılı betonda olduğunu tespit etmişlerdir. Bir başka çalışmada Yüksel (2010), gözenekli yapıların ısı iletim katsayısına olan etkisini incelemiştir. Çalışmasında, koruyucu ısıtıcı özelliğine sahip sıcak levha cihazını kullanmıştır. Isı iletim katsayısı belirlenecek malzemeler sıcak ve soğuk plakalar arasına konulmuştur. Güç kaynağından belirli bir güç verilerek yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Bu değerler excel dosyasına aktararak Fourier kanunu ile malzemelerin ısı iletim katsayıları belirlenmiştir. Kayfeci ve Kurt (2007) silindirik metot yöntemiyle çalışan, sıvıların ısı iletim katsayısını ölçen bir düzenek hazırlamışlardır. Bu düzende sıcaklık ölçümü, kalibrasyonu buz banyosunda kontrol edilen demir-konstantan termokupllar ile hassasiyeti 0,1 °C olan on iki kanallı dijital okuma özelliğine sahip cihazla yapılmıştır. Soğutma sıvısı ve ısıtıcı çalıştırdıktan sonra sistem sürekli rejime geldikten sonra ölçümleri yapmışlardır. Bir başka çalışmada Atmaca (1992) elektriği iletmeyen yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayısını belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Deneyde, ısı iletim katsayısı ölçülecek olan parçaların 0,25 m² yüzey alanı, 10-125 mm arasında kalınlığı vardır. Parçaların üzerine açılmış olan 3 mm uzunluğundaki kanallara 8 tane sıcaklık algılayıcı sensör konulmuştur. Isıtıcı, boşluk kalmayacak şekilde parçalara sıkıştırılmış ve sistem, poliüretan ve cam yünü ile yalıtılmıştır. Isıtıcıya verilecek olan güç ayarlandıktan sonra, soğutucu ve sirkülasyon pompası çalıştırılıp deneyler yapılmıştır. Turgut vd. (2009) çalışmalarında ayçiçek yağı, mısır yağı ve zeytinyağının ısı iletim katsayılarını deneysel olarak bulmuşlardır. Deneylerinde sıcak tel metodunu kullanmışlardır. Isı kaynağı için kullanılan prob, paslanmaz çelikten imal

edilmiş, 0,7 mm çapa sahip ve uzunluğu 36-51 mm arasında değişmektedir. Termokupllar, 0,05 mm çaplı krom-konstantan yapılmıştır. Sıcaklık ölçümü, 30 saniye boyunca her 0,5 saniyede bir okuyarak yapmışlardır. Güç kaynağına bağlı prob, uniform ve sürekli rejimde numunelerin içine atılmış ve numunelerin sıcaklıkları kaydedilerek bir bilgisayara aktarılmıştır. Deneysel sonuçlar, ısı iletim katsayısındaki düşüşün diğer yağlardan ziyade mısır yağını daha fazla etkilediğini göstermiştir. Franco (2007) çalışmasında, metal olmayan ısı iletim katsayısı düşük malzemelerin (0,2-4 W/m.K) ısı iletim katsayılarının belirlenmesinde sıcak tel metodunu kullanmıştır. Düzenek; termal prob nikel alaşımli ısıtıcı kablo (Stablohm 800B®) içermekte olup, 150 mm uzunluğundadır ve dış çapı 0,508 mm'dir. Deneylerde kullanılan Stablohm 800B probun, 60 °C'den 140 °C'ye kadar geniş bir aralıkta ölçüm yapabildiği belirtilmiştir. Sıcaklık, iki termokupl yardımıyla ölçülmüştür. Güç kaynağı olarak HP E3632A DC kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, 1,5 W/m.K'nin üzerindeki ısı iletim katsayısı değerlerini ölçmenin zor olduğunu göstermiştir. Bunun için verilen ısı gücün daha da artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Çalışmadaki ısı iletim katsayısı çalışma aralığının 0,04-0,2 W/m.K arasında olduğu bildirilmiştir. Ancak teknik düzeltmelerle bu aralığı 1,5-4,0 W/m.K arasına çıkartılabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca ısı iletim katsayısı ölçüm hatasının %5'ten daha düşük bir doğruluk oranını sahip olduğu ve ölçümlerin tekrar edilebilirliğini %2-3 arasında olduğu belirtilmiştir. Cahill (1990) çalışmasında, 3ω metodu ile α-SiO₂ malzemenin ısı iletim katsayısını ölçmüştür. 3ω metodu mikron kalınlığında amorf filmleri ölçebilecek kadar hassas bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Yapılan deneylerde, oda sıcaklığının üzerindeki deney malzemesi bakır blok üzerine konulup, nikel alaşımı olan kromel-alumel ile yapılmış termokupl ile numunenin aynı sıcaklığa sahip olması için bakır bloğun etrafına ışınım kalkanları yerleştirilmiştir. Malzemelerin ısı iletim katsayısını belirlemek için 3ω voltajı frekansın bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Çalışmanın sonucunda; geleneksel yöntemlerin 600 K üzerinde ışınım hatalarından fazlaca etkilendikleri, 3ω yönteminin geleneksel yöntemlerin aksine çok fazla etkilenmediği ortaya konulmuştur.

Yukarıdaki bahsedilen çalışmalarda da görüldüğü gibi mühendislik uygulamalarında kullanılmak için geliştirilen malzemelerin özelliklerine bağlı olarak ısı iletim katsayısı ölçüm yöntemi farklılık göstermektedir ve bu konularda birçok bilimsel çalışma yapılmaktadır. Mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan yığın (bulk) malzemeler ve ince film malzemeler için ısı iletim katsayısı ölçüm metodları Çizelge 1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada,

yığın malzemeler için kararlı durum koşullarında mutlak teknik yöntemi kullanılarak Fourier kanunuyla çalışan düşük bütçeli bir ölçüm cihazı, laboratuvar koşullarında malzemelerin ısı iletim katsayısını belirleyebilmek için geliştirilmiş ve üretimi yapılmıştır. Aynı zamanda geliştirilen cihazın olumlu gelişimini sağlayacak deneysel

sonuçların elde edilmesi hedeflenmiştir. Isı iletim katsayısı, malzemelerin önemli bir termofiziksel özelliği olduğu için düşük bütçeli olarak geliştirilen bu cihazdan elde edilecek deneysel sonuçlar, uygulama ve literatüre önemli katkılar sağlayacaktır.

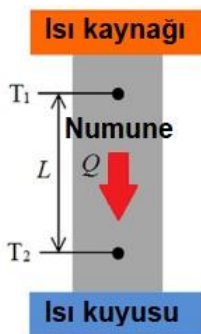
Çizelge 1. Yaygın olarak kullanılan termal karakterizasyon teknikleri (Zhao et al. 2016)

	Yığın Malzeme	İnce Film
Kararlı Durum	<ul style="list-style-type: none"> Mutlak teknik Karşılaştırmalı teknik Radyal ısı akışı metodu Paralel iletkenlik yöntemi 	Kararlı durum elektrik ısıtmalı metotlar
Transit (Frekansa bağlı)	Kesintili (pulsed) güç tekniği	<ul style="list-style-type: none"> 3ω metodu FDTR teknik
Transit (Zamana bağlı)	<ul style="list-style-type: none"> Sıcak tel metodu Lazer flaş yöntemi TPS metodu 	TDTR teknik

2. Materyal ve Metot

Mutlak teknik yöntemi genellikle dikdörtgen veya silindirik şekle sahip yığın numuneler için kullanılır. Bu ölçümü gerçekleştirirken, test bloğu, Şekil 1'de gösterildiği gibi bir ısı kaynağı ile bir ısı kuyusu arasına yerleştirilir. Tek boyutlu kabul edilebilen bir numune için, bilinen sabit durum güç girişi ile ısı kaynağı tarafından ısıtılır ve numunenin belirli bir kesit alanı (A) ve uzunluğu (L) boyunca ortaya çıkan sıcaklık düşüşü (ΔT), kararlı durum sıcaklık dağılımı oluşturulduktan sonra sıcaklık sensörleri tarafından ölçülür. Numunenin ısı iletim katsayısı (k), Fourier ısı iletimi yasası kullanılarak hesaplanır (Denklem 1).

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \frac{dT}{dL} \quad (1)$$



Şekil 1. Tek boyutlu kabul edilebilen bir numunenin mutlak teknik yöntemiyle ısı iletim katsayısı ölçümü

Kullanılan bu yöntemin en önemli ve en zorlayıcı bölümleri ise, verilen ısıyı doğru belirleyebilmek ve sıcaklık farklarını doğru ve hassas olarak ölçebilmektir. Bu doğrultuda ısıyı doğru olarak hesaplayabilmek için numuneye giden ısıda bulunan parazit ısı kayıpları, çıkartılarak gerçek ısı miktarı belirlenmeye çalışılmıştır

(Denklem 2). Bununla birlikte seramik ısıtıcı ile oluşturulan ısının, hem ısıtıcıdan hem de numuneden çevre ortamına ısı transferi yöntemleriyle gitmemesi için etrafları, PLA (polilaktik asit) gövde malzemesi içerisine ısı iletim katsayısı çok düşük olan taş yünü ile kaplanarak yalıtılmıştır. Bu şekilde seramik ısıtıcı ve numunenin etrafı, sızdırmaz bir şekilde PLA ve taş yünü ile kaplandığı için taşınım ve ışınım ile olan ısı transferleri de engellenmiştir.

Taş yününün yalıtım kalınlığı, sistemin maksimum koşullarda çalıştığı ve tek boyutlu bir ısı akışının söz konusu olduğu durum için düzlemsel levha termal direnç yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 3 ve 4). Sıcaklıkları doğru ölçmek için numunelerin belirlenen noktalarına matkap ile küçük delikler açılmış ve termokupllar bu deliklere yerleştirilerek sıcaklık ölçümleri doğru bir şekilde alınmaya çalışılmıştır.

$$\dot{Q}_{gercek} = \dot{Q}_{ısıtıcı} - \dot{Q}_{kayıp} \quad (2)$$

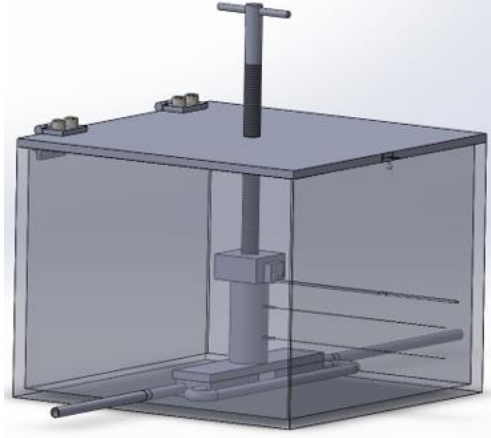
$$R_{taş\ yünü} = \frac{L_{taş\ yünü}}{k_{taş\ yünü} \cdot A} \quad (3)$$

$$R_{PLA} = \frac{L_{PLA}}{k_{PLA} \cdot A} \quad (4)$$

2.1 Tasarlanan deney düzeneği

Tasarlanan deney düzeneği; ısıtıcı (metal seramik ısıtıcı), soğutucu (bakır ısı kuyusu ve su soğutma sistemi), voltaj regülatörü, yalıtım malzemeleri (ısıtıcı ve numune için taş yünü ve PLA), termokupl ünitelerinden oluşmaktadır (Şekil 2). Numunenin boyutları, tek boyutta ısı transferi sağlanabilmesi için 20x20x100 mm boyutlarında tercih edilmiştir. Isıtıcı kaynağı olarak 20x20x1,7 mm olan kare

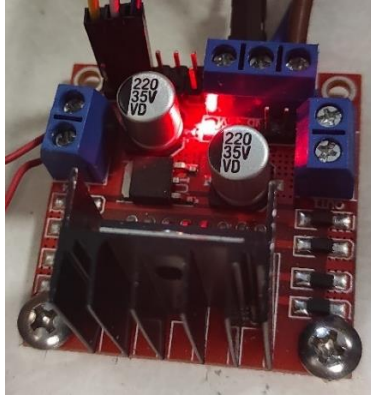
metal ısıtıcı kullanılmıştır. Isı kuyusu 235x55x10 mm boyutlarında bakır levha ve içerisinde 15 L/min. hacimsel debide su sirküle ettirebilen alüminyum sıvı soğutma bloğundan oluşmaktadır. Yalıtım malzemesi olarak ısı iletim katsayısı 0,035 W/m.K olan ve -50 °C/ +1000 °C aralığında çalışabilen taş yünü tercih edilmiştir ve standart K tipi termokupllar ile sıcaklıkların ölçülmesi planlanmıştır.



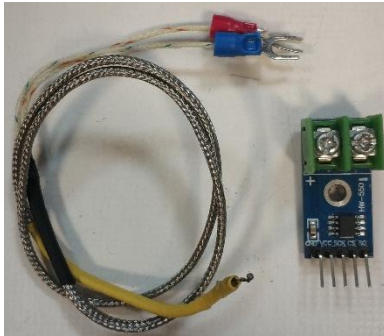
Şekil 2. Tasarlanan düzeneğin SolidWorks çizimi



(a)



(b)



(c)

Şekil 3. (a) Thorlabs-Ht24s seramik ısıtıcı (b) L298n motor sürücü (c) MAX6675 K tipi termokupl&sürücü

2.2 Üretilen deney düzeneği

Tasarlanan deney düzeneğinin dış gövdesi ve gerekli diğer parçaları, Pamukkale Üniversite Makine Mühendisliği bölümünün alt yapısında bulunan Rigid Zero-2 3-D printerlar kullanılarak PLA malzemesinden üretilmiştir. 20x20x2 mm boyutlarındaki seramik ısıtıcı Almanya'da bulunan Thorlabs firmasının 24 W gücünde ve maksimum yüzey sıcaklığı 400 °C'ye çıkabilen HT24S modelidir. Tasarlanan cihazın yazılımı Arduino Uno vasıtasıyla geliştirilmiştir. Ayrıca sıcaklık ölçümleri için 2 adet MAX6675 K tipi termokupl&sürücüsü ve ısıtıcının gücünün kontrol edilmesi için ise L298n motor sürücüsü kullanılmıştır (Şekil 3). Isıtıcının güç kaynağı olarak Meanwell 24V 6,5A'lık DC güç kaynağı tercih edilmiştir. Sistemin soğutma ünitesi için bakır levha ve 2 adet 40x80x10 mm boyutlarında alüminyum sıvı soğutma bloğu kullanılmış olup, sistem içerisinde su sirkülasyonu sağlamak için de Kemos Kızılırmak marka 12 V ile çalışan mazot ve sıvı aktarma pompası (PMP-0016) kullanılmıştır (Şekil 4). Pompayı beslemek için ise 12V 5A'lık ikinci bir DC güç kaynağından faydalanılmıştır.



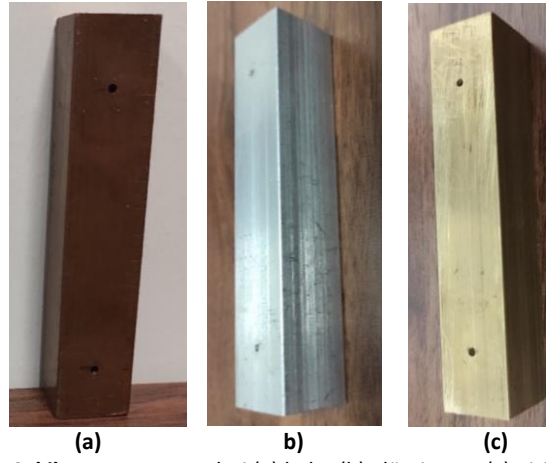
(a)



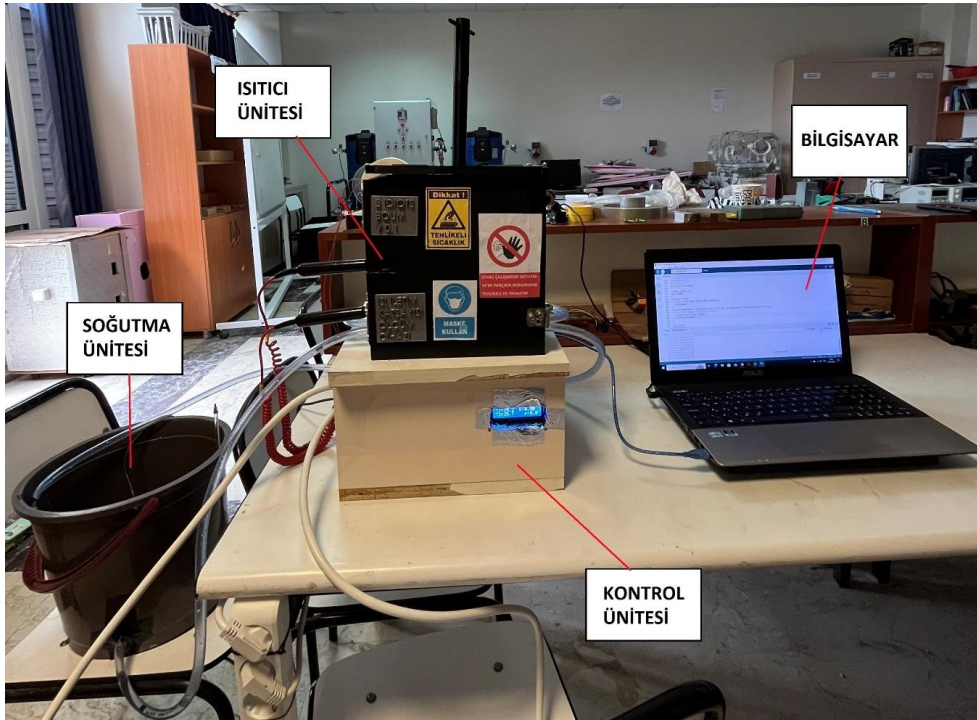
(b)

Şekil 4. Soğutma sistemi (a) bakır ve alüminyum sıvı soğutma bloğu (b) PMP-0016 sıvı aktarma pompası

Geliştirilen ısı iletim katsayısı ölçüm cihazını test etmek için 20x20x100 mm boyutlarında bakır, alüminyum ve pirinç malzemelerden oluşan numuneler temin edilmiştir. Numunelerin belirlenen noktalarına termokuplların yerleştirilebilmesi için matkap ile küçük delikler delinmiştir (Şekil 5). Geliştirilen ürünün ölçtüğü sıcaklıklar, RealTerm ücretsiz yazılımı kullanılarak deney süresi boyunca anlık olarak bilgisayara kaydedilmiştir (Şekil 6).



Şekil 5. Test numuneleri (a) bakır (b) alüminyum (c) pirinç



Şekil 6. Geliştirilen ısı iletim katsayısı ölçüm deney düzeneği

3. Bulgular

Geliştirilen ısı iletim katsayısı ölçüm düzeneğinin gerekli bağlantıları yapılmıştır ve her bir numunenin 45 dakika boyunca ölçülen sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Yapılan ön denemelerde her bir numunenin yaklaşık olarak 15 dakikada sürekli rejime ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, 30 dakika boyunca sıcaklıklar anlık olarak sürekli ölçülüp yazılımda anlık olarak ısı iletim katsayısı değerleri hem cihazın üzerinde bulunan LCD ekrana yazdırılmış hem de excel dosyasına kaydedilmiştir. Verilerin doğru alınabilmesi için her bir numunenin ölçümü 2 kez tekrarlanmıştır. Bununla birlikte numuneye verilen ısının doğru olarak belirlenebilmesi için L298n motor sürücüsünde yaşanan gerilim kaybı göz önünde bulundurulmuş ve sürücüden çıkan gerilim, Fluke 15B+ dijital multimetre ile 22 V olarak ölçülmüştür. Çalışmada

kullanılan seramik ısıtıcının direnci, ürün kataloğunda 23,5 Ω olarak verilmiştir. Buradan da sistemden geçen akım 0,936 A olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte hem voltaj hem de akım değerleri devreye bağlanan bir dijital voltmetre-ampermetre ile belirlenmiştir.

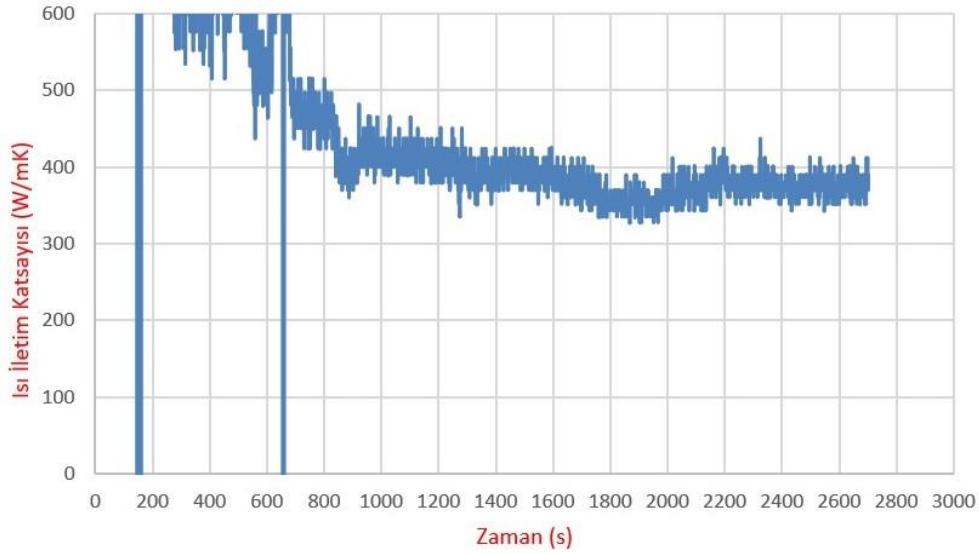
Geliştirilen cihazda numunelerin ısı iletim katsayılarının deneysel ölçümünde kullanılan ölçüm aletlerinin ölçüm hatalarının tespiti için belirsizlik analizi yapılmıştır. Çizelge 2'deki veriler kullanılarak, geliştirilen cihazın hesapladığı ısı iletim katsayısı verilerindeki belirsizlik %2,87 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 2. Belirsiz analizi tespitinde kullanılan veriler

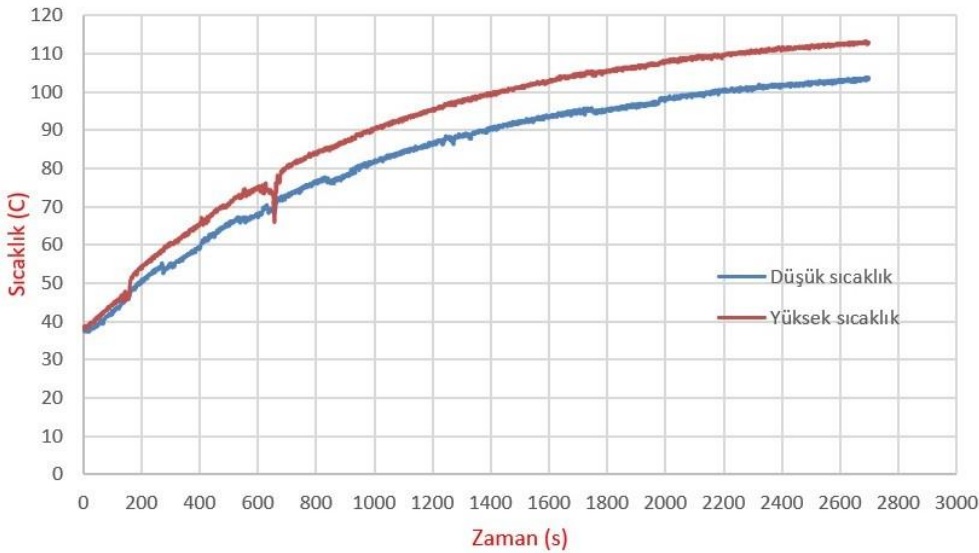
Ölçüm verileri	Doğruluk
Volt	%0,5
Akım	%1,5
Uzunluk	%0,5
Sıcaklık	$\pm 1,5$ °C

Çalışmada kullanılan bakır, pirinç ve alüminyum numunelerin zamana bağlı olarak ölçülen ısı iletim katsayıları değişimleri ve sıcaklık farkı değişimleri sırasıyla Şekil 7, 8 ve 9'da verilmiştir. Yapılan deneylerde sistem kararlı rejime ulaştıktan sonra bakır numunenin ısı iletim katsayısı, ortalama 385,01 W/m.K olarak hesaplanmıştır. Halıcı ve Gündüz (2013) ısı transferi kitabında bakırın ısı iletim katsayısı, 120 °C'de yaklaşık olarak 392 W/m.K olduğu görülmüştür. Literatürde oda sıcaklığında (25 °C) verilen tablolarda bakırın ısı iletim

katsayısının 388-401 W/m.K olarak görülmektedir (Chung 2001, Muhammad and Umar 2013, Deneysan 2015). Buradan geliştirilen cihazla hesaplanan değer ile literatür değerleri arasında iyi bir uyum olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir. Bununla birlikte Şekil 7'de de görüldüğü gibi, bakır numunenin deneysel olarak elde edilen ısı iletim katsayısı değerlerinin 600-800 s zaman aralığındaki ani düşüşünün, deney sırasında termokupl bağlantılarındaki geçici temassızlıktan kaynaklandığı düşünülmektedir.



