

ISSN : 1305-7820
E-ISSN : 2587-165X

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ



İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ

Yıl:24 Sayı:47 2025-Bahar
Year:24 Vol:47 2025-Spring

Istanbul Commerce University
Journal of Science

ISSN : 1305-7820
E-ISSN: 2587-165X



İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ **DERGİSİ**

Yıl: 24
Year: 24

Sayı: 47
Volume: 47

Bahar 2025
Spring 2025

Istanbul Commerce University
Journal of Science



İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

İstanbul Commerce University Journal of Science

<http://dergipark.org.tr/ticaretfbid>



İstanbul Ticaret Üniversitesi Adına Sahibi <i>Owner on behalf of İstanbul Ticaret University</i>	Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi Rektörü Rector of İstanbul Ticaret University</i>
Editör <i>Editor</i>	Prof. Dr. Berk AYVAZ <i>İstanbul Ticaret University</i>
Yardımcı Editör <i>Assistant Editor</i>	Arş. Gör. Dr. Kader ŞİMŞİR ACAR <i>İstanbul Ticaret University</i>
Dil Editörü <i>Language Editor</i>	Assist. Prof. Dr. Elif NURAY YILDIRIM <i>İstanbul Ticaret University</i>
Teknik Editör <i>Technical Editor</i>	Prof. Dr. Hanifi PARLAR <i>İstanbul Ticaret University</i>
Yayın Kurulu <i>Advisory Board</i>	Prof. Dr. Ali Osman KUŞAKCI <i>İbn Haldun University, İstanbul, Türkiye</i> Prof. Dr. Adnan ÇALIK <i>İsparta University of Applied Sciences, Isparta, Türkiye</i> Prof. Dr. Berk AYVAZ <i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i> Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU <i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i> Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK <i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i> Prof. Dr. Qamrul Hasan ANSARI <i>Aligarh Muslim University, Aligarh, India</i> Prof. Dr. Vatan KARAKAYA <i>Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye</i> Assoc. Prof. Dr. Mehmed Rafet ÖZDEMİR <i>Marmara University, İstanbul, Türkiye</i> Assoc. Prof. Dr. Muhammet CEYLAN <i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i> Dr. Kader ŞİMŞİR ACAR <i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü <i>Publishing Manager</i>	Halil İbrahim BİNİCİ <i>İstanbul Ticaret University</i>
Mizanpaj	Emre TOPÇU <i>İstanbul Ticaret University</i>
Yönetim Yeri <i>Head Office</i>	İstanbul Ticaret Üniversitesi / <i>İstanbul Ticaret University</i>
Yazışma Adresi <i>Corresponding Address</i>	Küçükalyalı E-5 Kavşağı, İnönü Cad. No: 4 Küçükalyalı-34840 İstanbul-TÜRKİYE Tel: 0 216 444 0 413 (3141) e-posta: fendergi@ticaret.edu.tr
İnternet Adresi <i>Web Address</i>	https://dergipark.org.tr/tr/pub/ticaretfbid

Yayın Türü <i>Publication Type</i>	Yerel Süreli / <i>Periodical</i> Yılda iki sayı yayımlanır: Bahar (Haziran) ve Güz (Aralık) <i>Two issues per year: Spring (June) and Fall (December)</i>
Yayın Dili <i>Publication Language</i>	Türkçe ve İngilizce / <i>Turkish and English</i>
Online Yayımlanmaktadır <i>Publication Online</i>	ISSN : 1305-7820 E-ISSN : 2587-165X

Dizinler / <i>Indexes</i>			
			
			
			