(a)

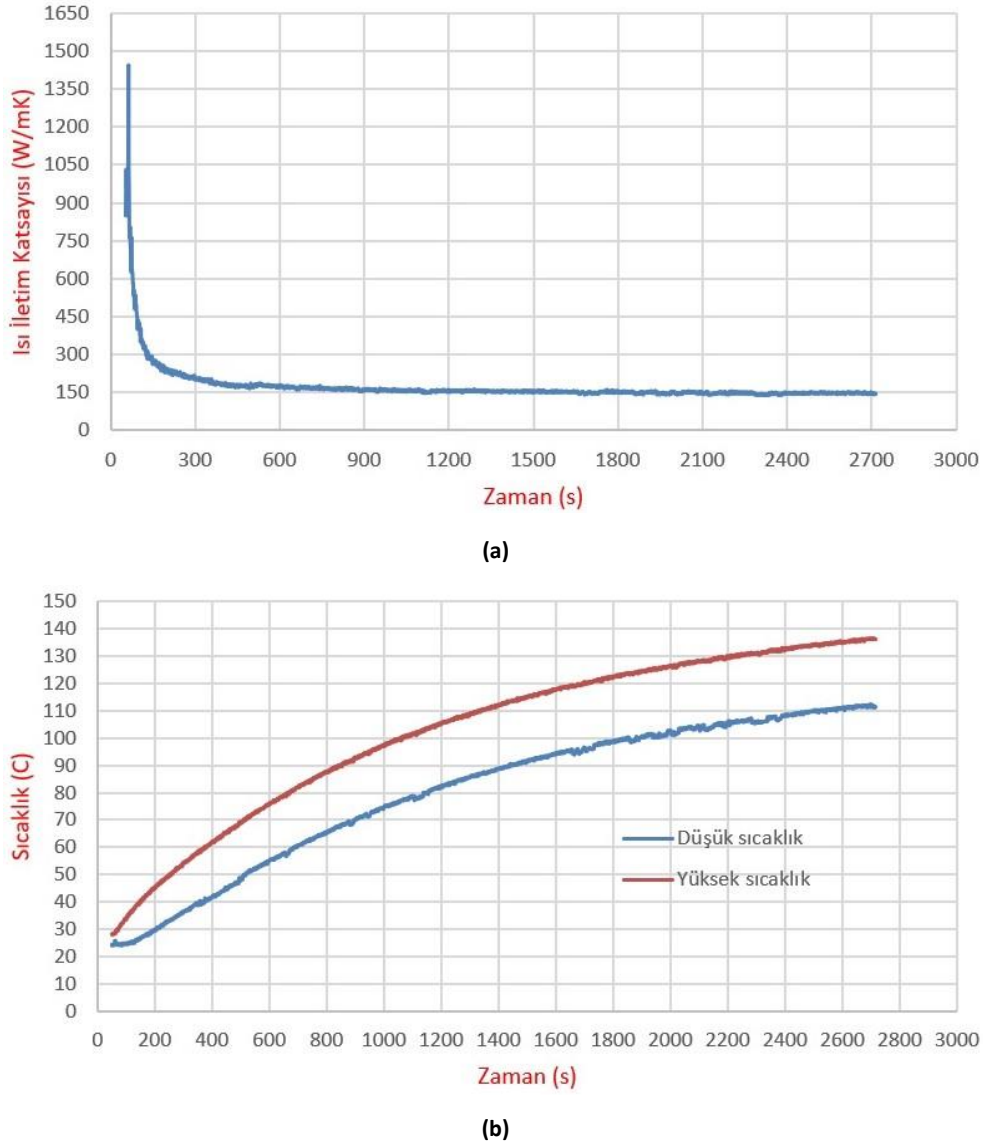


(b)

Şekil 7. Bakır numunenin 20,61 W ısıtıcı gücü için (a) ısı iletim katsayısının (b) sıcaklık farkının zamanla değişimi

Pirinç numunenin kararlı rejim koşullarında ısı iletim katsayısı ortalama 151.215 W/m.K deneysel olarak hesaplanmıştır. Halıcı ve Gündüz (2013) ısı transferi kitabında pirinç malzemenin ısı iletim katsayısı, 110 °C'de yaklaşık olarak 128 W/m.K olduğu tespit edilmiştir. Literatürde oda sıcaklığında (25 °C) verilen

tablolarda pirinç malzemenin ısı iletim katsayısının 125-150 W/m.K olarak görülmektedir (Chung 2001, Muhammad and Umar 2013, Deneysan 2015). Buradan da geliştirilen cihazla hesaplanan değer ile literatür değerleri arasında uyum olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir.



Şekil 8. Pirinç numunenin 20,61 W ısıtıcı gücü için (a) ısı iletim katsayısının (b) sıcaklık farkının zamanla değişimi

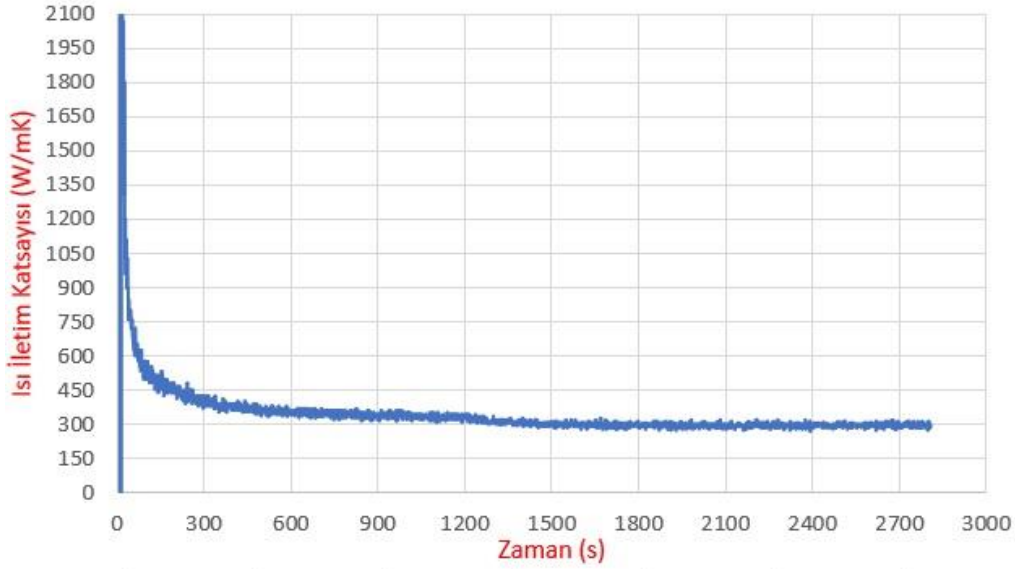
Alüminyum numune için kararlı durumdaki ısı iletim katsayısı ortalama 277 W/m.K deneysel olarak hesaplanmıştır. Halıcı ve Gündüz (2013) ısı transferi kitabında alüminyum malzemenin ısı iletim katsayısı, 90 °C'de yaklaşık olarak 215 W/m.K olduğu tespit edilmiştir. Literatürde oda sıcaklığında (25 °C) verilen tablolarda alüminyum malzemenin ısı iletim katsayısının 205-247 W/m.K olarak görülmektedir (Chung 2001, Muhammad and Umar 2013, Deneysan 2015). Buradan da geliştirilen cihazla hesaplanan değer ile literatür değerleri arasında yaklaşık bir uyum olduğu söylenebilir. Literatürdeki değerlere göre alüminyumun ısı iletim katsayısı 247 W/m.K kabul edilirse, hesaplanan 277 W/m.K değeri ile aralarında yaklaşık % 12'lik bir fark söz konusudur.

Bakır, pirinç ve alüminyum numunelerinde gerçekleştirilen deneysel sonuçlara göre, geliştirilen ısı

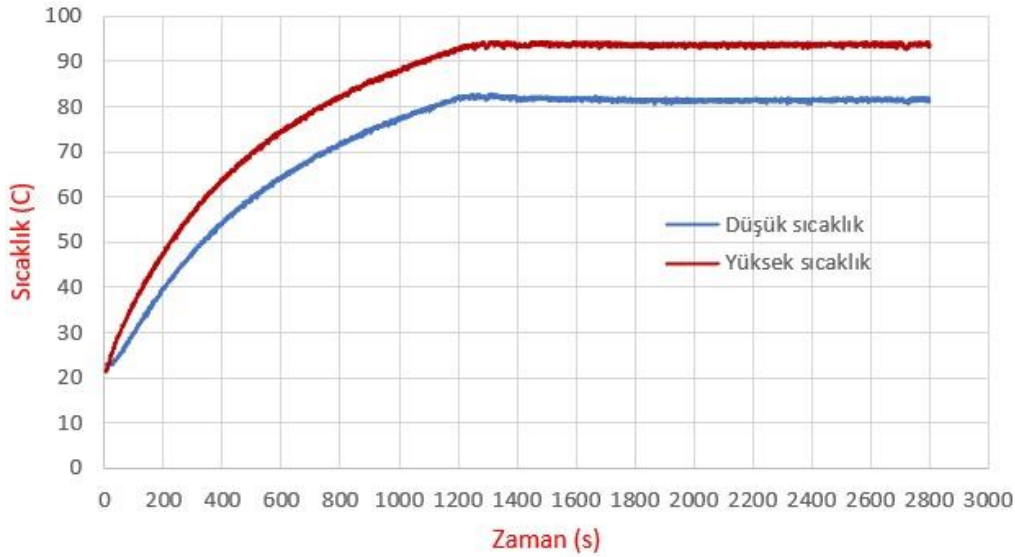
iletim katsayısı ölçüm cihazının değerleri, literatür değerlerine göre bakır ve pirinç malzeme ile tam uyum sağlamıştır, alüminyum numunede ise bir miktar (yaklaşık %12) bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Alüminyum numunede oluşan bu farkın, geliştirilen ölçüm cihazında kullanılan yeterince kaliteli olmayan sıcaklık sensörleri ve sürücülerinden, kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan deneyler sırasında sıcaklık sensörü ve sürücülerin düşük hassasiyetlerinden dolayı sıcaklık ölçümlerinde dalgalanmalar olduğu belirlenmiş ve bu durum ise ısı iletim katsayısı değerlerinin ve sıcaklıkların zamanla değişimi grafiklerinde gösterilmiştir (Şekil 7, 8 ve 9). Bununla birlikte yapılan literatür araştırması sonucu, laboratuvarlarda kullanılan profesyonel ısı iletim katsayısı ölçüm cihazlarının doğruluğu genellikle %5 civarında iken, geliştirilen düşük bütçeli cihazın doğruluğu %0,1-12 arasında olduğu belirlenmiştir (C-Therm TCi 2024 ve

Kyoto QTM710 2024). Sonuç olarak hassasiyeti yüksek sıcaklık sürücüler ve termokupların kullanımı ile bu durumların giderilebileceği ve literatür ile uyumlu sonuçların elde edilebileceği tahmin edilmektedir. Çünkü alüminyum dışındaki diğer numunelerin sonuçları yaklaşık olarak literatür ile uyum içindedir. Yani geliştirilen düşük bütçeli ısı iletim katsayısı ölçüm

cihazından elde edilen bu deneysel sonuçlar, cihazın tatmin edici ölçümler sağladığını göstermiştir. Söz konusu cihaz için yapılan bu çalışma, cihazın olumlu gelişimi için neler yapılması gerektiği hususunda önemli bilgiler vermiştir. Bu nedenle çalışma bu haliyle uygulama ve literatür için önemli sonuçlar göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 9. Alüminyum numunenin 20,61 W ısıtıcı gücü için (a) ısı iletim katsayısının (b) sıcaklık farkının zamanla değişimi

4. Sonuçlar ve Tartışma

Isı iletim katsayısı, malzemeler için ayırt edici önemli bir termofiziksel özellik olup, günümüzde her geçen gün keşfedilen yeni malzemelerin mühendislik hesaplamalarında kullanılabilmesi için bu katsayının ölçülerek belirlenmesi gerekmektedir. Ancak ısı iletim katsayısını ölçen profesyonel cihazların satın alınması,

ülkemizde yaşanan ekonomik gelişmeler nedeniyle çok zorlaşmıştır. Bu yüzden bu çalışmada yığın malzemelerin ısı iletim katsayısını mutlak teknik yöntemi kullanarak Fourier kanunuyla çalışan düşük bütçeli bir ölçüm cihazı geliştirilmiştir. Geliştirilen cihazın yaklaşık maliyeti 3000 TL civarındadır ve ön araştırma çalışması için yaygın olarak bulunabilmesinden dolayı tercih edilen bakır, pirinç ve

alüminyum numunelerinin ölçüm değerleri literatürde bulunan değerlerle uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte bu çalışmada planlanan düşük bütçeli ısı iletim katsayısı ölçüm cihazının ön araştırma sonuçları paylaşılmış olup, tasarlanan cihazın geliştirilmesinde elde edilen lehte ve aleyhte tecrübeler ve bilgiler aşağıda özetlenmiştir. Ayrıca bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile cihazın olumlu yönde gelişimi için bundan sonra neler yapılması gerektiği hakkında önemli bilgilerde sunulmuştur.

Lehte olan tecrübeler ve bilgiler;

- 1- Cihazın toplam maliyeti çok düşük olup, ölçüm verileri literatürle genel olarak uyumludur.
- 2- Numune ve seramik ısıtıcının etraflarına saran taş yünü ve PLA'dan oluşan gövde malzemesi iletim, taşınım ve ışınlama çevreye olabilecek ısı transferlerini engellemiştir. Dolayısıyla ışınlama kalkanı vs. gerek duyulmadan sistem başarılı bir şekilde çalışmıştır.

Aleyhte olan tecrübeler ve bilgiler;

- 1- Yaşanan en büyük problem sıcaklık sensörü sürücülerinde yaşanmıştır. Çünkü bu çalışmada kullanılan sıcaklık sensörü sürücülerin hassasiyeti çok düşüktür. Termokupl ürettiği mV seviyesindeki verileri yüksek doğrulukta zaman zaman aktaramadığı belirlenmiştir.

Gelecekte yapılacak olan iyileştirmeler;

- 1- Tasarlanan cihazın bütün parçaların tek bir gövde içerisinde kompakt olması ve düşük bütçeli bu cihazın ticari olarak satılabilecek bir cihaz haline getirilmesi hedeflenmektedir.
- 2- Cihazın, yığın malzemelerde hangi ısı iletim katsayı değerleri arasında çalışabileceğinin yani ısı iletim katsayısı skalasının belirlenmesi için daha fazla numuneler ile araştırmaların yapılması planlanmaktadır.
- 3- Geliştirilecek cihazın şu an profesyonel olarak kullanılan diğer ısı iletim katsayısı ölçüm cihazları ile karşılaştırılması, doğruluğunun ve tekrar edilebilirliğinin araştırılması hedeflenmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deneyleme, Doğrulama, Görselleştirme.

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deneyleme, Doğrulama, Görselleştirme.

Yazar 3: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deneyleme, Doğrulama, Görselleştirme.

Yazar 4: Araştırma, Fikir sahibi, Metodoloji, Çalışma yöneticisi, Biçimsel analiz, Görselleştirme, Yazma.

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

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

5. Kaynaklar

- Atmaca H. M., 1992. Yalıtım Malzemelerinin Isı İletim Katsayılarının Ölçülmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 106.
- Cahill G. D., 1990. Thermal Conductivity Measurement From 30 to 750 K: the 3omega Method. *Rev. Sci. Instrum.*, **61**, 2, 802-808.
<https://doi.org/10.1063/1.1141498>
- Chung D. L., 2001. Applied Materials Science Applications of Engineering Materials in Structural, Electronics, Thermal, and Other Industries. CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C.
<https://doi.org/10.1201/9781420040975>
- Çengel Y. A., 2012. Isı ve Kütle Transferi-Pratik Bir yaklaşım. Vedat Tanyıldızı-ihsan Dağtekin (çeviri editörü), İzmir Güven Kitapevi, 1-39.
- Franco A., 2007. An Apparatus For the Routine Measurement of Thermal Conductivity of Materials for Building Application Based on a Transient Hot-wire Method. *Applied Thermal Engineering*, **27**, 2495- 2504.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.02.08>
- Halıcı, F. ve Gündüz, M., 2013. Örneklerle Isı Geçişi-Isı Transferi. Birsen yayınevi, 546-559.
- Isıker Y. ve Yeşilata B., 2017. Yapı Malzemelerinin Isı İletim Katsayılarının Tespitine Yönelik Yeni Bir Yöntem Geliştirilmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, **2(1)**, 14-21.
- Kayfeci M. ve Kurt H., 2007. Sıvılar İçin Isı İletim Katsayısı Ölçüm Cihazının Tasarımı, İmali ve Test Edilmesi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **22(4)**, 907-915.
- Muhammad U. K. and Umar. S., 2013. Experimental Performance Investigations and Evaluation of Base Metals Thermocouples. *International Journal of Modern Applied Physics*, **3(1)**, 26-37.

Turgut A., Tavman İ. ve Tavman S., 2009. Measurement of Thermal Conductivity of Edible Oils Using Transient Hot Wire Method. *International Journal of Food Properties*, **12:4**, 741-747.

<https://doi.org/10.1080/10942910802023242>

Yüksel N., 2010. Gözenekli Yapılarda Yapı ve İşletme Parametrelerinin Isı İletim Katsayısına Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 257.

Zhao D., Qian X., Gu X., Jajja S. A. and Yang R., 2016. Measurement Techniques for Thermal Conductivity and Interfacial Thermal Conductance of Bulk and Thin Film Materials. *Department of Mechanical Engineering, University of Colorado, Boulder, CO 80309-0427*, 1-64.

<https://doi.org/10.1115/1.4034605>

İnternet Kaynakları

1- C-Therm TCi, Simplifying Thermal Conductivity (k), https://www.prager-elektronik.at/wp-content/uploads/2017/01/katalog_kategorie_thermische-analyse_analyse_waermeleitfaehigkeit-c-therm-tci.pdf, (04.02.2024).

2- Deneysan, 2015, Ht-350 Termal İletkenlik Eğitim Seti Deney Föyleri, <https://static.ohu.edu.tr/uniweb/media/portallar/makinemuhendisligi/duyurular/11718/0qx2eq3y.pdf>, (04.02.2024).

3- Kyoto QTM710, <https://www.kutaygroup.com/tr/kyoto-kem-qtm-710- ISIL-iletkenlik-olcum-cihazı>, (04.02.2024).

TOPSIS Yaklaşımı ile Metasezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Performans Değerlendirmesi

Performance Evaluation of Meta-Heuristic Optimization Algorithms with The TOPSIS Approach

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 07.11.2023

Kabul/Accepted: 07.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Şehmus FİDAN^{1*}, Metin ZALOĞLU², Emre ERKAN³

¹ Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO/Elektronik Programı, Türkiye

² Batman Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye

³ Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO/Elektronik-Haberleşme Programı, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bir sistemin sadece giriş/çıkış verilerinin kullanılarak matematiksel bir model elde etmek için doğadan ilham alan metasezgisel algoritmalar kullanılabilir. Bunu gerçekleştirmek için yapay ekosistem (YEA), çiçek tozlaşma (ÇTA), güve-alev (GAA), karınca aslanı algoritması (KAA), halat çekme (HÇA), atom arama (AAA), beyin fırtınası (BFA), su döngüsü (SDA), mercan resifleri (MRA) ve yaşam seçimi tabanlı algoritma (YSTA) gibi çeşitli metasezgisel optimizasyon algoritmaları ele alınmış ve önerilen transfer fonksiyonunun parametrelerini optimize etmek için kullanılmıştır. Ayrıca zaman, maksimum fonksiyon, erken durdurma ve maksimum generasyon sınırlılıkları altında performanslar karşılaştırılmıştır. Ancak bu durumda MAE, MAPE, R^2 gibi performans metriklerinin yanında transfer fonksiyonlarına özgü yükselme zamanı, oturma zamanı, aşım miktarı gibi metrikler de ortaya çıkmaktadır. Çok sayıda metrik hangi algoritmanın en iyi olduğunu belirlemeyi zorlaştırmaktadır. Bu zorluğun üzerinden gelmek için bu çalışmada Topsis (Technique for Order Preference by Similarity) olarak anılan çok kriterli bir karar verme yaklaşımının kullanımını önerilmiştir. Çoklu kriter için algoritmanın çözüm zamanı, performans (R^2) ve yükselme zamanı dikkate alınmıştır. Yapılan çalışma neticesinde en iyi algoritma sıralamasını belirlemek oldukça kolay ve pratik bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler Metasezgisel Algoritma; Sistem Tanımlama; Transfer Fonksiyonu; Topsis.

Abstract

Meta-heuristic algorithms inspired by nature can be utilized to derive a mathematical model of a system based on input/output data. To achieve this, various meta-heuristic optimization algorithms such as artificial ecosystem optimization (AEO), flower pollination algorithm (FPA), ant lion optimizer (ALO), moth-flame optimization (MFO), tug of war optimization (TWO), atomic search optimization (ASO), brain storm optimization (BSO), water cycle algorithm (WCA), coral reefs optimization (CRO), and life choice-based optimization (LCO) have been considered and employed to optimize the parameters of the proposed transfer function. Additionally, their performances have been compared under constraints such as time, maximum function evaluations, early stopping, and maximum generations. However, in this context, alongside performance metrics such as MAE, MAPE, and R^2 , metrics specific to transfer functions like rise time, settling time, and overshoot also emerge. The multitude of metrics makes it challenging to determine which algorithm performs best. To overcome this difficulty, the use of a multi-criteria decision-making approach known as Topsis (Technique for Order Preference by Similarity) is proposed in this study. The algorithm's solution time, performance (R^2), and rise time have been considered for multiple criteria. As a result of the study, determining the best algorithm ranking has been accomplished in a straightforward and practical manner.

Keywords: Meta-heuristic Algorithm; System Identification; Transfer Function; Topsis.

1. Giriş

Karmaşık ve çok boyutlu optimizasyon problemlerinin çözümünde doğadan ilham alarak geliştirilen metasezgisel (MS) algoritmalar giderek popüler hale gelmektedir. Bu algoritmalar, global çözüme yaklaşmaya çalışırken deterministik olmayan yöntemler kullanırlar (İzci vd. 2022). Birçok farklı MS algoritması bulunmakla birlikte yapay arı koloni algoritması (Karaboğa ve Baştürk 2007), karınca kolonisi optimizasyonu (Dorigo vd. 2006), parçacık sürü optimizasyonu (Kennedy ve Eberhart 1995)

vb. algoritmalar örnek olarak verilebilir. Bu algoritmaların her biri, benzemeye çalıştığı doğal sistemlerden farklı özelliklere sahiptir. Bu özellikleri ile MS algoritmaları farklı optimizasyon problemlerine uyarlanabilirler (Yang 2020). MS algoritmaları bir sistemin matematiksel modelini elde etmek için kullanılabilir. Bu yaklaşım, özellikle matematiksel modelin elde edilmesinin zor olduğu karmaşık sistemlerde faydalı olabilir (Ding vd. 2015). Bir sistemden ölçülen giriş/çıkış verilerinin kullanılmasıyla matematiksel model üretmenin önemli ve etkili yöntemlerinden biri sistem tanımlamadır. Sistem

tanımlama yöntemleri gerçek sistemlerin giriş/çıkış verilerini kullanarak tahmini matematiksel model elde etmek için kullanılır ve bu yöntemlerin birçok farklı alan için önemli uygulamaları vardır. Parametrik yöntemler sistemin matematiksel modele sahip olması durumunda, parametrik olmayan yöntemler ise modele bağlı olmadan sistemin davranışlarını tahmin etmek için kullanılır. Her iki yöntemde giriş/çıkış verilerini kullanarak sistemin matematiksel modelini oluşturmak, sistemin davranışını, özelliklerini ve performansını analiz etmek için kullanılır (Ji vd. 2020). MS algoritmalar, bir sistemin gerçek davranışına daha yakın bir matematiksel model elde etmek için kullanılabilir. Bu algoritmalar, sistem davranışının matematiksel olarak ifade edilmesi için önerilen transfer fonksiyonlarının en uygun parametrelerini belirlemek üzere iteratif bir süreç uygularlar (Mohammadi vd. 2022). Evrimsel, sürü, fizik, insan, biyolojik, sistem ve matematik temelli olarak 6 kategoriye ayrılan MS algoritmalar; optimizasyon, makine öğrenimi, veri madenciliği ve sistem tasarımı alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Yapay ekosistem tabanlı optimizasyon algoritması (YEA), canlı organizmaların üretim, tüketim ve ayrışma davranışlarını örnek alır. El-Dabah vd. (2021), PV'lerin üç diyotlu modelinin bilinmeyen parametrelerini belirlemek için YEA tabanlı bir çözüm önermişlerdir. Omotoso vd. (2022), akıllı mikro şebekelerin entegrasyonu ve optimal boyutlandırma problemini çözmek için YEA önermişlerdir. Dağıtım ağlarının işletilmesi ve olası güç kayıplarını azaltma üzerine çalışmaları olan Nguyen (2023) YEA yöntemine dayanan yeniden ağ yapılandırma yöntemini sunmuştur. İzci vd. (2022), bir düşürücü tip DA-DA (doğru akım) dönüştürücünün çıkış voltajının kontrolünde en uygun PID (proportional integral ve derivative-PID) denetleyici parametrelerini belirlemek için nelder-meet ve yapay ekosistem algoritması (YEA-NM) tabanlı bir algoritma sunmuştur.

Çiçek tozlaşma algoritması (ÇTA), çiçeklerin yayılma yönteminden esinlenerek geliştirilen bir MS optimizasyon algoritmasıdır (Yang 2012). ÇTA, esnek giriş sisteminde (Fadzli vd. 2022), IIR filtrenin (Infinite Impulse Response) modelinin belirlenmesinde (S. Singh vd. 2016), sıcaklık kontrol sistemini tanımlamada (Sompracha ve Rukkaphan 2021) ve da motor model parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır (Puangdownreong vd. 2017). Ayrıca fırçasız da motorun (FDA) motorun kısmi kesirli model parametrelerinin elde edilmesinde (Khluabwannarat vd. 2018), kısmi kesirli kaotik harita modelinin oluşturulmasında (Yousri vd. 2020) ve hiper-kaotik bir sistemin model parametrelerinin tahmininde

(Chen vd. 2019) kullanılmıştır. Karınca aslanı algoritması (KAA), karınca aslanlarının doğadaki avlanma mekanizmasını simüle eder (Mirjalili 2015b). KAA algoritması hidrolik türbin tahrik sisteminde (Tian vd. 2018), IIR filtresinin parametrelerinin belirlenmesinde (Nair vd. 2017) ve PV hücre modelinin elde edilmesinde (Wu vd. 2019) kullanılmıştır.

Güve-alev optimizasyonu (GAA), yapay ışık kaynakları etrafında güvelerin uçuşundan ilham alan bir MS optimizasyon algoritmasıdır. GAA algoritması, arama aracı olarak güvelerle arama uzayını araştırır ve keşif tamamlanana kadar her adımda en iyi çözümü günceller (Mirjalili 2015a). GAA algoritmaları lineer olmayan sistem tanımlamada (Canayaz 2019), iletim hattı parametrelerinin tanımlanmasında (Shaikh vd. 2023), LCL filtrenin modelinin belirlenmesinde (Long vd. 2022), tek fazlı inverter filtresinin hesaplanmasında (Wu vd. 2017) ve kalman filtresinin sistem parametrelerinin tahmin edilmesinde (Janjanam vd. 2022) kullanılmıştır.

Halat çekme algoritmasında (HÇA), her aday bir ip çekme yarışmasında takım olarak kabul edilir ve çözüm kalitelerine göre takımların yeni konumlarını belirlemek için Newton yasaları kullanılmaktadır. Kaveh ve Bakhshpoori (2021) açıklıkları ve kırımları olan mazgallı kırımların tasarımını optimize etmek için bu algoritmayı kullanmışlardır. Atom arama algoritması (AAA), Lennard-Jones ve bağ uzunluğu potansiyellerini kullanarak atom etkileşimlerini modeller ve çok çeşitli optimizasyon problemlerine uygulanabilir (Zhao vd. 2019). AAA, proton değişim membran yakıt hücre (PEMFC- proton exchange membrane fuel cells) modelinin parametrelerinin belirlenmesinde (Mossa vd. 2021) ve lineer-periyodik sistem tanımlama (Yin vd. 2020) gibi problemlere uygulanmıştır. Beyin fırtınası optimizasyonu (BFA) algoritması, insana özgü olan beyin fırtınasını taklit ederek çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilmiştir (Shi 2011). BFA, PV modelinin parametrelerinin hesaplanmasında (Yan vd. 2019) ve lineer olmayan modellerde (NARMAX) çalışılmıştır (Pal vd. 2016).

Eskandar vd. (2012), doğal çevrede gözlemlenen idealize hidrolojik döngüden esinlenerek geliştirilen MS algoritması olan su döngüsü algoritmasını (SDA) tanıtmışlardır. SDA tek ve çift diyotlu PV sistem model parametrelerinin belirlenmesinde (Kler vd. 2017) ve hibrit PV/Rüzgâr sistem modelinin elde edilmesinde (Nazir vd. 2022) kullanılmıştır. Mercan resifleri algoritması (MRA), mercanların bulunduğu resifte çoğalmak için diğer mercanlarla olan mücadeleyi modellemektedir (Salcedo-Sanz vd. 2014). MRA algoritması manyetik tahrik

sisteminin model parametrelerinin belirlenmesinde (Y. Yang vd. 2017) ve adaptif IIR tabanlı sistem tanımlama amaçlı olarak çalışılmıştır (Y. Yang vd. 2018). Yaşam seçim tabanlı algoritma (YSTA), insanların hedeflerine ulaşmak için diğer üyelerin öğrenme yeteneğine dayanan algoritmalarından biridir (Khatri vd. 2020). Çok kriterli karar verme, farklı amaçları ve kısıtlamaları dengelemek, karmaşık seçimlerde daha bütünsel ve bilinçli kararlar almak için kullanılan bir süreç olarak ifade edilebilir. Bu süreç, çeşitli amaçları ve kısıtlamaları dengelemek, karar vericilere daha bütünsel bir perspektif sunmak ve sonuç olarak daha bilinçli kararlar almak amacıyla kullanılır. Bu noktada, çeşitli çok kriterli karar verme yöntemleri devreye girmektedir. Çok kriterli karar verme yöntemleri arasında AHP, Topsis, Vikor, Electre, Promethee gibi yöntemler bulunur (Paul vd. 2021). Topsis yöntemi AHP yönteminin karmaşıklığına göre daha basit ve anlaşılır bir yapıdadır. Electre yöntemi ile kıyaslandığında ideal ve ideal olmayan çözümlere olan benzerlik üzerinden bir sıralama sunmaktadır. Vikor yönteminde ise çok daha karmaşık denklemler bazen karmaşıklığa sebep olabilmektedir (Ceballos vd. 2016). Bu makalede kolayca uygulanabilmesi sebebiyle Topsis yöntemine odaklanılmış ve sistem tanımlama amaçlı olarak üretilen modellerin en iyisinin hangisinin olduğuna karar vermek için kullanılmıştır. Topsis, gri kurt algoritması (GWO) ile birleştirilerek aşındırıcı jet işleme sürecinin parametrik optimizasyonu için kullanılmıştır (Kalita vd. 2022). Singh vd. (2020), dağıtılmış enerji kaynaklarının şebekeye optimal entegrasyonunu sağlamak için çok kriterli karar verme yöntemi kullanmıştır. Topsis yöntemi ayrıca pareto optimal çözümü bulmada (Frag vd. 2020), 6 farklı MS algoritmasının en iyisini belirlemede (Shadkam vd. 2021), işletmelerde MS ile ortaya çıkan çözümlerin en iyisini bulmada (Crispim ve Pinho 2009), sürdürülebilir tedarik zinciri ağı tasarımının karar verme sürecinde (Guo vd. 2022) kullanılmıştır. Sistem tanımlama problemlerinin çözümü için önerilen transfer fonksiyonlarının zamana ve performansa dayalı farklı birçok performans parametresi bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan Wilcoxon istatistiksel testi tek bir parametre (R^2) kullanarak karşılaştırma yapmak için yetersizdir. Bu sebeple, sistem tanımlama amaçlı olarak kullanılan transfer fonksiyonlarının performansını karşılaştırmada ilk defa çok kriterli karar verme yöntemi olan Topsis önerilmiştir.

Bu çalışmanın özgün katkıları şu şekilde özetlenebilir:

1- MS algoritmaları giriş/çıkış verilerini kullanarak bir transfer fonksiyonu üretmek için kullanılmıştır. Böylece MS algoritmaların sistem tanımlama problemlerine uygulanabilirliği gösterilmiştir.

2-MS algoritmaları için kararlılık ve güvenilirlik analizleri kapsamında maksimum generasyon, durdurma sınırlılığı, fonksiyon hesaplama ve zaman sınırlılıkları dikkate alınarak performansları incelenmiştir.

3-10 farklı MS algoritması ve 4 farklı sınırlılık altında ortaya çıkan 40 farklı durumda en iyi algoritmayı bulmak için Topsis yöntemi uygulanmıştır.

4-Elde edilen transfer fonksiyonunun geçici durum cevapları üzerinden performansları incelenmiştir. Ayrıca çeşitli istatistiksel performans göstergeleri (MAPE, MAE, MSE, R^2) sunularak sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Alt bölümlerde Topsis yöntemi ve metasezgisel algoritmaların detaylarından bahsedilmiştir. Ele alınan metasezgisel algoritmaların seçiminde güncel yöntemler olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek için sistem tabanlı (yapay ekosistem, su döngüsü), evrim tabanlı (çiçek tozlaşma, mercan resifleri), sürü tabanlı (karınca aslanı, güve-alev), fizik tabanlı (halat çekme, atom arama) ve insan davranışı tabanlı (beyin fırtınası, yaşam seçim) algoritmalara odaklanılmıştır. Bu şekilde, çeşitli algoritmaların özellikleri özetlenerek karşılaştırma yapılabilecek bir çerçeveye oluşturulmuştur.

2.1 Topsis

Topsis yöntemi, bir dizi alternatif arasından en iyi olanı seçmek için kullanılan çok kriterli karar verme yöntemidir (Fan vd., 2020). Bu yöntemde öncelikle bir karar verme matrisinin oluşturulması gereklidir. D karar matrisi:

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

D matrisinde x_{mn} m alternatif sayısını ve n kriter sayısını temsil eder. D matrisinin normalizasyonu Denklem 2 ile gerçekleştirilir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2)$$

Ardından ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinin oluşturulması için Denklem 3 kullanılır.

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (3)$$

v_{ij} , hesaplandıktan sonra ideal (A^+) ve negatif-ideal (A^-) çözümler Denklem 4-5'e göre hesaplanır.

$$A^+ = \{\max_i v_{ij} \mid j \in J_+\} \cup \{\min_i v_{ij} \mid j \in J_-\} \quad (4)$$

$$A^- = \{\min_i v_{ij} \mid j \in J_+\} \cup \{\max_i v_{ij} \mid j \in J_-\} \quad (5)$$

Burada, J_+ olumlu etkisi olan kriterlerle ilişkilendirilir. J_- ise olumsuz etkileri olan kriterler ile ilişkilidir. Bu aşamadan sonra ideal ve negatif ideal çözümlerin hesaplanması (Denklem 6-7) gereklidir.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad (6)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2} \quad (7)$$

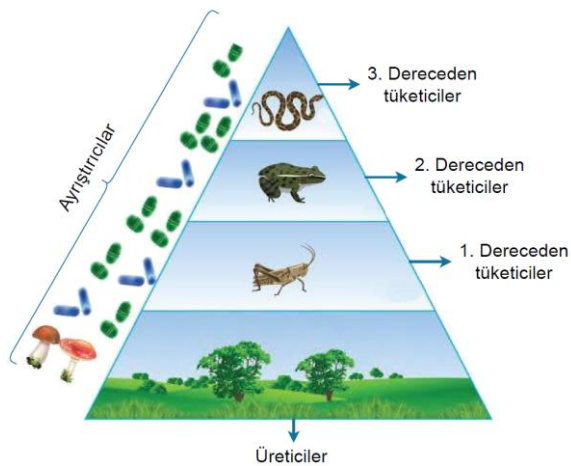
Son olarak, her bir alternatif çözümün ideal çözüme göreceli yakınlığı Denklem 8'e göre hesaplanır.

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (8)$$

2.2 Metasezgisel Algoritmalar

2.2.1 Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon

Yapay ekosistem tabanlı optimizasyon algoritması (YEA), ekosistemin enerji akışından ilham alarak önerilmiştir. YEA algoritması, canlı organizmaların üretim, tüketim ve ayrışma gibi üç benzersiz davranışını taklit etmektedir. Üreticiler, bitkiler gibi kendi yiyeceklerini üreten organizmalardır. Tüketiciler, kendi yiyeceklerini üretemeyen canlılardır; bu sebeple besin elde etmek için üretici veya tüketici türündeki canlılardan beslenirler. Tüketicileri etobur, otobur veya omnivor olarak sınıflandırmak mümkündür. Otobur tüketiciler, sadece bitkileri tüketirler. Etobur tüketiciler, sadece hayvanları tüketirler. Omnivor tüketiciler ise hem bitkileri hem de diğer hayvanları tüketirler. Ayrıştırıcılar ise ölü bitkiler ve hayvan atıkları gibi materyallerle beslenirler (İzci vd. 2022). YEA'ya dayalı bir ekosistemin temsili Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Ekosistem besin piramidi (Prakash vd. 2020)

YEA'da üretici, gıda üretmek için üreticinin eylemini taklit eder. En düşük uygunluk değerine sahip üretici, bu bireyin ve en iyi bireyin (ayrıştırıcı) arama limitlerine göre

güncellenir. Bu işlemin sonucu olarak, popülasyondaki diğer bireylerde konumlarını günceller. Üretim operatörü kullanılarak, en iyi olan (x_n) ile rastgele oluşturulmuş bir birey (x_{rand}) arasında yeni bir birey (üretici) üretilir. Bu ifade matematiksel olarak Denklem 9-11 arasındaki gibi ifade edilmektedir.

$$x_1(t+1) = (1-a) \cdot x_n(t) + a \cdot x_{rand}(t) \quad (9)$$

$$a = (1 - t/\max_{iter}) \cdot r_1 \quad (10)$$

$$x_{rand} = r \cdot (U - L) + L \quad (11)$$

Üreticiler tarafından üretim işlemi gerçekleştirildikten sonra, tüketicilerin tüketim işlemi başlar. Bu süreçte her tüketici, daha düşük enerji seviyesine bağlı başka bir tüketiciden veya üreticiden enerjisini sağlayabilir. Levy flight adlı matematiksel bir operatör sayesinde birçok hayvanın gıda arama mekanizmasını taklit edilebilir. Bu durumda tüketim aşaması Denklem 12 ve 13'te gösterilmektedir.

$$C = \frac{1}{2} \frac{v_1}{|v_2|} \quad (12)$$

$$v_1 \sim N(0,1), v_2 \sim N(0,1) \quad (13)$$

Denklem 13'te, n (0,1) ortalaması 0 olan ve standart sapması 1 olan normal bir dağılımı temsil eder. Bu tüketim faktörü, her bir tüketicinin farklı av stratejileri kullanarak yiyecek temin etmesine yardımcı olacaktır. Tüketici rastgele otçul olarak seçilirse, o zaman sadece üreticiler yiyecektir. Bu durumda tüketicinin davranışı matematiksel olarak Denklem 14'te sunulmuştur.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + C \cdot (x_i(t) - x_1(t)), i \in [2, \dots, n] \quad (14)$$

Bir tüketici, rastgele bir etobur olarak seçilirse daha yüksek enerji seviyesine sahip başka bir tüketiciyi yer. Bu durumda davranış Denklem 15 ile modellenilebilir.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + C \cdot (x_i(t) - x_j(t)), i \in [3, \dots, n] \quad (15)$$

$$j = \text{randi}([2i - 1])$$

Ekosistem içinde hepçil (omnivor) seçilirse, yüksek enerji seviyesine sahip bir tüketici veya üreticiyi yiyebilir. Bu durumda matematiksel model Denklem 16'da gösterilmektedir.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + C \cdot (r_2 \cdot (x_i(t) - x_1(t))) \quad (16)$$

$$+ (1 - r_2) (x_i(t) - x_j(t)), i \in [3, \dots, n]$$

$$j = \text{randi}([2i - 1])$$

Denklem 16'da r_2 değeri [0,1] aralığında rastgele bir sayıdır. Birey pozisyonlarının güncellenmesinde sırasıyla rastgele seçim veya en başarısız bireylerin tüketim operatörüne bakılır. Bu sayede global noktanın

araştırılması mümkün olmaktadır. Ayırıştırma sürecinde kullanılan h ve e ağırlık katsayıları Denklem 17-20'de verilmiştir. Bu parametreler i . bireyin x_i pozisyon bilgisini güncelleme için kullanılmaktadır.

$$x_i(t+1) = x_n(t) + D \quad (17)$$

$$\cdot (e \cdot x_n(t) - h \cdot x_i(t)), i \in [1, \dots, n]$$

$$D = 3 \cdot u, u \sim N(0,1) \quad (18)$$

$$e = r_3 \cdot \text{randi}([1 \ 2]) - 1 \quad (19)$$

$$h = 2 \cdot r_3 - 1 \quad (20)$$

Şekil 2'de YEA'ya ilişkin sözde kodu verilmiştir. Bu koda öncelikle popülasyon büyüklüğü, karar değişken sayısı ve maksimum yineleme sayısı belirlendikten sonra, rastgele başlatılan popülasyon içinde her bireyin uygunluğu hesaplanır. Ardından, belirli bir yineleme sınırına kadar bireylerin konumları rastgele güncellenir. Bu güncellemeler, rastgele seçilen denklemler aracılığıyla yapılır. Her yineleme sonrasında uygunluk fonksiyonları hesaplanır ve en iyi çözüm (X_{best}) güncellenir. Yineleme sınırına ulaşıldığında veya en iyi çözüm belirlendiğinde algoritma sona erer.

YEA Sözde Kodu

Popülasyon büyüklüğünü(n), karar değişken sayısını ve maksimum yineleme sayısını (t_{max}) belirle.

Ekosistem popülasyonunu rastgele başlat..

En iyi çözüm için Fiti uygunluk değerini ve X_{best} değerini hesapla.

Geçerli yinelemeyi $t=1$ olarak ayarla.

While $t < t_{max}$ ise

X_1 bireysel çözümünü güncelle.

if $\text{rand} < 1/3$ ise Denklem (6) yi kullanarak çözümü güncelle

else if $1/3 < \text{rand} < 2/3$ aralığında ise Denklem(7) yi kullanarak

çözümü güncelle

else $2/3 < \text{rand} < 1$ aralığında değil ise Denklem(8) i kullanarak

çözümü güncelle

end if

end if

Her birey için uygunluk fonksiyonunu hesaplayın ve şimdiye kadar elde edilen en iyi X_{best} çözümünü güncelleyin

Denklem (9) u kullanarak bireyin konumunu güncelleyin

Her birey için uygunluk fonksiyonunu hesaplayın ve şimdiye kadar elde edilen en iyi X_{best} çözümünü güncelle

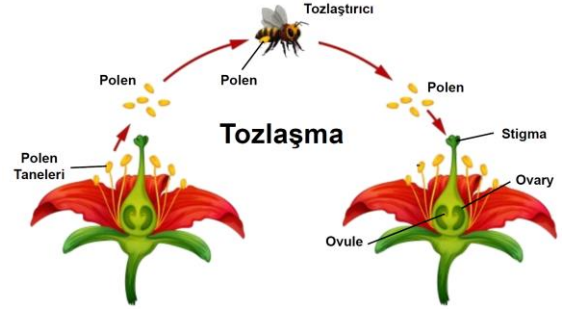
end while $t = t_{max}$ ise döngüyü bitir.

$t = t_{max}$ değil ise eşitlik oluşana kadar X_{best} e dön.

Şekil 2. YEA sözde kodu

2.2.2 Çiçek Tozlaşma Algoritması (ÇTA)

Çiçek tozlaşma algoritması, çiçekli bitkilerin üremesinden ilham alan bir optimizasyon yöntemi olarak ifade edilmektedir (Yang 2012). Optimum üreme sağlamak için biyotik ve abiyotik olmak üzere iki önemli tozlaşma şekli oluşur. Biyotik formda sinek, arı (polinatör) gibi canlılar polenleri taşır, abiyotik formda herhangi bir polinatöre ihtiyaç duyulmaksızın rüzgâr ve su gibi dinamiklerle yayılmasını sağlayan tozlaşma gerçekleşir. Şekil 3 çiçek tozlaşma stratejisini göstermektedir.



Şekil 3. Çiçek tozlaşma stratejisi (Yang 2012)

Çiçek tozlaşma algoritmasının matematiksel modeli Denklem 21 ve 22'de verilmiştir.

$$x^{t+1} = x_i^t + \gamma L(\lambda)(g_* - x_i^t) \quad (21)$$

$$L \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin\left(\frac{\pi \lambda}{2}\right)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}}, (s \gg s_0 > 0) \quad (22)$$

Burada, L , Levy dağılımının matematiksel ifadesini, $\Gamma(\lambda)$, standart gama fonksiyonunu sembolize eder. Ayrıca s , adım büyüklüğünü oluşturur. Çiçek tozlaşmasında yeni neslin hesaplanmasında Denklem 23 kullanılmaktadır.

$$x^{t+1} = x_i^t + \epsilon(x_j^t - x_k^t) \quad (23)$$

ÇTA'da başlangıçta rastgele bir çiçek popülasyonu oluşturulur ve her çiçeğin olasılık anahtarına bağlı olarak genetik operatörler uygulanır. Bu operatörler, çiçeklerin birbirleriyle bilgi paylaşmasını simüle eder. İteratif olarak en iyi çözümü güncelleyen algoritma, genetik çeşitlilik ve işbirliğini birleştirerek karmaşık optimizasyon problemlerine uygun çözümler üretir. Şekil 4'te çiçek tozlaşma algoritmasının sözde kodu sunulmuştur.

ÇTA Sözde Kodu

Rastgele başlangıç popülasyonunu üret. (n : Polen sayısı)

Başlangıç popülasyonu için en iyi çözümü hesapla g^*

Olasılık anahtarı $p \in [0, 1]$ oluşturun.

while ($t < \text{MaxIterasyon}$)

for $i=1:n$

if $\text{rand} < p$ (üniform dağılım)

Levy dağılımı L (Parametre sayısı kadar)

Biyotik üreme $x_i^{t+1} = x_i^t + \gamma L(\lambda)(g_* - x_i^t)$

Else

for ϵ (Üniform dağılıma göre $[0,1]$)

Rastgele j ve k çözümlerini seç

Abiyotik üreme $x_i^{t+1} = x_i^t + \epsilon(x_j^t - x_k^t)$

end if

yeni çözümü al ve kontrol et

yeni çözüm daha iyiyse popülasyonu güncelle

end for

En iyi çözümü seç g .

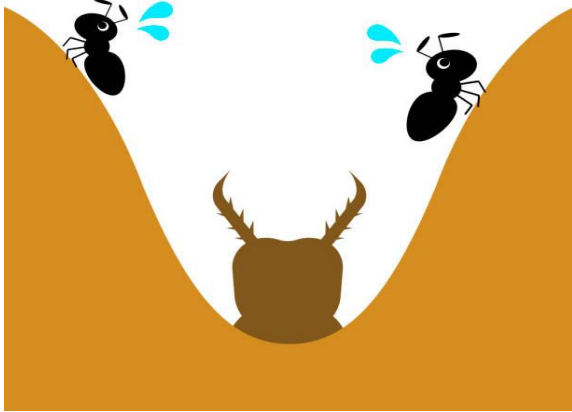
end while

Şekil 4. ÇTA sözde kodu

2.2.3 Karınca Aslanı Algoritması (KAA)

Karınca aslan algoritmasında (KAA), karınca aslanları larva evresinde kumlu topraklarda küçük bir çukur kazarak kendilerine bir tuzak oluştururlar. Karınca aslanı, tuzak

çukurunun dibine gömüldükten sonra, bir avcı olarak bekleyişe geçer. Karıncaların veya diğer küçük böceklerin tuzaklara düşmesi sonrasında, çıkışı engellemek için kum fırlatır ve böceği çukurun dibine çeker (Mirjalili 2015b). Bu avlanma mekanizması doğadan ilham alınmış ve bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Bu avlanma stratejisi Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Karınca aslanı avlanma stratejisi (Mirjalili 2015b)

Karınca aslanının avlanma mekanizmasına ait matematiksel model Denklem 24'te gösterilmiştir.

$$X(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \text{cumsum}(2r(t_1) - 1) \\ \text{cumsum}(2r(t_2) - 1) \\ \dots \\ \text{cumsum}(2r(t_n) - 1) \end{bmatrix} \quad (24)$$

Burada, n , maksimum iterasyon sayısı, t , rastgele yürüyüş adımı cumsum , kümülatif toplam ve $r(t)$, bir stokastik fonksiyonu ifade eder. Denklem 25'te matematiksel ifadesi sunulmuştur.

$$r(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{rand} > 0.5 \\ 0, & \text{if } \text{rand} \leq 0.5 \end{cases} \quad (25)$$

Rastgele yürüyüşe başlayan karıncaları arama uzayında tutmak için kullanılan matematiksel eşitlik Denklem 26'daki gibi ifade edilmektedir.

$$X_i^t = (X_i^t - a_i)(d_i^t - c_i^t)(b_i - a_i)^{-1} + c_i^t \quad (26)$$

Burada, i , değişken sayısını t , iterasyon sayısını a , minimum rastgele yürüyüşünü, b , maksimum rastgele yürüyüşünü c , d , her bir iterasyonda güncellenen karınca aslanı pozisyonlarının sırasıyla minimum ve maksimum değerlerini göstermektedir. Karınca tuzağa girdiğinde karınca aslanı onları tuzağın dibine çekmek için kum fırlatmaya başlar (Yüzgeç ve Kılıç, 2018). Bu davranışa ait matematiksel ifade Denklem 27-30 arasında gösterilmektedir.

$$c_i^t = \text{Antlion}_i^t + c^t \quad (27)$$

$$d_i^t = \text{Antlion}_i^t + d^t \quad (28)$$

$$c^t = c^t \cdot I^{-1} \quad (29)$$

$$d^t = d^t \cdot I^{-1} \quad (30)$$

Şekil 6'da verilen KAA'a ait sözde kodu, karınca aslanlarını belirli bir başlangıç pozisyonuna yerleştirir ve maliyet değerlerini hesaplar. Elit bir karınca aslanına ait pozisyon saklanır. Belirlenen maksimum iterasyona kadar, her bir karınca aslanı için seçim yapılır. Seçilen karınca aslanı etrafında rastgele yürüyüş modeli oluşturulur, bu model kullanılarak karıncanın yeni pozisyonu belirlenir. Eğer karınca arama uzayı dışında ise, pozisyonu rastgele bir konuma atanır. Ardından, karınca aslanlarının maliyet değerleri hesaplanır ve her bir karınca aslanı için, eğer karıncanın maliyeti fonksiyon değeri daha iyi ise, karınca aslanı yerini ve pozisyonunu günceller. Elit karınca aslanı da güncellenir ve iterasyon nesiller boyunca devam eder. Bu şekilde, KAA algoritması, karınca aslanlarının etkileşimli bir şekilde pozisyonlarını güncelleyerek optimizasyon problemlerini çözer.

KAA Sözde Kodu

```

Karınca aslanları başlangıç pozisyonu belirle
Karınca aslanları maliyet değerleri hesapla
Elit karınca aslanı ve pozisyonu sakla
while (iterasyon < maksimum iterasyon)
  for (her bir karınca aslanı için)
    Karınca aslanı seçimi
    Elit karınca aslanı etrafında rastgele yürüyüş modeli
    Seçilen karınca aslanı etrafında karıncanın rastgele yürüyüş
    modelinin çıkarılması
    Rastgele yürüyüş modelinin normalize edilmesi
    Karıncanın pozisyonun belirleme
    if Karınca arama uzayı dışında ise,
      Rastgele arama uzayı içerisine at
    end if
  end for
  Karınca maliyet değerleri hesapla
  for (her bir karınca aslanı)
    if karıncanın maliyeti daha iyi ise, karınca aslanı karıncayı
    yer ve pozisyonunu karıncanınki ile güncelle.
  end if
end for
Elit karınca aslanı güncelle
end while

```

Şekil 6. KAA sözde kodu

2.2.4 Güve-Alev Algoritması (GAA)

GAA algoritması, güvelerin ışık kaynaklarının etrafında yaptığı hareketleri modellemektedir. Güveler, ışık kaynağına doğru uçarak uzaklıklarını en aza indirmeye çalışırlar. GAA algoritması bu fikri temel alır ve popülasyon içerisinde bulunan güvelerin pozisyonlarını ayarlayarak en iyi çözüme ulaşmayı hedefler (Mirjalili 2015a). Güve-alev algoritmasına ilişkin Denklemler 31-35 arasında verilmiştir.

$$M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & \dots & \dots & m_{1,d} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & \dots & \dots & m_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n,1} & m_{n,2} & \dots & \dots & m_{n,d} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$OM = \begin{bmatrix} OM_1 \\ OM_2 \\ \vdots \\ OM_n \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$F = \begin{bmatrix} F_{1,1} & F_{1,2} & \dots & \dots & F_{1,d} \\ F_{2,1} & F_{2,2} & \dots & \dots & F_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{n,1} & F_{n,2} & \dots & \dots & F_{n,d} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$OF = \begin{bmatrix} OF_1 \\ OF_2 \\ \vdots \\ OF_n \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$MFO = (I, P, T) \quad (35)$$

Burada I güvelerin ilk rastgele konumlarını, P güvelerin arama uzayındaki hareketini ve T arama sürecini bitirmeyi ifade eder. Denklem 36-37 rastgele dağılımı uygulamak için kullanılan fonksiyonu temsil eder.

$$M(i, j) = (ub(i) - lb(j)) * rand() + lb(i) \quad (36)$$

$$S(M_i, F_j) = D_i \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi t) + F_j \quad (37)$$

Burada D_i , i 'inci güve ile j 'inci alev arasındaki boşluğu (yani, $D_i = |F_j - M_i|$), b , logaritmik spiralin şeklini tanımlayan bir sabiti ve t , $[-1, 1]$ arasında rastgele bir sayıyı belirtir.

Şekil 7'de verilen GAA sözde kodu, güve M_i 'nin başlangıç konumunu rastgele belirler ve uygunluk fonksiyonunu hesaplar. Ardından, belirli bir maksimum iterasyona kadar M_i 'nin konumunu günceller ve Denklem 36'yı kullanarak alev sayısını hesaplar. İlk iterasyonda, sıralama işlemleri F ve OF matrislerini hesaplamak için kullanılır. Her iterasyonda, rastgele seçilen r ve t değerleri ile Denklem 36 ve 37 kullanılarak D ve $M(i, j)$ değerleri güncellenir. En iyi çözüm, iterasyonlar tamamlandığında yazdırılır.

GAA Sözde Kodu

```
Güve Alevi için parametreleri ayarla
Güve  $M_i$  konumunu rastgele başlat
for  $i = 1$ 'den  $n$ 'ye kadar
     $f_i$  için uygunluk fonksiyonunu hesaplayın
end for
while iterasyon < Max_iter et.
     $M_i$ 'nin konumunu güncelle
    Denklemi (36) kullanarak alev sayısını hesaplayın.
     $f_i$  için uygunluk fonksiyonunu değerlendirin
    if yineleme == 1 ise
         $F = \text{sıralama}(M)$  ve  $OF = \text{sıralama}(OM)$ 
    else
         $F = \text{sıralama}(M_{i-1}, M_i)$  ve  $OF = \text{sıralama}(M_{i-1}, M_i)$ 
    end if
    for  $i = 1$ 'den  $n$ 'ye kadar
        for  $j = 1$ 'den  $d$ 'ye itere et.
             $r$  ve  $t$  değerlerini güncelle.
        end for
        Denklemi (36) ile  $D$ 'nin değerini karşılık gelen güveye göre hesapla.
        Denklem (37)'i ile  $M(i, j)$  saygısını karşılık gelen güveye güncelle.
    end for
end while
En iyi çözümü yazdırın
```

Şekil 7. GAA sözde kodu

2.2.5 Halat Çekme Optimizasyonu (HÇA)

Halat çekme algoritması (HÇA), iki rakip takımın halatın zıt uçlarını çekmesini modellemektedir. Oyunun temel kuralı, takımların rakibi belirli bir mesafeye kadar kendi tarafına çekmesini içerir. İki takım arasında oynanmakla birlikte takımların eşit sayıda oyuncusu olur (Kaveh ve Bakhshpoori 2021). Bu yarışmanın gözlemlenmesi ile HÇA algoritması önerilmiş ve çeşitli problemlerin çözümünde başarı ile uygulanmıştır. Şekil 8'de çekişmede yarışan takımlardan biri gösterilmektedir.



Şekil 8. Halat çekmede yarışan bir takım (Anonim)

HÇA algoritmasında bileşke kuvvet Denklem 38'deki gibi hesaplanabilir.

$$F_r = F_p - W_i \mu_k \quad (38)$$

Sonuç olarak, Newton'un ikinci yasasına göre, i nesnesi, j nesnesine doğru ivmelenir. Bu durumda Matematiksel ifade Denklem 39'daki gibidir.

$$a = \frac{F_r}{(W_i/g)} \quad (39)$$

i nesnesi sıfır hızdan başladığı için, yeni konumu Denklem 40'da belirlenir:

$$X_i^{yeni} = \frac{1}{2} a t^2 + X_i^{eski} \quad (40)$$

$$x_{ij}^0 = x_{j,min} + rand(x_{j,max} - x_{j,min}) j = 1, 2, \dots, n \quad (41)$$

Denklem 41'de x_{ij}^0 , i 'inci aday çözümün, j 'inci değişkeninin başlangıç değeridir. $x_{j,max}$ ve $x_{j,min}$ sırasıyla j 'inci değişken için izin verilen maksimum ve minimum değerlerdir. $rand [0, 1]$ aralığındaki tekdüze bir dağılımdan rastgele bir sayıyı göstermektedir. Şekil 9'da HÇA'nın sözde kodu verilmiştir. Başlangıçta belirlenen parametrelerle bir popülasyon oluşturup, bu popülasyon içindeki aday çözümleri bir lige yerleştirerek başlar. Amaç

fonksiyonları değerlendirilir ve ligdeki takımlar arasında ağırlık tabanlı bir rekabet gerçekleşir. Lig içinde takımlar arasındaki yer değiştirme işlemleri sonucunda elde edilen toplam yer değiştirmeler ve son konumlar belirlenir. Yan kısıtlamalar kullanılarak değişkenler yeniden oluşturulur. Bu adımlar sonlandırma koşulu karşılanana kadar tekrarlanır, böylece algoritma popülasyonu optimize eder ve problem çözümünü geliştirir.

```

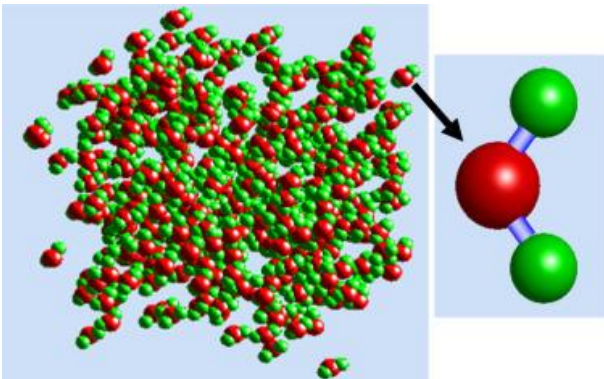
HÇA Sözde Kodu
Parametreleri ayarla
N rastgele aday çözümden oluşan bir popülasyonu seç.
Tüm rastgele aday çözümlerini kaydederek ligi başlat.
while (sonlandırma koşulu karşılanmadı)
  Aday çözümler için amaç fonksiyonu değerlerini değerlendir.
  Yeni çözümleri sıralayın ve ligi güncelle.
   $W_i$  ligindeki takımların ağırlıkları ( $X_j$ )'e tanımla.
  for i takımı için
    for j takımı için
      if ( $W_i < W_j$ )
        i takımını j takımına doğru hareket ettir.
      end if
    end for
  Takımın toplam yer değiştirmesini belirle.
  Takımın son konumunu belirle.
Değişkenleri yeniden oluşturmak için yan kısıtlama işlemini uygula
end for
end while
end

```

Şekil 9. HÇA sözde kodu

2.2.6 Atom Arama Optimizasyonu (AAA)

AAA, moleküler düzeyde atomların dinamik davranışından ilham alır ve arama uzayındaki her bir çözümü, o çözümü temsil eden atomun konumu ve kütlesi ile belirler. Daha iyi bir çözüm, daha ağır bir atomla temsil edilirken, daha kötü bir çözüm daha hafif bir atomla temsil edilir. Bu şekilde, AAA doğal seçim benzeri bir evrim süreci uygular ve daha iyi sonuçlar için ağır atomları tercih eder. Atomlar kovalent bağlarla birleşerek molekülleri oluşturur. Atomların kütlesi ve hacmi vardır ve birbirleriyle etkileşim içindedirler. Bu etkileşim kuvvetleri, atomlar arasındaki mesafelere bağlı olarak çekme veya itme şeklinde gerçekleşir (Zhao vd. 2019). Şekil 10'da atom arama süreci gösterilmektedir.



Şekil 10. Atom arama süreci (Zhao vd. 2019)

Atom arama algoritması temelde Newton'un ikinci hareket yasasını kullanır. Denklem 42'de bu algoritmanın temel aldığı yasanın genel bir formu bulunmaktadır. Bu denklemde F_i , atom i 'nin, G_i üzerindeki etkileşiminin bileşke kuvvetidir. Atom i , m_i üzerindeki kısıtlayıcı kuvvetin bileşke kuvvetidir, a_i , i atomunun ivmesidir.

$$F_i + G_i = m_i a_i, \quad (42)$$

Şekil 11'de sunulan AAA sözde kodu, bir dizi X atomunu ve onların hızlarını rastgele başlatır ve başlangıçta Fit_{Best} değerini sonsuz olarak atar. Durdurma kriteri karşılanana kadar, her bir X atomu için uygunluk değeri hesaplanır ve bu değer Fit_{Best} 'ten küçükse, Fit_{Best} ve X_{Best} güncellenir. Ardından, kütleyi ilgili denklemler kullanarak hesaplar ve her atom için belirlenen komşularını seçer. Etkileşim ve kısıtlama kuvvetleri hesaplanarak ivme elde edilir. Hız ve konum güncellemeleri yapılır. En sonunda, şu ana kadar bulunan en iyi çözüm X_{Best} bulunur.

```

AAA Sözde Kodu
Bir dizi  $X$  atomunu (çözümler) ve bunların  $v$  hızlarını rastgele başlat.
 $Fit_{Best} = \text{Inf}$  atama yap
While Durdurma kriteri karşılanmadığında
  Her  $X_i$  atomu için şunu yap
    Uygunluk değerini hesaplay
    if  $Fit_i < Fit_{Best}$  ise
       $Fit_{Best} = Fit_i$ ;
       $X_{Best} = X_i$ ;
    end if
  Kütleyi ilgili denklemleri kullanarak hesapla.
   $K$  komşusunu belirle.
  Sırasıyla etkileşim kuvveti  $F_i$  ve kısıtlama kuvveti  $G_i$ 'yi hesapla.
  İvmeyi hesapla.
  Hızı güncelle.
  Konumu güncelle;
end for
end while
Şu ana kadarki en iyi çözümü bul  $X_{Best}$ 

```

Şekil 11. AAA sözde kodu

2.2.7 Beyin Fırtınası Optimizasyonu (BFA)

Beyin fırtınası optimizasyonu algoritması (BFA), insanların beyin fırtınası sürecindeki kolektif davranışını taklit eden bir algoritmadır. BFA, arama alanını azaltmak için kullanılan çeşitli çözümler önermektedir. Tüm çözümler sonunda birkaç küme oluşturacak şekilde gruplandırılır ve bu kümeler bir sorunun yerel optimumlarını temsil eder. BFA, en iyi uygunluk değerlerine sahip çözümleri içeren bir alanın bilgisini tutar ve bu bilgi kümeler arasında yayılır. Algoritma keşif yapmak için ilk önce karar uzayında dolaşacak ve iterasyonlar ilerledikçe keşif ve sömürü arasında bir denge durumu oluşturacaktır (Shi 2011). Denklem 43 BFA algoritmasına ilişkin genel ifadeyi göstermektedir.

$$X' = X_s + \xi(t). N(0,1) \quad (43)$$

Denklem 43'te X' , yeni bir bireyi temsil ederken X_s seçim sonucu olur. $N(0, 1)$ standart normal dağılımı temsil eder. $\xi(t)$ Denklem 44'te gösterildiği gibi adım boyutunu ayarlamak için bir işlevdir.

$$\xi(t) = \text{logsig} \left(\frac{0.5 \cdot T - t}{c} \right) \cdot U(0,1) \quad (44)$$

Denklem 44'te, aktarım işlevi olduğu yerde T ve t değerleri, sırasıyla maksimum yineleme sayısı ve geçerli yineleme sayısıdır. c , logsig 'in eğimini kontrol eden bir katsayıdır. $U(0, 1)$, 0'dan 1'e düzgün dağılımı temsil eder.

BFA Sözde Kodu
 Giriş $n, T, K, P_{rep}, P_{clus1}, P_{cen1}, P_{cen2}$ parametrelerini ayarla.
 Bir popülasyon oluşturmak için rastgele n adet birey oluştur.
 While $t < T$
 Popülasyonu K şekilde kümelemek için K -araç sayısını belirle.
 Popülasyonu uygunluk değerini hesapla.
 Her kategoride en iyi olanı merkez olarak seç.
 if $U(0, 1) < P_{rep}$
 Rastgele bir kategorinin merkezini rastgele oluşturulmuş bir bireyle değiştir.
 for $i=1:n$ için yap
 if $U(0, 1) < P_{clus1}$ ise
 Rastgele bir küme seç.
 if $U(0, 1) < P_{cen1}$ ise
 Merkezi X_s olarak seçin;
 else
 Bir bireyi X_s olarak rastgele seç.
 else
 İki kümeyi rastgele seç.
 if $U(0, 1) < P_c$ ise
 İki merkezi birleştir
 else
 Her kategoriden rastgele bir birey seç.
 X_s olarak iki rastgele bireyin birleşimini yap.
 Yeni birey oluştur.
 Nüfusu güncelle;
 En iyi bireyi kaydet
 $t = t + 1$;

Şekil 12. BFA sözde kodu

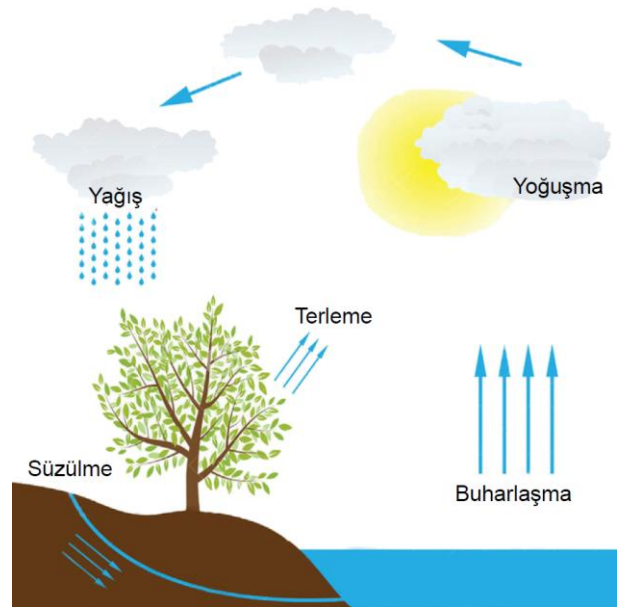
Şekil 12'de sözde kodu verilen BFA şu adımları içerir: Belirli parametreleri ayarla ve başlangıçta n adet birey içeren bir popülasyon oluştur. Belirlenen iterasyon sayısına (T) ulaşana kadar popülasyonu belirli bir sayıda (K) kümeye ayırır, uygunluk değerlerini hesaplar ve her kategoride en iyi olanları merkez olarak seçer. Eğer belirli bir olasılık (P_{rep}) altında ise, rastgele bir kategorinin merkezini başka bir rastgele birey ile değiştir. Her birey için, belirlenen olasılıklara göre kümelendirme ve merkez değiştirme işlemlerini uygular. Yeni bireyler oluşturarak popülasyonu günceller.

2.2.8 Su Döngüsü Algoritması (SDA)

Bu algoritma, gerçek dünyada nehirlerin oluşumundan esinlenerek tasarlanmıştır. Nehirler, yüksek rakımlardaki kar ve buzulların erimesiyle oluşur ve denize doğru akarlar. Suyun buharlaşması ve atmosfere karışması

sonucunda oluşan bulutlar ise yağmur ya da diğer şekillerde yeryüzüne geri döner. SDA'da, rastgele oluşturulan bir popülasyon yağmur damlalarını temsil eder. Her bir yağmur damlası, bir dizi tasarım veya karar değişkenini içeren bir bireydir. En iyi birey, belirli bir problemin en uygun çözümünü temsil eden "deniz" olarak seçilir. (Eskandar vd. 2012). Şekil 13 su döngüsünü temsili olarak göstermektedir. Denklem 45'te yağmur damlacıklarının temsili olarak matris formu bulunmaktadır.

$$N_{var} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N] \quad (45)$$



Şekil 13. Su döngüsü (Eskandar vd. 2012)

Algoritmanın başlayabilmesi için $X = N_{pop} \times N_{var}$ boyutunda bir yağmur damlası popülasyonu oluşturulur. Bu nedenle, rastgele üretilen X matrisi Denklem 46'da verilmiştir:

$$X = \begin{bmatrix} YD_1 \\ YD_2 \\ YD_3 \\ \vdots \\ YD_{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$= \begin{bmatrix} X_1^1 & X_2^1 & X_3^1 & \dots & X_{N_{var}}^1 \\ X_1^2 & X_2^2 & X_3^2 & \dots & X_{N_{var}}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1^{N_{pop}} & X_2^{N_{pop}} & X_3^{N_{pop}} & \dots & X_{N_{var}}^{N_{pop}} \end{bmatrix}$$

Karar değişkeni değerlerinin (X_1, X_2, \dots, X_{var}) her biri başlangıç noktası olarak gösterilebilir. Bir damlanın maliyeti en düşük değeri temsil eder. Buna göre, verilen denklemde N_{sr} , nehir sayısını ve denizin toplam değerini ifade eder. Geri kalan değerler ise yağmur damlalarının

nehirlerde veya doğrudan denizde biriktirebileceği değerlerden oluşur (Gür, 2020, s.17). Sonuç olarak su zerreciklerin birleşmesi suyu büyütür. Buharlaşma ve erozyon ise suyun küçülmesine sebep olur. Denklem 47 maliyet fonksiyonunu gösterir.

$$C_i = f(x_1^i, x_2^i, x_3^i, \dots, x_{N_{pop}}^i) \quad (47)$$

Burada $i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop}$ olarak ifade edilir. Bu durumda yeni eşitlikler Denklem 48 ve 49'da verilmiştir.

$$N_{sr} = \text{Nehir Sayısı} + 1 \quad (48)$$

$$N_{yd} = N_{pop} - N_{sr} \quad (49)$$

Akışkanlık hızına bağlı olarak damlaların nehirlere ve denize akışının modeli Denklem 50'de verilmiştir. NS_n , belirli nehirlere veya denize akan akarsuların sayısını oluşturur.

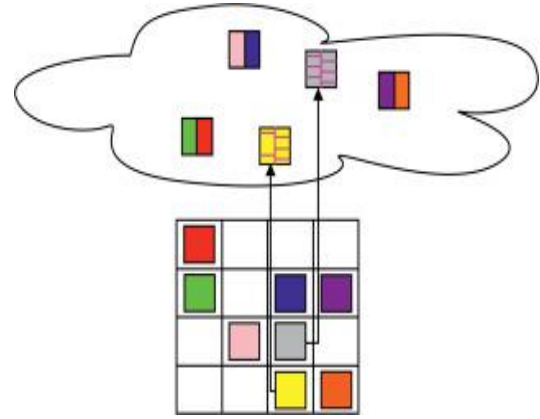
$$NS_n = \text{yuvarla} \left\{ \frac{\text{Maliyet}_n}{\sum_{i=1}^{N_{sr}} \text{Maliyet}_i} XN_{yd} \right\} \quad (50)$$

Şekil 14'te genel olarak SDA'nın sözde kodu verilmiştir. Süreç öncelikle başlangıç parametrelerinin seçilmesi ile başlar. Rastgele bir başlangıç popülasyonu oluşturulur ve yağmur damlaları, dereler, nehirler ve deniz gibi akışlar simüle edilir. Her yağmur damlasının değeri (maliyeti) hesaplanır ve akış yoğunluğu belirlenir. Nehirler ve denizler arasındaki akışlar hesaplanarak en yüksek yokuşa doğru olan deniz'e akarlar. Her akışın konumu, en iyi çözümü temsil eden bir akış ile değiştirilir. Eğer bir nehir, denizden daha iyi bir çözüm bulursa, nehrin konumu denizle değiştirilir. Buharlaşma durumu kontrol edilir ve bu durum sağlanıyorsa yağmurlama işlemi yapılır. Kullanıcı tanımlı bir parametre olan d_{max} değeri azaltılır ve yakınsama kriterleri kontrol edilir. Durdurma kriteri karşılanırsa, algoritma durur; aksi takdirde, başlangıçtaki popülasyon oluşturulma aşamasına geri dönlür. Bu adımlar, belirli bir yakınsama durumuna ulaşılan kadar tekrarlanır.

SDA Sözde Kodu

WCA'nın başlangıç parametreleri seçilir.
Rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulur.
İlk akışlar (yağmur damlaları), dereler, nehirler ve deniz oluşturulur.
Her bir yağmur damlasının değeri (maliyeti) hesaplanır.
Nehirler ve deniz için akış yoğunluğunu belirlenir.
Akış değeri hesaplanır..
Nehirler, en yokuşa aşağı yer olan Deniz (Mutlak Hedef)'e akar.
Nehir konumlarını en iyi çözümü veren bir akımla değiştirilir.
Eğer bir nehir denizden daha iyi bir çözüm bulursa, nehrin konumu denizle değiştirilir.
Buharlaşma durumu kontrol edilir
Buharlaşma koşulu sağlanmışsa, yağmurlama işlemi yapılır.
Kullanıcı tanımlı parametre olan d_{max} değeri azaltılır.
Yakınsama kriterleri kontrol edilir.
Durdurma kriteri karşılanırsa, algoritma durur, aksi takdirde 5. adıma dönlür.

Şekil 14. SDA sözde kodu



Şekil 15. Mercan resifleri algoritmasının temel süreci (Yang vd. 2018)

2.2.9 Mercan Resifleri Algoritması (MRA)

Mercan resifleri algoritması (MRA), belirli bir doğal ekosistemin davranışının yapay simülasyonunu deneyen biyolojik esinli bir evrimsel algoritmadır. MRA algoritması, farklı çözümleri kodlayan bireyler, popülasyonu oluşturmak ile başlar ve bu çözümler kare bir ızgarada (resif) bulunur. Algoritma, mercan üreme sürecini (cinsel ve eşeysiz üreme operatörleri uygulanır) ve uzay için bir mücadelenin meydana geldiği mercan resifleri oluşum sürecini simüle eder (Salcedo vd. 2014). Şekil 15'te mercan resiflerinde mercanın çoğalma sürecini göstermektedir.

Mercan resifleri algoritması, fraktal geometriyi kullanarak doğal mercan resiflerinin karmaşık yapısını modeller. Algoritma, mercan resiflerinin büyümesini ve gelişmesini simüle etmek için Denklem 51'i kullanılır.

$$dN/dt = rN(1 - N/K) \quad (51)$$

Denklem, klasik lojistik denkleminin türetilmiştir ve mercan kolonilerinin zaman içinde nasıl büyüdüğünü göstermektedir.

$$dD/dt = -mD \quad (52)$$

Denklem 52, ölü mercan kolonilerinin zaman içinde nasıl arttığını gösterir. Bu denklem ayrıca ölü koloni sayısının (D) ölüm hızı (m) ile orantılı olduğunu gösterir.

$$dS/dt = cD \quad (53)$$

Burada S , mercan resiflerinde biriken tortu miktarını, c ise mercan kolonilerinin tortulaşma oranını ifade etmektedir. Şekil 16'da MRA'nın sözde kodu sunulmuştur.

```

MRA Sözde Kodu
Başlangıç parametrelerini  $N, M, F_a, F_b, F_d, P_a, \gamma, k_a, n, k, N_{gen}$  ayarla
Tüm çözüm programları için çözüm alanı araştır
Mercek resiflerini konumlarını belirle
Mercek popülasyonlarını hesapla  $\Omega$ ;
for  $c = 1$  için  $2; c < n; c \neq N_{gen}$ 
  Yayın yumurtlaması (dış cinsel üreme);
  Kuluçkaya yatma (içsel cinsel üreme);
  Larva ortamını belirle
  Eşysiz üreme değerini hesapla.
  Larva ortamı;
  if ( $c \neq N_{gen}$ ) ise
    Yağma mekanizması kullanarak hesaplama yap.
  end
end

```

Şekil 16. MRA sözde kodu

2.2.10 Yaşam Seçim Tabanlı Algoritma (YSTA)

YSTA algoritması, insanın yaşam döngüsünü ve çalışma etiğini inceleyerek geliştirilen bir algoritmadır. İnsanların doğadan ilham alarak yeni şeyler öğrendiği ve diğer türlerden öğrenme kabiliyetine sahip oldukları düşünülerek hayatta kalma odaklı çalışmalar yürüttükleri esasına dayanarak ortaya konmuştur (Khatrı vd. 2020). İnsan her zaman bir şeylerden ilham alır, ya kendisi gibi birini, bir ünlüyü ya da arkadaşlarını takip eder. Kişi, hedefi gerçekleştirmek için en iyi kişilerden faydalı bir şeyler almaya çalışır ve üstün kişinin verimliliğini gözlemleyerek bir desen türetir. LCBO algoritması, insan düşünme süreçlerinden ve karar verme şekillerinden etkilenmiştir. Aynı zamanda Jaya optimizasyon tekniğinden de ilham almıştır. Jaya 'da sadece en iyi ve en kötü ajanlar mevcut ajani etkilerken, LCBO'nun önerilen optimizasyonu belirli bir isteğe bağlı dalı içerir ve en iyi arama ajanları da mevcut ajani etkiler. Bu da arama alanının daha iyi bir şekilde kullanılmasını sağlar. Denklem 54'te $U(x)$, seçim x 'in toplam faydasını, w_i , i . seçeneğin önemini gösteren ağırlık, $u_i(x_i)$, i . seçeneğin faydası ve n , olası seçeneklerin sayısını göstermektedir.

$$U(x) = \sum_{\{i=1\}}^n w_i u_i(x_i) \quad (54)$$

Denklem 55 ise bir seçimin olası sonuçlarını hesaplar. Bu denklemde $P(y|x)$, seçim x 'i yaptıktan sonra y sonucunu elde etme olasılığı $p_i(x_i)$ ise seçim x_i yaptıktan sonra y sonucunu elde etme olasılığını ifade etmektedir.

$$P(y|x) = \sum_{\{i=1\}}^n p_i(x_i) \quad (55)$$

YSTA, belirli bir insan popülasyonu ve r_1 değeri ile başlar. Uygunluk değerlerini hesaplar ve popülasyonu uygunluk değerlerine göre sıralar. Belirlenen bir değişim sayısına ulaşana kadar şu adımları tekrarlar: Her birey için rastgele bir değer oluşturur ve bu değere göre mevcut arama aracısını günceller. Eğer oluşturulan rastgele değer belirli

bir aralığın dışında ise, Denklem 54 ve 55'i kullanarak güncelleme yapar. Yeni arama aracısının uygunluk değerini hesaplar ve eğer bu değer önceki uygunluk değerinden daha iyi ise arama aracısının konumunu ve uygunluk değerini günceller. Güncellenen popülasyonu sıralar ve güncel değişimi artırarak iterasyonu devam ettirir. Sonunda, başlangıçtaki popülasyonun en iyisini seçerek algoritmayı tamamlar. Şekil 17 YSTA'ya ait sözde kodu göstermektedir.

```

YSTA Sözde Kodu
İnsan popülasyonunu ve  $r_1$ 'i değerini belirle
Uygunluk değerlerini hesaplayıp ve popülasyonu sırala
While (güncel değişim < değişim sayısı)
  for  $i=1:n$  için yap
     $z = \text{Rand}()$ 
    if ( $z > 0,875$ )
      Mevcut arama aracısını güncelle.
    else ( $z < 0,70$ )
      Denklem 54 ve 55 kullanarak güncelleme yap.
    else
      Mevcut arama aracısını güncelle.
    end if
    Arama aracısının uygunluk değerini hesapla
    if (yeni uygunluk değeri önceki uygunluk değerinden daha iyiyse)
      Arama aracısı konumunu ve uygunluk değerini güncelle
    end if
  end if
   $X = \text{sıralama}(X)$ 
  Güncel değişim = Güncel değişim + 1
end while
 $X_i$  e geri dön

```

Şekil 17. YSTA sözde kodu

2.3.Sistem Tanımlama

Kontrol mühendisliğinin alt bir alanı olarak ifade edilen sistem tanımlama, temel olarak bir sistemin giriş/çıkış verilerine bağlı olarak matematiksel model elde etme sürecidir (Çelikel ve Gündoğdu 2020, Fidan vd. 2022, Zaloğlu vd. 2023). Sistemlerin matematiksel modellerini elde etmek için kullanılan çeşitli yöntemler bulunmakla birlikte en yaygın kullanılanlardan biri siyah kutu modellemidir. Siyah kutu sistem tanımlama modelinde, sisteme ait tanımlanmış bir matematiksel model yoktur. Bu yöntemde sistemden toplanan giriş/çıkış verileri kullanılarak model elde edilir. Kara kutu sistem tanımlama Denklem 56'da sunulmuştur.

$$y(t) = f[y_1(t-1), \dots, y_1(t-n_{y_1}), \dots, y_r(t-1), \dots, y_r(t-n_{y_r}), u_1(t-1), \dots, u_1(t-n_{u_1}), \dots, u_m(t-1), \dots, u_m(t-n_{u_m}), e_1(t-1), \dots, e_1(t-n_{e_1}), \dots, e_r(t-1), \dots, e_r(t-n_{e_r})] \quad (56)$$

Denklem 56'da $y(t)$ çıkış sinyalini, $u(t)$ giriş sinyalini, $e(t)$ ise hata sinyalini ifade etmektedir.

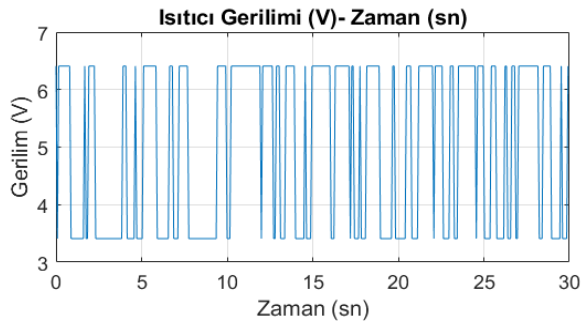
2.4. Ön Analiz

Sistem tanımlama algoritmalarının çalıştırıldığı PC 2.5 GHz hıza sahip, 6 çekirdeği olan (Intel Core i5 CPU) işlemci, 6 Gb RAM ve 1 TB özelliğindedir.

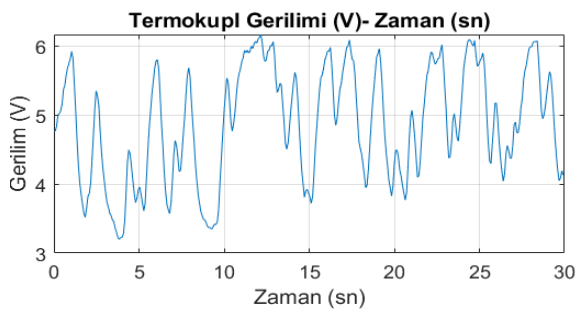


Şekil 18. Hava ısıtma deney seti görünümü

Algoritmaların geliştirilmesi için Python 3.8 altında Pandas 1.4.2, Mealy 2.5.0 ve Control 0.9.2 kütüphaneleri kullanılmıştır. Veri seti için laboratuvar ölçüğünde hava ısıtma deney setinden toplanan veriler kullanılmıştır (Kumbasar vd. 2011). Bu setin görünümü Şekil 18'de verilmiştir. Hava akışı ve referans sıcaklık değerlerinin ölçümüyle elde edilen 1000 adet veri, 0.08 saniyelik bir zaman aralığında toplanmıştır. Deney düzeneğinde ısıtıcıya uygulanan gerilim ve hava sıcaklık ölçüm sensörü (termokupl) gerilimi sırasıyla Şekil 19-a ve Şekil 19-b'de gösterilmiştir.



a) Isıtıcı Gerilimi



b) Termokupl Gerilimi

Şekil 19. Giriş ve çıkış gerilim sinyalleri

3.BULGULAR

Bu çalışmada önerilen algoritmalar, rastgele başlangıç değerlerine bağlı olarak çalıştığı için çözümler her seferinde aynı başarıyla hesaplanamayabilir. Bu sebeple algoritmalar bağımsız olarak 100'er defa çalıştırılmış ve performanslar gösterilmiştir. Ayrıca alt bölümlerde çeşitli sınırlılıklar ele alınarak performans üzerine etkisi de sunulmuştur. Çizelge 1'de algoritma isimleri, döngü sayıları, popülasyon sayısı ve algoritmalara ait diğer parametreler sunulmuştur. Bu algoritmalar çalıştırılırken farklı sınırlılık değerleri için iterasyon sayısı değişmektedir. Bu sebeple Çizelge 1'de maksimum iterasyon sayısı sunulmuştur. Çizelge 1'de diğer parametrelerin seçiminde ise mealy kütüphanesi içinde bulunan MS algoritmalarının her birine ait ön tanımlı değerler olduğu gibi kullanılmıştır. Topsis yönteminde, normalize edilmiş karar matrisinde her bir kriterin ağırlığını belirlemek için normalizasyon işlemi uygulanır. Karar matrisindeki değerler, bir ölçeklendirme yöntemi (örneğin, 0 ile 1 arasına normalleştirme) kullanılarak normalize edilir. Bu adım, farklı ölçeklerdeki kriterlerin karşılaştırılabilir hale getirilmesini sağlar. Bu makale çalışmasında kriterlerin seçimi ve normalizasyonunda performans (R^2), çözüm zamanı ve yükselme zamanı parametreleri dikkate alınmıştır. Bu parametrelerin değerleri sırasıyla 0.5, 0.25 ve 0.25 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin seçiminde sonuca doğrudan etki ettiği için araştırmacılar tarafından R^2 en önemli değer olarak belirlenmiştir. Çözüm zamanı ve yükselme zamanının etkisinin benzer olacağı düşünülmüştür.

Çizelge 1. Algoritmalara ilişkin parametreler

Algoritma İsimleri	Döngü Sayısı	Popülasyon Sayısı	Diğer Parametreler
AEO	10000	100	-
ALO	10000	100	-
ASO	10000	100	$\alpha = 10, \beta = 0.4$
BSO	10000	100	$m_c = 5, p_1 = 0.5, p_2 = 0.5,$ $p_3 = 0.5, p_4 = 0.5$
CRO	10000	100	$p_o = 0.4, F_b = 0.4,$ $F_a = 0.1,$ $F_d = 0.1 GCR = 0.1,$ $\gamma_{max} = 0.2, n_{trials} = 3$
LCO	10000	100	$r_1 = 2.35$
FPA	10000	100	$p_s = 0.8, levy_m = 0.1$
MFO	10000	100	-
TWO	10000	100	-
WCA	10000	100	$N_{sr} = 4, w_c = 2.0,$ $d_{max} = 1e - 6$

3.1 Güvenilirlik Analizi ve Sınırlılıklar

Performansa odaklanan birçok MS algoritması için durdurma kriterleri önemlidir. Doğru seçilmiş durdurma kriterleri sistem modelinin elde edilmesinde mümkün olan en kısa sürede sonuca gitmeyi sağlayabilir. Özellikle sınırlı kaynaklara sahip gömülü donanımlar için kritik zaman sınır değerinin ne olduğu iyi belirlenmelidir (Ravber vd. 2022). Ancak zaman değerini kısıtlı tutmak en uygun çözümü bulmanın önünde bir engel olabilir. Bu sebeple alt bölümlerde zaman sınırlılığı, maksimum generasyon, maksimum fonksiyon hesaplama ve erken durdurma sınırlılıkları ele alınmıştır. Sunulan algoritmalar belirtilen sınırlılıklar altında incelenmiş ve veri seti için en uygun olan algoritmalar belirlenmiştir. Rastgele başlangıç değerlerine bağlı olarak çözüm üreten MS algoritmalar bir çözümde oldukça iyi sonuç üretebilirken diğer bir çözümde başarısız olabilmektedir. Bu belirsizlik önerilen algoritmaların güvenilirliğinin testini gerektirir ve iki Denklem (57-58) ile kontrol edilecektir. Bu ifadeler:

$$\frac{\sum_{i=0}^n R^2}{n} > 0.8 \quad (57)$$

$$f(x) = \begin{cases} P(0.7 x < 0.8) \leq 0.05, & x = 1 \\ P(0.7 x < 0.8) > 0.05, & x = 0 \end{cases} \quad (58)$$

Önerilen denklem 57 ve 58'e göre güvenilirliğin tanımı öncelikle ortalama R^2 değerinin 0.8'in üzerinde olmasına bağlıdır. İkinci aşamada ise tüm çözümler içinde %5'ten daha fazla sayıda değer 0.8'in altına inemeyeceği varsayımına dayanmaktadır. Bu iki varsayım kod geliştirme sürecinde bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmıştır. Bu tanımlama yapılmadığı takdirde parametre tahmininde önemli tahmin hatalarının olduğu belirlenmiştir.

3.1.1. Zaman Sınırlılığı Senaryosu

Metasezgisel algoritmalar bazen kısıtlı bir performans artışı için önemli bir zaman kaynağı harcarlar. Bununla birlikte performanstan bir miktar ödün vererek önemli bir zaman kazanmak mümkündür. Bu durumda kısıtlanmış bir zamanda önerilen algoritmaların çözüm performanslarını incelemek gereklidir. Bu sebeple algoritmaların zaman sınırlılığı altında (45 sn) bağımsız olarak 100 defa çalışması sağlanmıştır. 45 sn değerinin seçiminde kullanılan PC'nin hızı ve araştırma ekibinin problem çözümünde edindiği deneyimler dikkate alınmıştır. Elde edilen R^2 değerleri Şekil 20'de box-plot grafiği olarak sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, YEA ve YSTA algoritması 100 çözümde ortalama olarak en iyi performansa (0.951) ulaşmıştır. AAA algoritması ise en düşük performansa (0.59) erişmiştir.

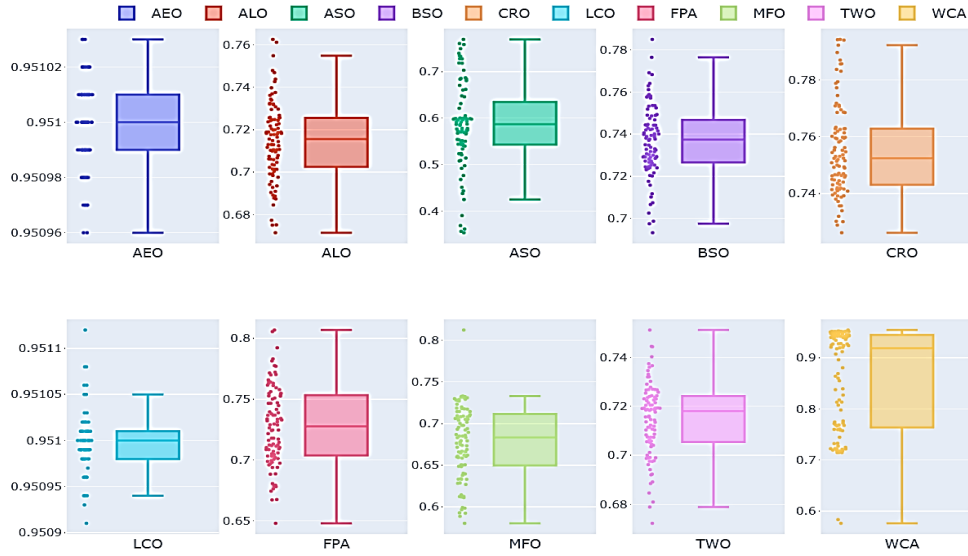
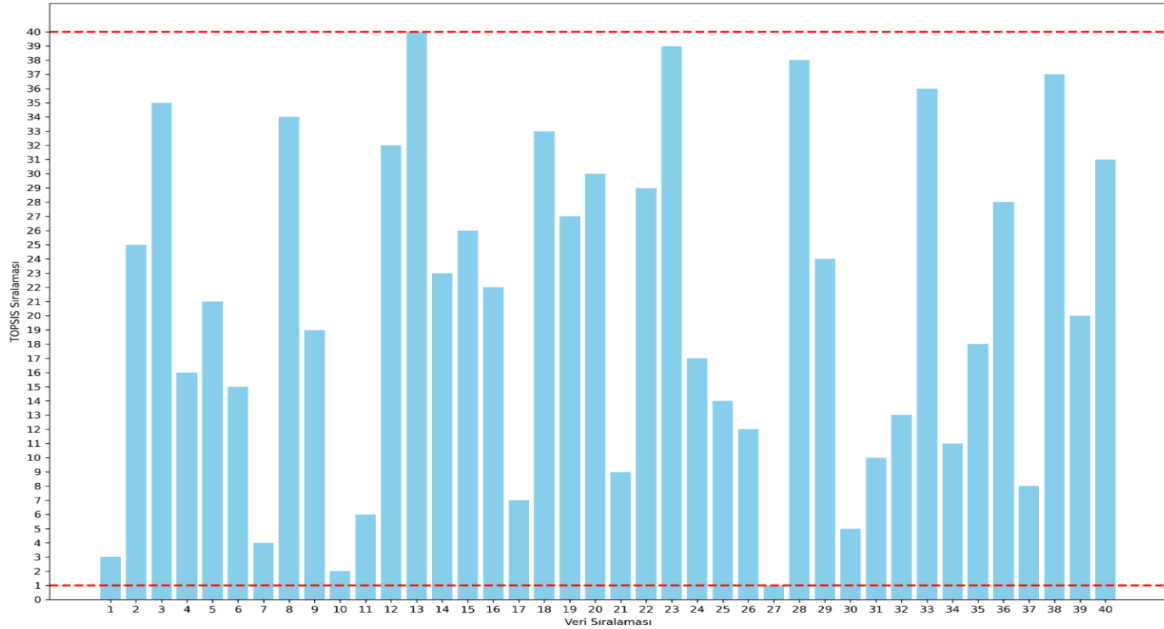


Şekil 20. Zaman sınırlılığı altında (TB-45) R^2 performansları

3.1.2. Maksimum Generasyon Sınırlılığı

Zaman kritik olmayan sistemler için maksimum generasyon (MG=30) sınırlandırma kriterini kullanmak mümkündür. Zaman sınırlılığına benzer şekilde, MG değeri PC'nin hızı dikkate alınarak 30 seçilmiştir. Şekil 21'de sunulan box-plot grafiği ve algoritmaların R^2 performans değerleri incelendiğinde YEA ve YSTA

algoritmaları 0.951 performans değerlerine ulaşmıştır. AAA algoritması en düşük R^2 ortalama değerlerine ulaşmıştır. YEA ve YSTA algoritmaları diğer algoritmalara kıyasla daha etkilidir. Ancak, diğer algoritmaların da farklı sınırlamalar altında iyi performans gösterme potansiyeli vardır. Performansı etkileyen diğer bir etkende başlangıç sınırların iyi seçilmesidir. Ancak optimal başlangıç değer seçimi başka bir çalışmanın konusudur.

Şekil 21. Maksimum generasyon (MG-30) sınırlılığında algoritmalarının R² performansı

Şekil 24. Topsis yöntemi ile yeniden sıralama işlemi

3.2. Çoklu karar verme (Topsis) sonuçları

Çizelge 2, 10 farklı MS algoritması ve 4 farklı sınırlılık için R^2 , çözüm ve yükselme zamanlarını vermektedir. Bu değerlerden R^2 'nin maksimum olması, yükselme ve çözüm zamanının ise minimum olması istenmektedir. Bu çizelge aslında Topsis yöntemi ile sıralama öncesi MS algoritmalarına ait verileri göstermek için ele alınmıştır. Bu sayede Topsis ile sıralamadan sonra hangi satırın sıralamasının nasıl değiştiği belirlenebilecektir. Şekil 24, Topsis yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çok kriterli karar verme analizinin sonuçlarını göstermektedir. Grafikte, her bir çubuk ideal çözüme göre göreceli yakınlığı temsil etmektedir. Kısa bir çubuk, ideal çözüme daha yakın olduğunu ve dolayısıyla tercih edilmesi gerektiğini gösterir ve karar vericiler için önerilen

seçenektir. Grafikteki yatay kesik çizgiler, en yüksek ve en düşük sıralamaları vurgulamak için eklenmiştir. Bu durumda Topsis sıralamasının gösterildiği y ekseninde 1. Sırada YSTA algoritması maksimum generasyon (MG) sınırlılığı altında R^2 (0.95096), çözüm zamanı (42.69 sn) ve yükselme zamanı (0.73) değerleri elde edilmiştir.

3.3. Performans İndekslerinin Karşılaştırılması

Sistem tanımlama amaçlı olarak kullanılan metasezgisel algoritmaların performans indeksleri ve elde edilen transfer fonksiyonları bu bölümde çizelgeler olarak sunulmuştur. Çizelgelerde performans indeksi olarak MAPE, MAE, MSE, R^2 ve zaman (süre) sunulmuştur. MAPE (Ortalama Mutlak Yüzde Hata), tahmin hatalarının yüzdesel ortalamasını ölçer. MAE (Ortalama Mutlak Hata),

tahmin ve gerçek değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasını ifade eder. MSE (Ortalama Kare Hatası), farkların karelerinin ortalamasını ölçer. R^2 (Performans Katsayısı), bir regresyon modelinin uyumunu ifade eder; 1'e ne kadar yakınsa, modelin daha iyi uyum sağladığını gösterir. Bu bölümde algoritmalar bağımsız olarak bir kere çalıştırılmıştır. Yani optimize edilmiş parametreler bulunmuş ve algoritma çalışmayı durdurmuştur. Çizelge 3

zaman sınırlılığı altında performans indekslerini sunmaktadır. Bağımsız olarak bir defa çalışma sonucunda YEA (0.94768), YSTA (0.95092) ve SDA (0.95029) algoritmalarının performansları oldukça yeterlidir. Ancak SDA algoritmasının Şekil 24 dikkate alındığında bağımsız olarak bir defa çalışma durumunda performansı iyi olsa bile çoklu çalıştığında performansın düşük olma ihtimali bulunmaktadır.

Çizelge 2. 10 farklı MS algoritması ve 4 farklı sınırlılık için R^2 , çözüm ve yükselme zamanı

Sıralama	Algoritma	Sınırlılık	R^2	Çözüm Zamanı	Yükselme Zamanı
1	YEA	TB	0.94768	45.81526	0.730082
2	KAA	TB	0.7045	45.13911	1.221899
3	AAA	TB	0.56406	46.2597	1.256448
4	BFA	TB	0.71945	45.6263	1.064155
5	MRA	TB	0.72777	45.32079	1.229626
6	ÇTA	TB	0.74248	46.23655	1.090785
7	YSTA	TB	0.95092	46.27365	0.731788
8	GAA	TB	0.7036	45.18044	1.658491
9	HÇA	TB	0.73306	46.4729	1.18741
10	SDA	TB	0.95029	45.82632	0.69
11	YEA	FE	0.95071	55.59337	0.711341
12	KAA	FE	0.70206	67.29051	1.408223
13	AAA	FE	0.39823	71.13545	2.191563
14	BFA	FE	0.74588	56.55411	1.347705
15	MRA	FE	0.70641	57.07968	1.2123
16	ÇTA	FE	0.7401	57.0222	1.278904
17	YSTA	FE	0.95098	55.68399	0.731269
18	GAA	FE	0.72973	56.83546	1.585394
19	HÇA	FE	0.7142	63.56779	1.240024
20	SDA	FE	0.95107	261.8676	0.730464
21	YEA	MG	0.95103	83.92427	0.649956
22	KAA	MG	0.69284	51.15	1.225706
23	AAA	MG	0.57223	54.77643	2.144938
24	BFA	MG	0.75325	42.59495	1.278513
25	MRA	MG	0.74851	24.1026	1.196992
26	ÇTA	MG	0.75624	42.6317	1.037952
27	YSTA	MG	0.95096	42.69103	0.730219
28	GAA	MG	0.59915	42.81121	2.141183
29	HÇA	MG	0.70734	49.31555	1.21763
30	SDA	MG	0.9236	43.02428	0.713384
31	YEA	ES	0.951	131.0782	0.730118
32	KAA	ES	0.74627	14.76414	1.184306
33	AAA	ES	0.49428	7.073467	1.386964
34	BFA	ES	0.81835	7.000684	1.188327
35	MRA	ES	0.67456	6.720242	0.969139
36	ÇTA	ES	0.81274	12.83776	1.809733
37	YSTA	ES	0.95092	60.12135	0.667294
38	GAA	ES	0.61392	9.734757	2.175592
39	HÇA	ES	0.70382	9.007025	1.162184
40	SDA	ES	0.951	265.0669	0.73044

MG sınırlılığında algoritma maksimum generasyon sayısına (30) ulaştığında durdurulur. Çizelge 4'te bu sınırlılık altında performans indeksleri sunulmuştur. YEA ve YSTA benzer performanslara sahip olmakla birlikte, YEA daha uzun çözüm süresine (83.92 sn) sahiptir. Performansı iyi olan algoritmalar içinde YSTA daha kısa

sürede çözüm yaptığı için daha başarılıdır. Bu noktada YEA çözüm süresi uzun olsa bile zaman kısıtlılığı altında da benzer bir performans göstermiştir. Önerilen bir diğer sınırlılık olan fonksiyon hesaplama (FE) sınırlandırma kriteri, veri setinin doğasına bağlı olarak 4000 olarak belirlenmiştir. Çizelge 5'te, FE kriteri ile optimize edilmiş

transfer fonksiyonları ve performans göstergeleri sunulmaktadır. Algoritmalar, diğer kısıtlamalar altında olduğu gibi birbirinden farklı performans göstermiştir. YEA, YSTA ve SDA algoritmaları benzer ve iyi performanslar göstermiştir. Ancak SDA algoritmasının çözüm süresi (261.87 sn), en yavaş algoritma olduğunu göstermektedir. Bu iki yöntemin optimize ettiği transfer

fonksiyonlarının katsayıları birbirlerine oldukça benzemektedir. SDA algoritmasının hesapladığı transfer fonksiyonu katsayıları YEA ve YSTA algoritmalarının hesapladığına benzemektedir. Ancak SDA algoritmasının başlangıç değerlerine bağlı olarak daha hassas olduğu ortadır. Elde edilen transfer fonksiyonlarının payda kısmı $s^2 + 6.1s + 12.9$ değerlerine yakındır.

Çizelge 3. Zaman sınırlılıkları altında performans göstergeleri ve transfer fonksiyonu

Algoritma	MAPE	MAE	MSE	R ²	Zaman	Transfer Fonksiyonu
YEA	0.0283	0.1371	0.0294	0.9477	45.82	$T_f(s) = \frac{-1.50s + 12.65}{s^2 + 6.14s + 12.95}$
KAAs	0.06798	0.33375	0.16516	0.7045	46.14	$T_f(s) = \frac{-10.81s + 97.34}{s^2 + 60.67s + 100}$
AAA	0.08282	0.39716	0.24365	0.56406	45.26	$T_f(s) = \frac{-5.03s + 74.96}{s^2 + 84.30s + 83.42}$
BFA	0.06721	0.32456	0.15681	0.71945	45.62	$T_f(s) = \frac{-7.21s + 57.30}{s^2 + 33.17s + 58.99}$
MRA	0.06597	0.31821	0.15216	0.72777	45.32	$T_f(s) = \frac{-9.97s + 73.91}{s^2 + 43.19s + 75.97}$
ÇTA	0.06345	0.30803	0.14393	0.74248	46.23	$T_f(s) = \frac{-4.90s + 35.35}{s^2 + 27.67s + 36.32}$
YSTA	0.02748	0.13216	0.02743	0.95092	46.27	$T_f(s) = \frac{-1.51s + 12.66}{s^2 + 6.16s + 12.97}$
GAA	0.06811	0.32467	0.16567	0.7036	45.18	$T_f(s) = \frac{-13.82s + 100}{s^2 + 62.52s + 100}$
HÇA	0.06519	0.3122	0.1492	0.73306	46.47	$T_f(s) = \frac{-11.08s + 97.59}{s^2 + 59.79s + 99.22}$
SDA	0.02775	0.13349	0.02779	0.95029	45.89	$T_f(s) = \frac{-3.81s + 22.63}{s^2 + 9.61s + 23.12}$

Çizelge 4. Maksimum generasyon sınırlılıkları altında performans göstergeleri ve transfer fonksiyonu

Algoritma	MAPE	MAE	MSE	R ²	Zaman	Transfer Fonksiyonu
YEA	0.0274	0.1319	0.0274	0.951	83.92	$T_f(s) = \frac{-1.49s + 12.59}{s^2 + 6.11s + 12.90}$
KAAs	0.06947	0.33863	0.17168	0.69284	51.15	$T_f(s) = \frac{-11.27s + 97.26}{s^2 + 60.41s + 100}$
AAA	0.08194	0.39324	0.23909	0.57223	54.78	$T_f(s) = \frac{-10.03s + 73.01}{s^2 + 43.02s + 72.29}$
BFA	0.06299	0.30406	0.13791	0.75325	42.59	$T_f(s) = \frac{-8.23s + 65.16}{s^2 + 38.07s + 66.84}$
MRA	0.06374	0.30694	0.14056	0.74851	24.10	$T_f(s) = \frac{-8.12s + 48.88}{s^2 + 26.57s + 50.73}$
ÇTA	0.06127	0.29784	0.13624	0.75624	42.63	$T_f(s) = \frac{-6.22s + 44.19}{s^2 + 28.53s + 46.17}$
YSTA	0.02747	0.13212	0.02741	0.95096	42.69	$T_f(s) = \frac{-1.50s + 12.60}{s^2 + 6.12s + 12.90}$
GAA	0.07765	0.38444	0.22404	0.59915	42.81	$T_f(s) = \frac{-10.15s + 78.31}{s^2 + 38.59s + 86.02}$
HÇA	0.06818	0.33059	0.16357	0.70734	49.32	$T_f(s) = \frac{-8.57s + 85.21}{s^2 + 49.71s + 83.37}$
SDA	0.03598	0.16954	0.0427	0.9236	43.02	$T_f(s) = \frac{-7.30s + 47.53}{s^2 + 27.49s + 48.61}$

Erken durdurma sınırlılık kriteri global çözümün azalmaması durumunda algoritmanın durdurulmasını sağlar. Bu yöntem aslında çözüm için algoritmalara yeterince zaman sunmaktadır. Çizelge 5'te 10 farklı algoritma için tahmin edilen transfer fonksiyonlarının MAE, MAPE, MSE ve R² değerleri verilmiştir. Durdurma kriter değeri 3 olarak seçildiği zaman YEA algoritmasının performansı yeterli olmakla birlikte çözüm zamanı (131.08 sn) artmıştır. Performanslar dikkate alındığında YEA, YSTA ve SDA yine en yüksek değerlere ulaşmıştır.

Ancak zaman sınırlılığı kriteri de dikkate alındığında YSTA algoritması performansı ile öne çıkmaktadır. AAA ve BFA ise nispeten başarısız performanslar göstermişlerdir. Şekil 14 ve Çizelge 5, 10 farklı algoritma ve 4 farklı sınırlılık için algoritmaların performansını sunmaktadır. Çizelge 5'te YEA ve YSTA algoritmasının başarılı olduğu açıktır ancak Topsis sonuçlarına göre YSTA algoritması 1. Sırada gözükmemektedir. Topsis burada 3 farklı kriter dikkate alınarak kazanana belirlendiği için öne çıkmaktadır. Çizelge 5'te ise sadece R² değerlendirilmesi yapılmaktadır.

Çizelge 5. Fonksiyon hesaplama sınırlılıkları altında performans göstergeleri ve transfer fonksiyonu

Algoritma	MAPE	MAE	MSE	R ²	Zaman	Transfer Fonksiyonu
YEA	0.02755	0.13246	0.02755	0.95071	55.59	$T_f(s) = \frac{-1.49s + 12.61}{s^2 + 6.12s + 12.91}$
KAA	0.06928	0.33421	0.16652	0.70206	67.29	$T_f(s) = \frac{-13.31s + 97.59}{s^2 + 60.55s + 100}$
AAA	0.1001	0.47568	0.33634	0.39823	71.14	$T_f(s) = \frac{-19.08s + 100}{s^2 + 100s + 100}$
BFA	0.06411	0.30883	0.14203	0.74588	56.55	$T_f(s) = \frac{-8.48s + 67.20}{s^2 + 39.33s + 68.92}$
MRA	0.06847	0.33061	0.16409	0.70641	57.08	$T_f(s) = \frac{-9.33s + 80.51}{s^2 + 46.26s + 82.73}$
ÇTA	0.06534	0.31326	0.14526	0.7401	57.02	$T_f(s) = \frac{-9.43s + 61.27}{s^2 + 37.17s + 61.74}$
YSTA	0.02746	0.13206	0.0274	0.95098	55.68	$T_f(s) = \frac{-1.49s + 12.60}{s^2 + 6.11s + 12.91}$
GAA	0.06526	0.31034	0.15106	0.72973	56.84	$T_f(s) = \frac{-10.21s + 100}{s^2 + 80.48s + 100}$
HÇA	0.06798	0.32737	0.15974	0.7142	63.57	$T_f(s) = \frac{-13.99s + 95.31}{s^2 + 59.27s + 97.75}$
SDA	0.02743	0.13192	0.02735	0.95107	261.87	$T_f(s) = \frac{-1.50s + 12.62}{s^2 + 6.13s + 12.93}$

Çizelge 6. Erken durdurma sınırlılıkları altında performans göstergeleri ve transfer fonksiyonu

Algoritma	MAPE	MAE	MSE	R ²	Zaman	Transfer Fonksiyonu
YEA	0.02745	0.13203	0.02739	0.951	131.08	$T_f(s) = \frac{-1.49s + 12.60}{s^2 + 6.12s + 12.90}$
KAA	0.06397	0.30631	0.14181	0.74627	14.76	$T_f(s) = \frac{-4.72s + 51.72}{s^2 + 26.47s + 52.84}$
AAA	0.08961	0.42803	0.28265	0.49428	7.07	$T_f(s) = \frac{-17.04s + 42.09}{s^2 + 29.95s + 42.79}$
BFA	0.05357	0.25709	0.10153	0.81835	7.00	$T_f(s) = \frac{-8.52s + 88.20}{s^2 + 47.01s + 90.66}$
MRA	0.07147	0.34896	0.1819	0.67456	6.72	$T_f(s) = \frac{-7.14s + 50.75}{s^2 + 37.18s + 54.08}$
ÇTA	0.05411	0.26344	0.10466	0.81274	12.84	$T_f(s) = \frac{-18.78s + 79.65}{s^2 + 47.91s + 80.45}$
YSTA	0.02748	0.13215	0.02743	0.95092	60.12	$T_f(s) = \frac{-1.49s + 12.60}{s^2 + 6.12s + 12.91}$
GAA	0.07683	0.3693	0.21579	0.61392	9.74	$T_f(s) = \frac{-0.71s + 98.04}{s^2 + 100s + 93.53}$
HÇA	0.06961	0.33004	0.16554	0.70382	9.01	$T_f(s) = \frac{-8.42s + 37.39}{s^2 + 15.60s + 38.20}$
SDA	0.02745	0.13202	0.02738	0.951	265.07	$T_f(s) = \frac{-1.50s + 12.70}{s^2 + 6.18s + 13.01}$

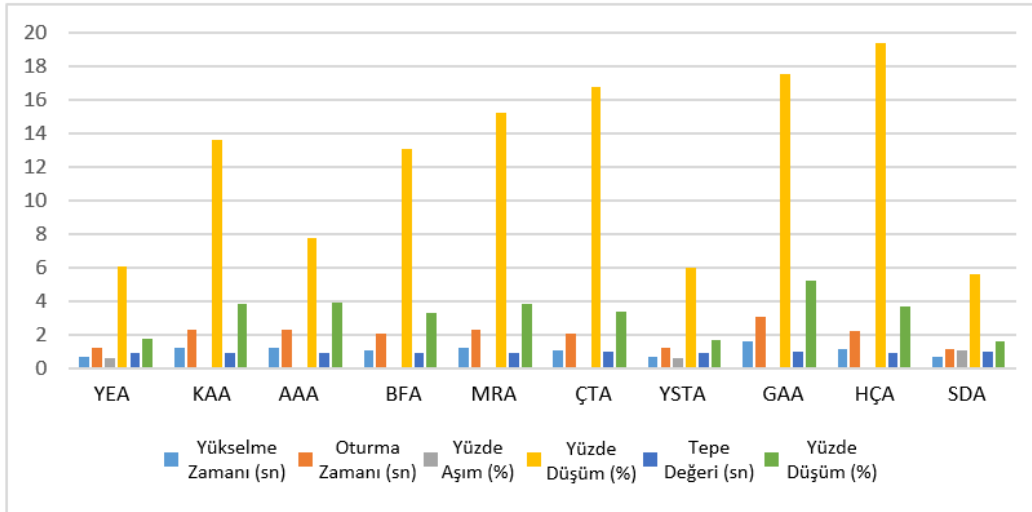
Sunulan çizelgelere ek olarak aykırı değerlerden de bahsetmek gerekir. Çizelge 7’de aykırı değer sayıları gösterilmektedir. İlgili bölümde her algoritmanın belirtilen sınırlılıklar altında başarısını görmek için bağımsız olarak 100 defa çalıştırıldığından bahsedilmiştir. Bu çizelge incelenecek olursa YEA algoritması tüm sınırlılıklar altında en az 0.8 ve üstü R^2 performans değerine ulaşmıştır. YSTA algoritması 2 aykırı değere sahiptir. SDA algoritması ise toplamda 30 adet aykırı performans değerine ulaşmıştır.

Çizelge 7. Aykırı Değer Tablosu

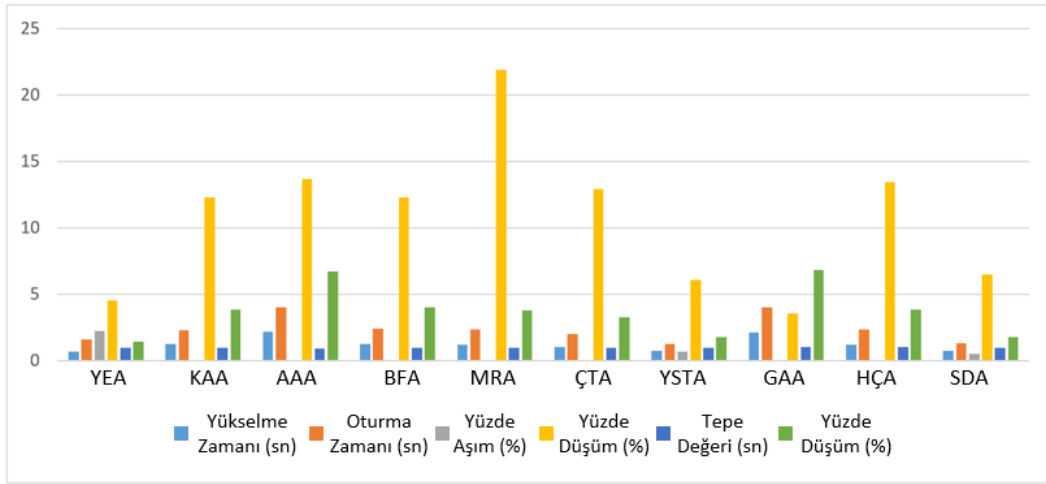
Algoritmalar	TB	MG	FE	ES
YEA	0	0	0	0
KAA	98	98	98	100
AAA	100	98	98	100
BFA	97	98	98	98
MRA	97	95	95	98
YSTA	1	0	0	1
ÇTA	89	90	89	99
GAA	100	100	100	100
HÇA	99	100	100	100
SDA	26	1	1	2

3.4. Algoritmaların Geçici Durum Cevapları

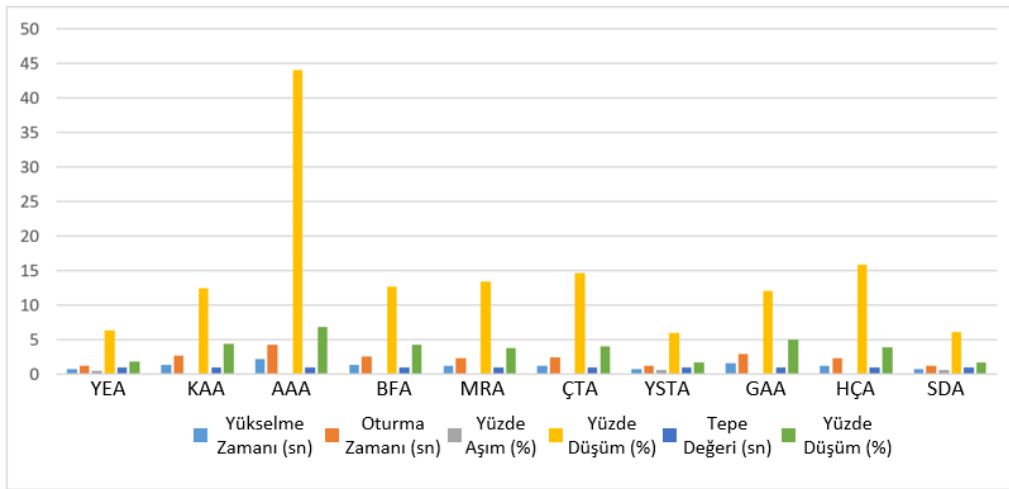
Şekil 25, 26, 27 ve 28’de farklı algoritmalar kullanılarak elde edilen transfer fonksiyonlarının geçici ve kalıcı zaman cevapları karşılaştırılmaktadır. Bu amaçla yükselme zamanı, oturma zamanı, aşım miktarı, düşüm miktarı, tepe değeri ve tepe zamanı gibi geçici durum değerleri ele alınmıştır. Yükselme zamanı, sistem tepkisinin sıfırdan maksimum değere ulaşma süresini ifade etmektedir. Oturma zamanı ise sistem tepkisinin ilk kez sabit değere ulaşma süresidir. Aşım miktarı, sistemin maksimum değeri geçme miktarını belirtir. Düşüm miktarı, sabit değere ulaştıktan sonraki hızlı değişimi ölçer. Tepe değeri, sistem cevabının maksimum değerini ifade eder. Tepe zamanı, maksimum değere ulaşma zamanını belirtir. Bu değerler, kontrol sistemi tasarımında önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 25-28’de sunulan verileri kullanarak, farklı algoritmaların cevaplarının karşılaştırılması mümkündür. Bu nedenle, bu tür performans ölçütleri, kontrol sistemleri tasarımı ve iyileştirmesi için önemli bir araçtır. Şekil 25’te dikkat edilecek olursa YEA, YSTA ve SDA minimum aşım değerine (yaklaşık %6) sahiptir. Zaman sınırlılığı altında bu algoritmaların zaman cevabının benzer olduğunu göstermektedir. Şüphesiz ki kontrol sistemlerinde aşım değerinin fazla olması tercih edilmeyen bir durumdur.



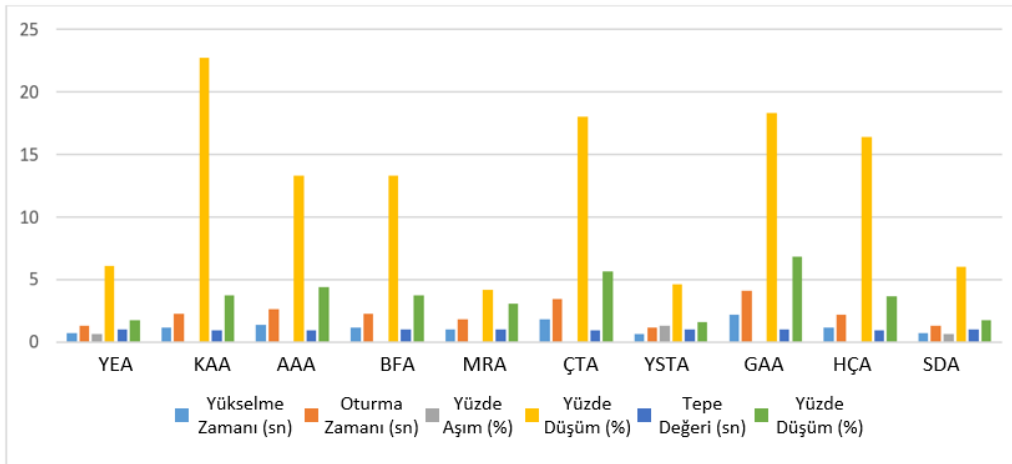
Şekil 25. MS algoritmalarının zaman sınırlılığında geçici durum cevapları



Şekil 26. MS algoritmalarının maksimum generasyon sınırlılığında geçici durum cevapları



Şekil 27. MS algoritmalarının fonksiyon hesaplama sınırlılığında geçici durum cevapları



Şekil 28. Algoritmaların erken durdurma sınırlılığında geçici duruma cevapları

Şekil 26'da maksimum generasyon sınırlılığında zaman cevapları sunulmuştur. Bu şekil incelendiğinde YEA, YSTA ve SDA öne çıkmaktadır. Bazı algoritmaların aşım değerleri 0 çıkmıştır. Bu değer zaman cevabında hiç aşım olmadığı manasına gelmektedir. Yükselme ve oturma zamanları açısından incelenecek olursa YEA, YSTA ve SDA

kabul edilebilir bir aralıkta kalmıştır. Yani diğer algoritmalara kıyasla istenen minimum değerlere yakındırlar. Şekil 27 fonksiyon hesaplama sınırlılığında zaman cevaplarını göstermektedir. Burada dikkat edilirse özellikle AAA çok uzun aşım değerine sahiptir. Elde edilen transfer fonksiyonları açısından daha önce de belirtilen

YEA, YSTA ve SDA birbirlerine yakın geçici durum değerlerine sahiptir. Erken durdurma kriterleri dikkate alındığında elde edilen zaman cevapları Şekil 28'de sunulmuştur. Burada YEA, YSTA ve SDA'ya ek olarak MRA'nın da zaman cevapları diğer algoritmalarla göre daha kısadır. Ancak geçici zaman kriterleri açısından Çizelge 7'de sunulan aykırı değerler dikkate alındığında halen en yüksek skorlu algoritma YEA algoritmasıdır. Topsis yönteminde ise YSTA algoritması öne çıkmaktadır. Bu noktada Topsis çok kriterli bir karar verme yöntemi olduğu için önerdiği algoritma daha öne çıkmaktadır.

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada, 10 farklı metasezgisel algoritma tanımlanmış ve sistem tanımlama problemlerine uygulanmıştır. Makale çalışmasında zaman sınırlılığı kriteri dikkate alındığında yapay ekosistem ve yaşam seçim tabanlı algoritmalar öne çıkmıştır. Yapılan bir diğer analizde ise transfer fonksiyonlarının geçici durum cevapları incelenmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda YEA ve YSTA algoritmalarının sistem tanımlama problemlerine kolaylıkla uygulanabildiği ve diğer MS algoritmalarla karşılaştırıldığında yüksek performans değerleriyle ön plana çıktığı görülmektedir. Bu makalede önerilen Topsis çok kriterli karar verme mekanizması ise R^2 , çözüm ve yükselme zamanlarını birlikte değerlendirmektedir. Bu 3 kriter birlikte değerlendirildiğinde ise YSTA algoritması kazanan algoritma olarak öne çıkmıştır. Sonuç olarak bu çalışmayla MS algoritmalarının sistem tanımlama problemlerine uygulanabileceği görülmüştür. Ancak en iyi MS algoritmasının belirlenmesinde yaşanan sorunlar için Topsis yönteminin kullanımının uygun olduğu görülmüştür.

Etik Standartlar Bildirgesi

Makalenin yazarları tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: Kaynaklar, Fikir Sahibi, Araştırma, Yazma

Yazar-2: Araştırma, Deneyleme, Doğrulama, Metodoloji

Yazar-3: Deney tasarımı, Görselleştirme

Çıkar Çatışması Beyanı

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

Verilerin Kullanılabilirliği

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

5. Kaynaklar

Canayaz, M., 2019, Training Anfis System with Moth-Flame Optimization Algorithm. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, **7(3)**, Article 3.

<https://doi.org/10.18201/ijisae.2019355375>

Çelikel, R., & Gundogdu, A., 2020, System identification-based MPPT algorithm for PV systems under variable atmosphere conditions using current sensorless approach. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, **30(8)**, e12433.

Chen, Y., Pi, D., & Wang, B., 2019, Enhanced global flower pollination algorithm for parameter identification of chaotic and hyper-chaotic system. *Nonlinear Dynamics*, **97(2)**, 1343-1358. <https://doi.org/10.1007/s11071-019-05052-z>

Crispim, J. A., & Pinho de Sousa, J., 2009, Partner selection in virtual enterprises: A multi-criteria decision support approach. *International Journal of Production Research*, **47(17)**, 4791-4812. <https://doi.org/10.1080/00207540902847348>

Ding, S., Shi, Z., Chen, K., & Azar, A. T., 2015, Mathematical Modelling and Analysis of Soft Computing. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, e578321. <https://doi.org/10.1155/2015/578321>

Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T., 2006, Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, **1(4)**, 28-39. <https://doi.org/10.1109/MCI.2006.329691>

El-Dabah, M. A., & El-Sehiemy..., R. A., 2021, Parameter estimation of triple diode photovoltaic model using an artificial ecosystem based optimizer. *Int Trans Electr Energ Syst*. **31(11)**:e13043. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13043>

Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreinejad, A., Hamdi, M., 2012, Water cycle algorithm – A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *Computers & Structures*, **110-111**, 151-166. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.07.010>

Fadzli, A. A. M., Hadi, M. S., Eek, R. T. P., Talib, M. H. Ab., Yatim, H. M., & Darus, I. Z. M., 2022, PID Controller Based on Flower Pollination Algorithm of Flexible Beam System. *Recent Trends in Mechatronics Towards Industry 4.0*. Springer, 173-183 https://doi.org/10.1007/978-981-33-4597-3_17

Fan, S., Zhang, J., Blanco-Davis, E., Yang, Z., Yan, X., 2020, Maritime accident prevention strategy formulation from a human factor perspective using Bayesian NeHÇArks and TOPSIS. *Ocean Engineering*, **210**, 107544. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107544>

Farag, M. A., El-Shorbagy, M. A., Mousa, A. A., El-Desoky, I. M., 2020, A New Hybrid Metaheuristic Algorithm for Multi objective Optimization Problems. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, **13(1)**, 920-940. <https://doi.org/10.2991/ijcis.d.200618.001>

- Fidan, Ş., Sevim, D., Erkan, E. 2022, System Identification and Control of High Voltage Boost Converter. *2022 Global Energy Conference (GEC)*, 25-31.
<https://doi.org/10.1109/GEC55014.2022.9986621>
- Guo, Y., Shi, Q., Guo, C., 2022, A Performance-Oriented Optimization Framework Combining Meta-Heuristics and Entropy-Weighted TOPSIS for Multi-Objective Sustainable Supply Chain NeHÇArk Design. *Electronics*, **11(19)**, Article 19.
<https://doi.org/10.3390/electronics11193134>
- Izci, D., 2022, A novel modified arithmetic optimization algorithm for power system stabilizer design. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, **40(3)**, 3
- .Izci, D., Hekimoğlu, B., Ekinci, S., 2022, A new artificial ecosystem-based optimization integrated with Nelder-Mead method for PID controller design of buck converter. *Alexandria Engineering Journal*, **61(3)**, 2030-2044.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.07.037>
- Janjanam, L., Saha, S. K., Kar, R., Mandal, D., 2022, Wiener model-based system identification using moth flame optimised Kalman filter algorithm. *Signal, Image and Video Processing*, **16(5)**, 1425-1433.
<https://doi.org/10.1007/s11760-021-02096-w>
- Ji, Y., Jiang, X., Wan, L., 2020, Hierarchical least squares parameter estimation algorithm for HÇA-input Hammerstein finite impulse response systems. *Journal of the Franklin Institute*, **357(8)**, 5019-5032.
<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2020.03.027>
- Kalita, K., Pal, S., Haldar, S., Chakraborty, S., 2022, A Hybrid TOPSIS-PR-GWO Approach for Multi-objective Process Parameter Optimization. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, **6(4)**, 1011-1026.
<https://doi.org/10.1007/s41660-022-00256-0>
- Karaboga, D., & Basturk, B., 2007, A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, **39(3)**, 459-471.
<https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>
- Kaveh, A. and Bakhshpoori T., 2021, Tug of War Optimization, *Advances in Metaheuristic Algorithms for Optimal Design of Structures*. Springer International Publishing, 467-503.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-59392-6_15
- Kennedy, J., & Eberhart, R., 1995, Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural NeHÇArks*, **4**, 1942-1948 c.4.
<https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Khatri, A., Gaba, A., Rana, K. P. S., Kumar, V., 2020. A novel life choice-based optimizer. *Soft Computing*, **24(12)**, 9121-9141.
<https://doi.org/10.1007/s00500-019-04443-z>
- Khluabwannarat, P., Nawikavatan, A., Puangdownreong, D., 2018, *Fractional-Order Model Parameter Identification of BLDC Motor by Flower Pollination Algorithm*. 13.
- Kler, D., Sharma, P., Banerjee, A., Rana, K. P. S., Kumar, V., 2017,. PV cell and module efficient parameters estimation using Evaporation Rate based Water Cycle Algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, **35**, 93-110.
<https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.02.005>
- Kumbasar, T., Eksin, I., Guzelkaya, M., & Yesil, E., 2011, Adaptive fuzzy model based inverse controller design using BB-BC optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, **38(10)**, 12356-12364.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.015>
- Long, B., Yang, W., Hu, Q., Guerrero, J. M., Garcia, C., Rodriguez, J., & Chong, K. T., 2022, Moth-Flame-Optimization-Based Parameter Estimation for FCS-MPC-Controlled Grid-Connected Converter With LCL Filter. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, **10(4)**, 4102-4114.
<https://doi.org/10.1109/JESTPE.2022.3140228>
- Mirjalili, S., 2015a, Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm. *Knowledge-Based Systems*, **89**, 228-249.
<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.07.006>
- Mirjalili, S., 2015b, The Ant Lion Optimizer. *Advances in Engineering Software*, **83**, 80-98.
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.01.010>
- Mohammadi, A., Sheikholeslam, F., Mirjalili, S., 2022, Inclined planes system optimization: Theory, literature review, and state-of-the-art versions for IIR system identification. *Expert Systems with Applications*, **200**, 117127.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117127>
- Mossa, M. A., Kamel, O. M., Sultan, H. M., Diab, A. A. Z., 2021, Parameter estimation of PEMFC model based on Harris Hawks' optimization and atom search optimization algorithms. *Neural Computing and Applications*, **33(11)**, 5555-5570.
<https://doi.org/10.1007/s00521-020-05333-4>
- Nair, S. S., Rana, K. P. S., Kumar, V., Chawla, A., 2017, Efficient Modelling of Linear Discrete Filters Using Ant Lion Optimizer. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, **36(4)**, 1535-1568.
<https://doi.org/10.1007/s00034-016-0370-z>
- Nazir, M. I., Ahmad, A., & Hussain, I., 2022, Water Cycle Algorithm Based Parametric Tuning of Non-Negative LMMN Control of Grid Tied Renewable Energy Systems. *IETE Journal of Research*, **0(0)**, 1-17.
<https://doi.org/10.1080/03772063.2022.2089748>
- Nguyen, T. T., 2023, *A novel metaheuristic method based on artificial ecosystem-based optimization for*

- optimization of neHÇArk reconfiguration to reduce power loss.
<https://doi.org/10.1007/s00500-021-06346-4>
- Pal, P. S., Kar, R., Mandal, D., & Ghoshal, S. P., 2016. Identification of NARMAX Hammerstein models with performance assessment using brainstorm optimization algorithm. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **30(7)**, 1043-1070.
<https://doi.org/10.1002/acs.2674>
- Prakash, V., Dwivedi, S., Gautam, K., Seth, M., Anbumani, S., 2020, Occurrence and Ecotoxicological Effects of MiMRAplastics on Aquatic and Terrestrial Ecosystems. *MiMRAplastics in Terrestrial Environments: Emerging Contaminants and Major Challenges*. Springer International Publishing, 223-243.
https://doi.org/10.1007/978-90-00-2020-4_56
- Puangdownreong, D., Hlungnamtip, S., Thammarat, C., & Nawikavatan, A., 2017,. Application of flower pollination algorithm to parameter identification of DC motor model. *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 1-4.
<https://doi.org/10.1109/IEECON.2017.8075889>
- Ravber, M., Liu, S.-H., Mernik, M., & Črepinšek, M., 2022, Maximum number of generations as a stopping criterion considered harmful. *Applied Soft Computing*, **128**, 109478.
<https://doi.org/10.1016/j.aas.2022.109478>
- Salcedo-Sanz, S., Del Ser, J., Landa-Torres, I., Gil-López, S., & Portilla-Figueras, J. A., 2014, The Coral Reefs Optimization Algorithm: A Novel Metaheuristic for Efficiently Solving Optimization Problems. *The Scientific World Journal*, **2014**, e739768.
<https://doi.org/10.1155/2014/739768>
- Shadkam, E., Safari, S., & Abdollahzadeh, S. S., 2021, Finally, which meta-heuristic algorithm is the best one? *International Journal of Decision Sciences, Risk and Management*, **10(1-2)**, 32-50.
<https://doi.org/10.1504/IJDSRM.2021.117555>
- Shaikh, M. S., Raj, S., Babu, R., Kumar, S., & Sagrolikar, K., 2023, A hybrid moth-flame algorithm with particle swarm optimization with application in power transmission and distribution. *Decision Analytics Journal*, **6**, 100182.
<https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100182>
- Shi, Y., 2011, Brain Storm Optimization Algorithm. İçinde Y. Tan, Y. Shi, Y. Chai, & G. Wang (Ed.), *Advances in Swarm Intelligence*,. Springer, 303-309.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-21515-5_36
- Singh, P., Meena, N. K., Yang, J., Vega-Fuentes, E., & Bishnoi, S. K., 2020, Multi-criteria decision making monarch butterfly optimization for optimal distributed energy resources mix in distribution neHÇArks. *Applied Energy*, **278**, 115723.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115723>
- Singh, S., Ashok, A., Rawat, T. K., & Kumar, M., 2016, Optimal IIR system identification using flower pollination algorithm. *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853666>
- Sompracha, C., & Rukkaphan, S., 2021, Fractional-Order System Identification of Temperature Process Rig Control System using Flower Pollination Algorithm. *2021 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 309-312.
<https://doi.org/10.1109/iEECON51072.2021.944032>
- Omotoso O., H., Al-Shaalan, A. M., H Farh, H. M., & Al-Shamma, A. A., 2022, Citation: Omotoso, HEconomic Evaluation of Hybrid Energy Systems Using Artificial Ecosystem-Based Optimization with Demand Side Techno-Economic Evaluation of Hybrid Energy Systems Using Artificial Ecosystem-Based Optimization with Demand Side Management.
<https://doi.org/10.3390/electronics11020204>
- Tian, T., Liu, C., Guo, Q., Yuan, Y., Li, W., & Yan, Q., 2018, An Improved Ant Lion Optimization Algorithm and Its Application in Hydraulic Turbine Governing System Parameter Identification. *Energies*, **11(1)**, Article 1.
<https://doi.org/10.3390/en11010095>
- Wu, Z., Shen, D., Shang, M., & Qi, S., 2019, Parameter Identification of Single-Phase Inverter Based on Improved Moth Flame Optimization Algorithm. *Electric Power Components and Systems*, **47(4-5)**, 456-469.
<https://doi.org/10.1080/15325008.2019.1607922>
- Wu, Z., Yu, D., & Kang, X., 2017,. Parameter identification of photovoltaic cell model based on improved ant lion optimizer. *Energy Conversion and Management*, **151**, 107-115.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.088>
- Yan, Z., Li, C., Song, Z., Xiong, L., & Luo, C., 2019, An Improved Brainstorming Optimization Algorithm for Estimating Parameters of Photovoltaic Models. *IEEE Access*, **7**, 77629-77641.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2922327>
- Yang, X.-S., 2012, Flower Pollination Algorithm for Global Optimization. (Ed.), *Unconventional Computation and Natural Computation* (ss. 240-249). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-32894-7_27
- Yang, X.-S., 2020, Nature-inspired optimization algorithms: Challenges and open problems. *Journal of Computational Science*, **46**, 101104.
<https://doi.org/10.1016/j.jocs.2020.101104>
- Yang, Y., Yang, B., & Niu, M., 2017, Parameter identification of Jiles-Atherton model for magnetostrictive actuator using hybrid niching coral reefs optimization algorithm. *Sensors and Actuators A: Physical*, **261**, 184-195.

<https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.05.009>

Yang, Y., Yang, B., & Niu, M., 2018, Adaptive infinite impulse response system identification using opposition based hybrid coral reefs optimization algorithm. *Applied Intelligence*, **48(7)**, 1689-1706.

<https://doi.org/10.1007/s10489-017-1034-9>

Yin, M., Iannelli, A., Khosravi, M., Parsi, A., & Smith, R. S. , 2020, Linear Time-Periodic System Identification with Grouped Atomic Norm Regularization. *IFAC-Papers OnLine*, **53(2)**, 1237-1242.

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1341>

Yousri, D., Allam, D., Babu, T. S., AbdelAty, A. M., Radwan, A. G., Ramachandaramurthy, Vigna. K., & Eteiba, M. B., 2020, Fractional chaos maps with flower pollination algorithm for chaotic systems' parameters identification. *Neural Computing and Applications*, **32(20)**, 16291-16327.

<https://doi.org/10.1007/s00521-020-04906-7>

Zaloğlu, M., Fidan, Ş., & Erkan, E., 2023, Meta-Heuristik Optimizasyon Algoritmalarının Sistem Tanımlama Problemine Uygulanması ve Performans Karşılaştırması. *International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences*, **1**, 510-515.

Zhao, W., Wang, L., & Zhang, Z., 2019, Atom search optimization and its application to solve a hydrogeologic parameter estimation problem. *Knowledge-Based Systems*, **163**, 283-304.

<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.08.030>



Designing a Cost-Efficient Belt-Driven 3D-Printed Syringe Pump

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 04.12.2023

Kabul/Accepted: 08.05.2024

Yayımlandı/Published: 27.06.2024

Düşük Maliyetli ve Kayış Aktarmalı 3B Baskılı Şırınga Pompası Tasarımı

İsmail AĞIR*

İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, İstanbul, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Biyoteknoloji, biyomedikal ve biyomühendislik gibi araştırma alanlarında, sıvıların hassas bir şekilde transferi ve kontrolü temel bir gerekliliktir. Bu amaçla çeşitli pompa ve akışkan kontrol sistemleri laboratuvarlarda kullanılmaktadır. Biyolojik sıvılarla çalışmaya uygunluğu nedeniyle şırınga pompaları daha çok tercih edilmektedir. Mevcut ticari şırınga pompalar, yüksek maliyetleri ve isteğe bağlı olarak yazılım veya fiziksel modifikasyonlar yapmanın zor olması dezavantajlarına sahiptir. Araştırmacılar bu nedenle, üç boyutlu yazıcı teknolojisi ve açık kaynak elektronik imkanlarını kullanarak kendi pompalarını tasarlayıp kullanmaya başlamıştır. Geliştirilen bu özelleştirilmiş pompalarda yaygın olarak doğrusal sürücü ve metal vidalı miller kullanılmaktadır, bu bileşenler pahalıdır ve bu yöntemle üretilen cihazların ağırlığı artmaktadır. Ayrıca bu yöntemde, milin hatveleri arasındaki oynama payından kaynaklı olarak geri tepme hatası oluşabilmekte ve bu da hassaslığı etkilemektedir. Bu çalışmada, kayış aktarma yöntemine dayanan ve metal parça kullanımının en aza indirildiği bir üç boyutlu şırınga pompası tasarlanmıştır; düşük maliyetli ve daha hafif bir şırınga pompası tasarımı gösterilmiştir. Geliştirdiğimiz pompa 10 mikrolitrenin altında hassaslığa sahiptir, ağırlığı 250 gramın altındadır ve maliyeti düşüktür (<41\$). Çalışmamız sonucunda kısıtlı şartlara sahip olunan durumlarda, dışarıya en az bağımlılıkla üç boyutlu şırınga pompası üretme hedefine katkıda bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Şırınga Pompası; 3B Baskı; Mikroakışkan; Pompa Tasarımı.

Abstract

In biotechnology, biomedicine, and bioengineering research, precise liquid transfer and control are essential. Laboratories depend on diverse pumps and fluid control systems, with syringe pumps emerging as a preferred option due to their compatibility with biological fluids. Due to the high cost and limited customization options in existing commercial syringe pumps, researchers have begun designing their own custom devices, utilizing the expanding 3D printing technology and open-source electronics. Nevertheless, 3D-printed pumps often integrate metal components such as lead screws and rods to create linear drives, leading to heightened costs and increased overall weight. Furthermore, lead screws can introduce backlash errors, affecting precision due to play between the threads of the nut. In this study, a 3D-printed syringe pump design is introduced based on the belt drive method, with a focus on minimizing the incorporation of metal components. Not only is cost reduction achieved by new design, but it also results in a lighter syringe pump while minimizing backlash errors. A sensitivity below 10 microliters, a cost of less than \$41, and a weight under 250 grams were achieved by the newly designed pump. The effort to develop a 3D-printed custom syringe pump, which reduces reliance on external sources, particularly in constrained environments, is strengthened by the reduction of dependency on metal parts and the increased utilization of 3D printed components.

Keywords: Syringe Pump; 3D- Printing; Microfluidics; Pump Design

1. Introduction

Fluid control is a critical task in many bio-related science methods, with implications for everything from drug discovery to basic research (Ozer et al. 2022, Kashaninejad and Nguyen 2023). Biofluids, which generally contain complex molecules such as proteins and cells, must be handled gently during transfer. Peristaltic and syringe pumps (also known as infusion pumps) are two of the most common types of fluid transfer devices used in biofluidic systems due to their advantages of low

shear stress and easy sterilization (Lake et al. 2017, Samokhin 2020, Gucluer 2023).

Syringe pumps are essential tools in biomedical research, used to deliver precise and controlled doses of fluids in a wide range of laboratory applications, including biochemistry, chemistry, agriculture, and bioprocess studies. The general mechanism of a syringe pump consists of a linear movement mechanism driven by a motor, a syringe (plunger, barrel, and needle), and tubes.

While commercial syringe pumps are readily available, their typical cost exceeds \$100, posing a financial challenge. Also, they provide limited options for both mechanical and software modifications, making them less adaptable to the specific needs of specialized experiments. On the flip side, customized syringe pumps can be designed using basic electromechanical components, open-source software, and 3D-printed parts to meet the specific needs of researchers, even in challenging experimental settings (Juarez et al. 2016, Boeshaghi et al. 2019, Rogosic et al. 2022).

Additive manufacturing (AM), a transformative digital production technology, leverages computer-based modeling to enable the creation and virtual simulation of engineering designs before their rapid fabrication using 3D printing techniques like selective laser melting (SLM) and fused filament fabrication (FFF). This technology unlocks a vast array of material options, empowering the design and production of application-specific parts and prototypes with flexibility (Beaman et al. 2020, Ergene 2022, Ergene and Bolat 2022, Bolat et al. 2023, Ergene et al. 2023).

3D-printed syringe pumps offer several advantages over commercial counterparts, including lower cost, the ability to handle a wide range of flow rates, and compatibility with various biofluids, such as high-viscosity fluids and composites like clay. They can also operate at controlled temperatures and deliver unconventional fluids, such as acidic, corrosive, or highly reactive substances, by selecting printing materials and adjusting the conditions around the fluid path (Pusch et al. 2018). Additionally, 3D-printed syringe pumps can be programmed via any smart device, such as a smartphone, and controlled using the Internet of Things (IoT) to deliver fluids in complex patterns, such as combined continuous flow, pulsed flow, and ramped flow (Klar et al. 2019, Darling and Smith 2021, Tashman et al. 2022).

In this study, we introduce the design of a cost-effective 3D-printed syringe pump, named 'BD3DSP' (belt-driven 3D syringe pump), which incorporates minimal metal components. The BD3DSP is designed to be modular, allowing easy adjustments to accommodate any syringe size and making it a versatile tool suitable for a broad spectrum of applications. Considering that the BD3DSP is predominantly composed of 3D-printed components, including a 3D-printed linear rail, it can be produced in environments with constrained resources, such as emergency situations, low-budget laboratories, and

remote locations like space and polar research stations. Moreover, the pump is lightweight, portable, and readily mountable on various machine hosts, including 3D printers, 2D plotters, 5-axis robotic arms, or microfluidic setups, facilitated by its universal connector plate.

2. Materials and Methods

According to a standard definition, a syringe pump typically comprises a syringe containing the fluid for transfer, a linear driver responsible for pushing the syringe plunger into the barrel, and two locking apparatuses: one for the barrel and the other for the plunger flange. In line with this concept, we developed a novel pump that integrates a 3D-printed linear rail, belt drive, and syringe holder seamlessly within a 3D-printed plate (base.stl) using Autodesk Inventor 2023 software. All part names and functions are detailed in Table 1, which can be accessed on our online repository at <http://github.com/ismailagir/BD3DSP>.

Table 1. Names and functions of 3D printed (STL) parts

Name	Function	Weight (g)
Base ^a	Bottom plate for mounting all other parts and the step motor.	92
Slot ^a	Provides a linear tunnel-like rail for the carrier.	76
Linear car, ha1, beltfixer	The linear rail carrier is where the belt end terminations are secured, with four bearing wheels mounted.	11
Ctight, Stight	Belt tensioning mechanism driven by a screw.	9
Tower	Connects the Splate to the base plate.	7
Splate	Bottom plate for securing the syringe components.	13
Sfront ^a , Sbracket ^a , Sframe ^a	Attach the syringe to the Splate.	14

^a;Components indicated with (^a) in Table 1 were designed to be easily customizable through parametric dimension adjustments. This design feature enables the replication of the pump to accommodate various types of syringes in future studies.

In Figure 1, we presented all 3D printed components of the assembled pump. All components were 3D printed using Creality Ender 3 Pro and Tough PLA filament (Porima Inc, Turkey), with specifications detailed in Table 2.

The 3D printing was carried out with parameters set to 100% infill, a layer height of 0.2 mm, and a printing speed of 60 mm/s at 220°C, as key parameters provided in Table 3.

Table 2. Properties of the preferred PLA filament.

Property	Value
Diameter	1.75 mm
Color	RAL 7046
Density	1.22 g/cm ³ (ISO 1183)
Tensile strength	50 MPa (ISO 1183)
Elastic modulus	2400 MPa (ISO 527)
Heat deflection temperature	58°C (ASTM D648)
Glass transition temperature	55-65°C (ASTM D3418)

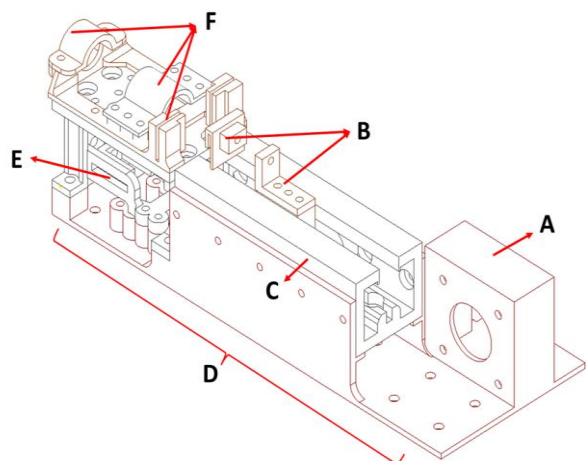


Figure 1.) Step motor mounting frame. B) Syringe plunger fixer over the sliding carriage. C) Linear rail. D) Base plate. E) Belt tensioner. F) Syringe holder.

Table 3. Key parameters of 3D printing process.

Property	Value
Bed temperature	60°C
Nozzle temperature	220°C
Fill pattern	Grid
Perimeters at vertical shells	3
Solid layers at horizontal shells	4
Print speed	60 mm/s
First layer speed	30 mm/s
Travel speed	150 mm/s
Support overhang threshold	45°
Support style	Grid
Support interface spacing	0.2 mm

2.1. Design of The Base Plate

We designed the base plate to securely hold all the components in place and to operate the stepper motor. As depicted in Figure 1-D, the base plate measured 220 mm in length, 60 mm in height, and 50 mm in width, with a weight of 92 grams. M4-sized holes were incorporated for the attachment of the belt tensioner and other components using M4 bolt-screws. Also, we placed 4 mm

holes at the back of the plate, spaced 20 mm center-to-center, to easily integrate the syringe pump to common 20x20 aluminum profiles for various applications.

2.2. Linear Mechanism

The linear rail, or linear guide, serves the purpose of enabling smooth and accurate movement along a single axis. There are two common types of linear mechanism: lead screws and belt drives, with the key differences between these two illustrated in Table 4. Belt drives are commonly used in applications where cost, noise levels, and maintenance are prioritized, such as pick-and-place machines and packaging machinery. In contrast, lead screws are frequently employed in applications where load capacity is a primary concern, notably in CNC machines and machine tools (Schreiber et al. 2020, Khalid et al. 2023).

Table 4. Comparing properties of timing belts and lead screws.

Factor	Timing Belt	Lead Screw
Cost	Lower	Higher
Load capacity	Lower	Higher
Noise level	Lower	Higher
Maintenance	Less	More
Materials	Plastic	Metal

The lead screw enables linear movement by propelling a nut along the screw. Nevertheless, the existence of a gap between the nut and screw can introduce vibrations, potentially leading to backlash issues that may compromise the precision of controlling the movement of the syringe plunger in the pump. To improve precision and eliminate backlash, one option is to invest in precision lead screws, albeit at a higher cost. However, a more efficient alternative is to utilize ball screws, which minimize friction by incorporating small rotating balls within the nut; unfortunately, they are notably more expensive. In contrast, in a well-calibrated belt drive system, theoretically, there should be no backlash. Therefore, when designing a syringe pump with relatively small torque, opting for a belt drive would be more advantageous (Luo et al. 2022, Wang et al. 2023). Also, according to a recent study, maintenance through greasing is crucial for achieving precision in a lead screw-based pump (Leuthner and Hayden 2023). Conversely, the belt drive only requires belt tensioning and simple cleaning over time.

In 3D printing, both belt drives and lead screws are commonly employed. However, belt drives hold

particular significance due to their cost-effectiveness, capacity to enhance print speed while maintaining precision, and ease of reproducibility. In contrast, lead screws are typically designated for the Z-axis, benefitting from gravity's assistance in mitigating backlash issues, and where their higher load capacity and torque are crucial (Liu et al. 2019, Mapley et al. 2020).

Typically, a linear driver system includes components such as a slider carriage and extruded *aluminum* profiles (V-slot or T-slot). When designing a 3D-printed syringe pump, this requirement increases design costs and adds extra weight, potentially limiting customization options. As shown in Figure 2, to overcome these challenges, we fabricated a 3D-printed sliding carriage and a linear rail (slot), promoting complete in-house production. We designed the carriage with four bearings attached to slide along the rail. It is possible to use either plastic 3D printed or commercially available metal bearings (coded as 608ZZ) with specifications of a 22 mm outer diameter, 8 mm inner diameter, and 7 mm thickness. On the top of the sliding carriage, we added three M4-sized holes to attach the syringe plunger fixer, which moves the plunger according to the carriage's position.

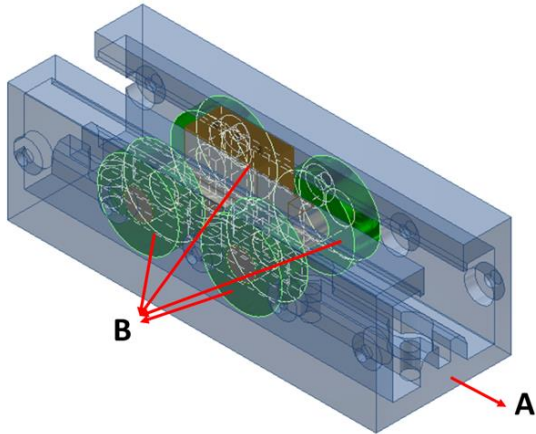


Figure 2. A) Linear rail. B) The sliding carriage and 4 bearings on the sides.

2.3. Belt Drive

GT2 (Gates Tooth 2) is a standardized code for a belt with rounded tooth profiles, signifying that the teeth are spaced 2 mm apart (Shah et al. 2019). As illustrated in Figure 3, we employed a 40 cm length, 6 mm wide GT2 rubber timing belt (Wang et al. 2018). Two 20-tooth, 16 mm diameter belt pulleys (with a 5 mm bore) are utilized, with one serving as the driver pulley mounted on the stepper motor, and the other serving as the driven pulley. This configuration creates a synchronous belt drive with a 1:1 gear ratio. At the opposite side of the belt, we

integrated a belt tensioner mechanism, utilizing an M4 screw and a wing bolt. The tensioner was designed to horizontally stretch (X-axis) the belt by 5 mm and was secured in place with an additional M4 screw-bolt positioned perpendicular (Y-axis) to it. We adjusted the wing bolt to ensure the belt maintained adequate tension.

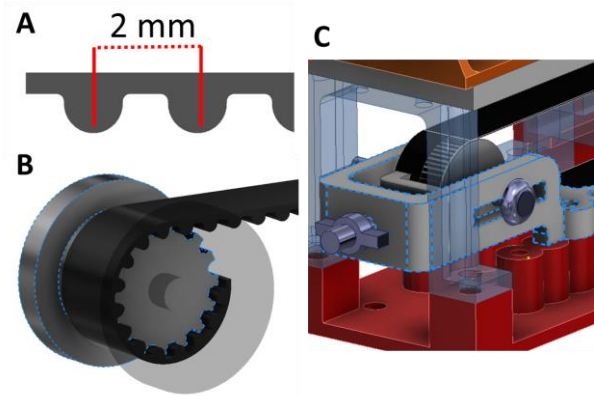


Figure 3. A) GT-2 belt. B) Belt and pulley system. C) Belt tensioner mechanism.

2.4. Operation and G-code

Step motor drivers can be directly controlled using the popular Arduino Uno board through drivers or with (CNC) shields, facilitating the setup of a control system. In CNC systems, all mechanical control is executed through the utilization of G-codes, which adhere to universal standards (RS-274).

We flashed the open-source CNC control firmware Grbl (v0.9) onto the Arduino Uno to enable the operation of the entire hardware. Since we required a single linear axis of movement, we employed a standard Nema 17 stepper motor (model 17HS4401S) with 200 steps per revolution and a holding torque of 3.2 kg-cm. For driving the stepper motor, we employed the A4988 stepper motor driver through the CNC Shield V3 (Barik et al. 2023). As the power supply, we used a 12V, 2A AC-to-DC adapter. The A4988 driver's current limit adjusted to 1.5 A, which corresponds to a V_{ref} of 1.2 V using a multimeter. The highest linear force that the stepper can apply to the syringe piston can be calculated from the torque value provided by the factory. Assuming a pulley diameter of 16 mm based on Equation 1, the linear force is determined as 39.25 N.

$$F = \frac{\text{Stepper Torque}}{\text{Pulley Radius}} = \frac{0.314 \text{ Nm}}{0.008 \text{ m}} \quad (1)$$

$$F = 39.25 \text{ N}$$

The theoretical value of 32.25 N is then employed in Equation 2 to determine the maximum pressure within the pump. This calculation results in a pressure of 347 kPa in a system utilizing a syringe equipped with a 12 mm diameter cross-section piston.

$$P = \frac{\text{Linear Force}}{\text{Cross - Section Area}} = \frac{39.25 \text{ N}}{\pi * (0.006 \text{ m})^2} \quad (2)$$

$$P = 374 \text{ kPa} \quad (2)$$

However, it's worth noting that the torque exerted by stepper motors fluctuates with their speed, with higher torques typically observed at lower speeds (Kukla et al. 2016). Additionally, it is necessary to adjust the operating parameters of the stepper motor to ensure that it remains continuously open after pumping, thereby maintaining its torque against potential counter pressures.

Using the G-codes in Table 5, we managed to perform several tasks, such as setting the dosage volume and flow rate, and creating flow injection cycles by inserting time breaks. When a new line of G-code is sent over UART, the machine (Grbl firmware) parses the command and then executes it. Once the command has been executed, it responds with an 'OK' message to indicate successful processing. Any smart device with UART support can be used to access and control our syringe pump. To make the pump easier to control, we created a user interface using Microsoft Visual Studio 2022 and wrote a Python script using the widely used PySerial library.

2.5. Calibration

Microstepping is a technique employed in stepper motor control, allows for finer movement resolution by breaking down each full step into smaller, incremental steps (Tashman et al. 2022). According to Equation (3), setting the microstepping to 1/16 will provide a movement precision of 1/80 millimeter, or 80 steps per millimeter. We configured the A4988 driver to operate in 1/16 step mode, which is also the default setting for the TMC2208 used in stock Ender 3 printers. The calculated steps-per-unit parameter was set using the "M92 X80.0" G-code command.

On the other hand, despite employing microstepping, additional calibration may be necessary due to slight deviations arising from imperfections in stock components like the stepper motor, belt, or pulleys. For calibration, we affixed a digital compass to the rear of the base plate and executed the "G1" g-code to move it 0.1 mm, measuring the movement with the compass in 30

iterations. Consequently, as a minimum limit, we observed a guaranteed precision of 0.1 mm with no random errors.

Table 5. Operational G-code commands and their functions.

Code	Function	Example usage
M25	Pause the process	M25
M0	Pause the process without saving the state	M0
G1 X(P)	Move to the position P	G0 X0.1; moves the syringe plunger 0.1mm
G1 F(N) X(P)	Move to the position P with the travel speed N	G1 F50 X1; moves the syringe plunger 1 mm with 50mm/s speed.
G4 P(MS)	Pause the process for the specified number of milliseconds (MS).	G4 P5000; pause the flow for 5 seconds.
\$1	Idle lock time for steppers	\$1=255 ; to remain continuously open

$$\frac{\text{Steps}}{\text{mm}} = \frac{\text{Steps Per Rev.} \times \text{Microstepping}}{\text{Pulley Tooth} \times \text{Belt Pitch}} \quad (3)$$

$$\frac{\text{Steps}}{\text{mm}} = \frac{200 \times 16}{20 \times 2} = 80$$

3. Results and Discussion

3.1. Validating the Analytical Performance

We used a 5-milliliter polyethylene (PE) syringe with a 12-millimeter inner diameter, filling it with distilled water. As illustrated in Figure 4, for evaluating the pump's sensitivity, we used a laboratory scale to dispense distilled water into a beaker and measured the weight. We adjusted the plunger in increments of 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, and 1 millimeter, corresponding to dispensed volumes of 11.3, 22.6, 33.9, 56.5, and 113 microliters, respectively (for a 5 mL syringe). To compensate for the scale's sensitivity, we replicated the 0.1-millimeter step five times.

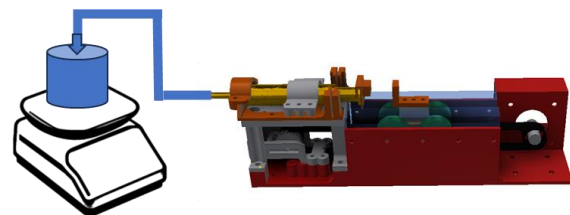


Figure 4. Setup for validating analytical performance of the pump.

Subsequently, as presented in Table 6, we evaluated the standard deviations for all steps using the measured average weight gain. Flow rates were set at 5654.87 $\mu\text{L}/\text{min}$ for the 5 mL syringe and 1413.72 $\mu\text{L}/\text{min}$ for the 1 mL syringe. Eight deliveries were performed for each step, with a 10-second pause between the execution of G-codes. Additionally, a 1-milliliter glass syringe with a 6-millimeter inner diameter was used to dispense 1 millimeter of water, resulting in a 0.028-gram addition for each step.

Table 6. Random errors validating analytical performance of the pump.

Distance (mm)	Measured weight average gain (g)	Random error (g)	Random error (μL)
1	0.1175	0.0066	6.6
0.5	0.0575	0.0066	6.6
0.3	0.0325	0.0082	8.2
0.2	0.0228	0.0045	4.5
0.1 x 5	0.0385	0.0063	6.3
1 (1 mL syringe)	0.0274	0.0014	1.4

The results consistently showed that random errors remained below 10 microliters for each increment, highlighting the precision of our pump. As the targeted volume increased, the ratio of random error to target volume decreased. For dosage weights exceeding 0.05 grams, the random error remained consistent. This observation is understandable, considering the laboratory scale's sensitivity of 0.01 grams. It is also worth noting that random errors may result from flow path imperfections, such as pre-existing air bubbles in the syringe and unwanted frictions in the syringe's plunger. Moreover, due to the cohesive properties of water, siphoning and capillary effects may occur when handling small microliter volumes, potentially hindering the precise delivery of liquids.

3.2 Cost Analysis and Literature Comparison

In Table 7, both the overall cost and the expenses related to individual components are presented. Without electronic control, power system, and the syringe, the total cost of the pump is estimated at \$20. It is noteworthy that 3D-printed bearings, as an alternative to conventional metal bearings, will effectively fulfill their function, resulting in cost and weight reductions (\$2). The remaining additive cost is also a maximum of \$20, as any

12V 2A AC-DC power supply and a low-cost Arduino board along with the CNC shield are deemed sufficient. Additionally, by utilizing an existing standard FDM 3D printer's stepper motor pin and its user interface—such as the X-axis hub of the printer—there will be no additional cost. Also, generic PE syringes are also very affordable, priced at under \$1.

Table 7. Cost list of the used components.

Name	Cost (\$)
3D parts	5
Step motor (17HS4401S)	10
Pulleys (2GT-20T X 1, idler pulley X 1)	1
Bearings (608ZZ X 4)	2
GT2 belt (40 cm)	2
Syringe	1
Arduino UNO (clone), CNC shield (OEM), 12V power supply (OEM), connectors	20
Total for the pump mechanism only	20
Total	<41

In Table 8, we present a comparative analysis between our 3D-printed syringe pump and those documented in the literature. The focus is on the cost, the extent of the requirement for non-3D printed parts, and the weight excluding stepper and controller electronics. In one study, Samokshin designed a pump with 3 μL precision using Arduino and a 3D printer (Samokshin 2020). However, the design necessitated the inclusion of additional components (lead screw nut, lead screw, and guide rod), which increased the weight and cost of the pump. Rogosic et al. designed a low-cost, customizable 3D-printed pump notable for its scalability and compactness (Rogosic et al. 2022). However, the linear rail design necessitated the use of metal parts, impacting cost-effectiveness. García et al. designed a dual-channel syringe pump using 3D printing, but the design included metal linear transmitters and relied on a heavy stand, reducing its portability (Garcia et al. 2018). Gervasi et al. designed a highly compact and portable syringe pump using open-source hardware and 3D printing, significantly reducing the cost through their practical design (Gervasi et al. 2021). However, the use of threaded rods in the linear rail system introduces limitations: it slightly increases both cost and weight, and as highlighted by Gervasi et al., introduces backlash problems that could affect precision.

Table 8. Comparative analysis with literature.

Reference	Cost	Not 3D printed parts	Weight
Our study.	18 or 20\$	Screws-nuts, metal bearings (optional), pulleys	<250g
(Samokhin, 2020).	50 or 100	Metal bearings, lead screw and guide rods, screw-nuts, flanged round lead screw nut.	>500g
(Rogosic et al., 2022).	100 €	Metal bearings, lead screw and guide rods, flanged round lead screw nut, screw-nuts.	>500g
(Garcia et al., 2018).	>100\$	Metal bearings, lead screw and guide rods, screw-nuts, flanged round lead screw nut.	>500g
(Cubberley & Hess, 2017).	60\$	Lead screw, screw-nuts, flanged round lead screw nut.	>500g
(Gervasi et al., 2021).	50\$	Lead screw, screw-nuts, flanged round lead screw nut.	>250g
(Baas & Saggiomo, 2021).	30 €	A complete 3D printer is required.	
(Ağır, 2023).	2\$	A complete 3D printer is required.	<50g

Studies have shown that incorporating more non-3D-printed parts increases both cost and overall weight (Table 8). Our pump is distinguished by its reduced weight, a higher prevalence of 3D-printed components in contrast to traditional metal counterparts, and a lower overall cost. Also, several studies have described 3D-printed syringe pumps offering significant advantages in terms of cost and weight (Baas and Saggiomo 2021, Ağır 2023). However, these designs necessitate a functional 3D printer and lack standalone operation capabilities.

Additionally, in our experiments, to achieve lower costs and weight, we printed all 3D parts at 50% infill without compromising the mechanical stability and function of the pump, resulting in a 9% reduction in filament weight (first value of the range given in the table).

4. Conclusion

We presented a low-cost 3D-printed syringe pump, which offers versatility and practical utility in laboratory and research settings. In applications where the angle with respect to gravity may change, a standard lead screw often experiences varying backlash. Our choice of the belt drive over the lead screw effectively eliminated backlash issues. In this manner, we have also enabled unrestricted and real time rotation of the syringe pump in three dimensions. By implementing a 3D-printed linear rail with a belt drive mechanism, we successfully reduced the cost of a standalone 3D-printed syringe pump to \$20 USD and its weight to 225 grams (excluding stepper and controller electronics). This pump design holds promise for enabling local production of 3D-printed syringe pumps, particularly in resource-scarce settings, thus enhancing their accessibility and usability in these regions. The described cost and weight, and as highlighted by Gervasi et al., introduces backlash problems that could affect precision. 3D syringe pump offers numerous potential applications within the biomedical and biotechnology domains,

including fluid control in bioreactor setups, flow injection systems, tissue engineering, and drug delivery.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Author: Conceptualization, investigation, methodology and software, visualization and writing – original draft, funding acquisition

Declaration of Competing Interest

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

Data Availability Statement

All data generated or analyzed during this study are included in this published article. (Datasets are available on request. The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation). 3D models can be accessed on our online repository at <http://github.com/ismailagir/BD3DSP>.

5. References

- Ağır İ., 2023. *Using the 3D printer as a programmable syringe pump*. The ICASEM 4th International Applied Sciences, Engineering, and Mathematics Congress. Tekirdağ, Türkiye, 215–223.
- Baas S., Saggiomo V., 2021. Ender3 3D printer kit transformed into open, programmable syringe pump set. *HardwareX*, **10**, e00219. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00219>
- Barik BB, Mahanty A, Majumder SD, Roy Goswami A., 2023. Fabrication of Cost-effective Three-axis portable mini-CNC milling Machine. *Mater Today: Proceedings*. (Article in press) <https://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.012>
- Beaman JJ, Bourell DL, Seepersad CC, Kovar D., 2020. Additive Manufacturing Review: Early Past to Current Practice. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, **142(11)**, 110812-20.

- <https://dx.doi.org/10.1115/1.4048193>
- Bolat Ç., Ergene B., Ispartall H., 2023. A comparative analysis of the effect of post-production treatments and layer thickness on tensile and impact properties of additively manufactured polymers. *International Polymer Processing*, **38(2)**, 244-256.
<https://dx.doi.org/10.1515/ipp-2022-4267>
- Booeshaghi AS, Beltrame E da V, Bannon D, Gehring J, Pachter L., 2019. Principles of open-source bioinstrumentation applied to the poseidon syringe pump system. *Scientific Reports*, **9(1)**:1–8.
<https://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-48815-9>
- Cubberley MS, Hess WA., 2017. An inexpensive programmable dual-syringe pump for the chemistry laboratory. *J Chem Educ*, **94(1)**:72–74.
<https://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00598>
- Darling C., Smith DA., 2021. Syringe pump extruder and curing system for 3D printing of photopolymers. *HardwareX*, **9**: e00175.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00175>
- Ergene B., 2022. Simulation of the production of Inconel 718 and Ti6Al4V biomedical parts with different relative densities by selective laser melting (SLM) method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **37 (1)**, 469 - 484
<https://dx.doi.org/10.17341/GAZIMMFD.934143>
- Ergene B., Atlihan G., Pinar AM., 2023. Experimental and finite element analyses on the vibration behavior of 3D-printed PET-G tapered beams with fused filament fabrication. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, **19(4)**, 634-651.
<https://dx.doi.org/10.1108/MMMS-11-2022-0265>
- Ergene B., Bolat Ç., 2022. An experimental investigation on the effect of test speed on the tensile properties of the PETG produced by additive manufacturing. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, **6(2)**, 250-260.
<https://dx.doi.org/10.46519/ij3dptdi.1069544>
- Garcia VE, Liu J, DeRisi JL., 2018. Low-cost touchscreen driven programmable dual syringe pump for life science applications. *HardwareX*, **4**, e00027.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00027>
- Gervasi A., Cardol P., Meyer PE., 2021. Open-hardware wireless controller and 3D-printed pumps for efficient liquid manipulation. *HardwareX*, **9**, e00199.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00199>
- Gucluer S., 2023. A Miniaturized Archimedean Screw Pump for High-Viscosity Fluid Pumping in Microfluidics. *Micromachines*, **14(7)**:1409
<https://dx.doi.org/10.3390/mi14071409>
- Juarez A, Maynard K, Skerrett E, Molyneux E, Richards-Kortum R, Dube Q, Maria Oden Z., 2016. AutoSyP: A Low-Cost, Low-Power Syringe Pump for Use in Low-Resource Settings. *Am J Trop Med Hyg.*, **95(4)**, 964-969.
<https://dx.doi.org/10.4269/ajtmh.16-0285>
- Kashaninejad N, Nguyen NT., 2023. Microfluidic solutions for biofluids handling in on-skin wearable systems. *Lab Chip*, **23(5)**, 913–937.
<https://dx.doi.org/10.1039/d2lc00993e>
- Khalid MS, Jaleed SM, Zafar A, Khan SA, Ur Rehman HZ, Khan ZH., 2023. *Design and Experimental Verification of a Laser Engraving Machine*. 2023 International Conference on Emerging Power Technologies. Topi, Pakistan, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/ICEPT58859.2023.10152428>
- Klar V, Pearce JM, Kärki P, Kuosmanen P., 2019. Ystruder: Open source multifunction extruder with sensing and monitoring capabilities. *HardwareX*, **6**, e00080.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00080>
- Kukla M, Tarkowski P, Malujda I, Talaška K, Górecki J., 2016. Determination of the torque characteristics of a stepper motor. *Procedia Engineering*, **136**, 375-379.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.226>
- Lake JR, Heyde KC, Ruder WC., 2017. Low-cost feedback-controlled syringe pressure pumps for microfluidics applications. *PLoS One*, **12(4)**, e0175089-12.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175089>
- Leuthner, M., & Hayden, O., 2024. Grease the gears: how lubrication of syringe pumps impacts microfluidic flow precision. *Lab on a Chip*, **24(1)**, 56-62.
<https://doi.org/10.1039/D3LC00698K>
- Liu DS, Lin PC, Lin JJ, Wang CR, Shiau TN., 2019. Effect of environmental temperature on dynamic behavior of an adjustable preload double-nut ball screw. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **101**, 2761–2770.
<https://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-2966-x>
- Luo W, Liu G, Wang H., 2022. Study on Anti-backlash Mechanism Used in Precise Transmission: A Review. *Mechanisms and Machine Science*. **111**, 449–1470.
https://dx.doi.org/10.1007/978-981-16-7381-8_89

- Mapley M, Lu Y, Gregory SD, Pauls JP, Tansley G, Busch A., 2020. Development and validation of a low-cost polymer selective laser sintering machine. *HardwareX*, **8**, e00119.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00119>
- Ozer T, Agir I, Henry CS., 2022. Rapid prototyping of ion-selective electrodes using a low-cost 3D printed internet-of-things (IoT) controlled robot. *Talanta*, **247**, 123544-8.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123544>
- Pusch K, Hinton TJ, Feinberg AW., 2018. Large volume syringe pump extruder for desktop 3D printers. *HardwareX*, **3**, 49–61.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.ohx.2018.02.001>
- Rogosic R, Poloni M, Marroquin-Garcia R, Dimech D, Passariello Jansen J, Cleij TJ, Eersels K, van Grinsven B, Diliën H., 2022. Cost-effective, scalable and smartphone-controlled 3D-Printed syringe pump - From lab bench to point of care biosensing applications. *Physics in Medicine*, **14**, 100051-6
<https://dx.doi.org/10.1016/j.phmed.2022.100051>
- Samokhin AS., 2020. Syringe Pump Created using 3D Printing Technology and Arduino Platform. *Journal of Analytical Chemistry*, **75(3)**, 416–421.
<https://dx.doi.org/10.1134/S1061934820030156>
- Schreiber DA, Richter F, Bilan A, Gavrilov P V., Man Lam H, Price CH, Carpenter KC, Yip MC., 2020. *ARCSnake: An Archimedes' Screw-Propelled, Reconfigurable Serpentine Robot for Complex Environments*. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Paris, France, 7029-7034.
<https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196968>
- Shah J, Snider B, Clarke T, Kozutsky S, Lacki M, Hosseini A., 2019. Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **104**, 3679–3693.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04074-6>
- Tashman JW, Shiwarski DJ, Feinberg AW., 2022. Development of a high-performance open-source 3D bioprinter. *Scientific Reports*, **12**, 1–9.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-26809-4>
- Wang B, Si Y, Chadha C, Allison JT, Patterson AE., 2018. Nominal Stiffness of GT-2 Rubber-Fiberglass Timing Belts for Dynamic System Modeling and Design. *Robotics*, **7(4)**, 75.
<https://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-26809-4>
- Wang Y, Li L, Ang WT, Gan L, Wang L, Huang F., 2023. Adaptive Backlash Compensation for CNC Machining Applications. *Machines*, **11**, 193-14.
<https://dx.doi.org/10.3390/machines11020193>