Alan Editörleri /Editorial Board

Prof. Dr. Abdül Halim ZAİM	Bilgisayar Mühendisliği <i>Computer Engineering</i>	<i>İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Adnan ÇALIK	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>	<i>Isparta University of Applied Sciences, Isparta, Türkiye</i>
Prof. Dr. Akram BEGMATOV	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Samarkand State University, Samarkand, Uzbekistan</i>
Prof. Dr. Ali FARAJZADEH	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Razi University, Kermanshah, Iran</i>
Prof. Dr. Ali Osman KUŞAKÇI	Endüstri Mühendisliği <i>Industrial Engineering</i>	<i>İbn Haldun University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Bayram Ali ERSOY	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Berk AYVAZ	Endüstri Mühendisliği <i>Industrial Engineering</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Bilal BİLALOV	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Emrah Evren KARA	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Düzce University, Düzce, Türkiye</i>
Prof. Dr. Farman MAMEDOV	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan</i>
Prof. Dr.Faik GÜRSOY	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Adıyaman University, Adıyaman, Türkiye</i>
Prof. Dr. Fatih NURAY	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Türkiye</i>
Prof. Dr. Fatih ÜSTÜNER	Elektrik Elektronik Mühendisliği / <i>Electrical Electronics Engineering</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr.Fuat USTA	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Düzce University, Düzce, Türkiye</i>
Prof. Dr. Hasan GENÇ	Kimya <i>Chemistry</i>	<i>Van Yüzüncü Yıl University, Van, Türkiye</i>
Prof. Dr. İdris KABALCI	Elektrik Elektronik Mühendisliği / <i>Electrical Electronics Engineering</i>	<i>Uşak University, Uşak, Türkiye</i>
Prof. Dr. İsmail KÜÇÜK	Elektrik Elektronik Mühendisliği / <i>Electrical Electronics Engineering</i>	<i>İstanbul Sabahattin Zaim University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU	Elektrik Elektronik Mühendisliği / <i>Electrical Electronics Engineering</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Metin BAŞARIR	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Sakarya University, Sakarya, Türkiye</i>
Prof. Dr. Metin GÜMÜŞ	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>	<i>Marmara University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Mikail ET	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Fırat University, Elâzığ, Türkiye</i>
Prof. Dr. Muammer KALYON	Mekatronik Mühendisliği <i>Mechatronics Engineering</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Muhammet DEVECİ	Endüstri Mühendisliği <i>Industrial Engineering,</i>	<i>Imperial Collage London, İngiltere</i>
Prof. Dr. Murat KİRİŞÇİ	Matematik / <i>Mathematics</i> Biyoistatistik / <i>Biostatistics</i>	<i>İstanbul University-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Murat KOCA	Kimya <i>Chemistry</i>	<i>Adıyaman University, Adıyaman, Türkiye</i>
Prof. Dr. Murat SARI	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye</i>

Prof. Dr. Mustafa KURT	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>	<i>Marmara University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Nedim TUTKUN	Elektrik Elektronik Mühendisliği / <i>Electrical Electronics Engineering</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Orhan İÇELLİ	Fizik <i>Physics</i>	<i>Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Serhan YARKAN	Elektrik Elektronik Mühendisliği / <i>Electrical Electronics Engineering</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Sibkat KAÇTIOĞLU	Endüstri Mühendisliği <i>Industrial Engineering</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Qamrul Hasan ANSARI	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Aligarh Muslim University, Aligarh, India</i>
Prof. Dr. Ünal Halit ÖZDEN	İstatistik <i>Statistics</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Vatan KARAKAYA	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Yasin ÜST	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>	<i>Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye</i>
Prof. Dr. Yusuf ZEREN	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. Abdullah DEMİR	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>	<i>Marmara University, İstanbul, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. Abdullah YENER	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. Ahmet Fatih TABAK	Mekatronik Mühendisliği <i>Mechatronics Engineering</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. Asıf YOKUŞ	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Firat University, Elazığ, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. Fatih ÖZTÜRK	Endüstri Mühendisliği <i>Industrial Engineering</i>	<i>İstanbul Medeniyet University, İstanbul, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. Furkan Türker SARICAOĞLU	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>	<i>Bursa Technical University, Bursa, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. İbrahim DEMİR	İstatistik <i>Statistics</i>	<i>Turkish Statistical Institute, İstanbul, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. Kadri DOĞAN	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Artvin Çoruh University, Artvin, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. Mehmed Rafet ÖZDEMİR	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>	<i>Marmara University, İstanbul, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. Merve İLKHAN KARA	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Düzce University, Düzce, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. Muhammet CEYLAN	Malzeme Mühendisliği <i>Materials Engineering</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Assoc. Prof. Dr. Tarık NAMAS	Bilgisayar Mühendisliği <i>Computer Engineering</i>	<i>International University of Sarajevo, Bosna Hersek</i>
Assoc. Prof. Dr. Yunus ATALAN	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>Aksaray University, Aksaray, Türkiye</i>
Assist. Prof. Dr. Amir ZAINALI	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>	<i>Virginia Tech, ABD</i>
Assist. Prof. Dr. Alihan KAYA	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>	<i>Ghent University, Belçika</i>
Assist. Prof. Dr. Vedat TAVAS	Elektrik Elektronik Mühendisliği / <i>Electrical Electronics Engineering</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>
Dr. Kader ŞİMŞİR ACAR	Matematik <i>Mathematics</i>	<i>İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i>

HAKEM LİSTESİ / REVIEWER LIST

Prof. Dr. Ali GÖRENER
Prof. Dr. Ayfer KOCABAŞ
Prof. Dr. Eren ŞAHİNER
Prof. Dr. Erol İSKENDER
Prof. Dr. Hikmet Hüseyin ÇATAL
Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ
Prof. Dr. Muhammed Ali AYDIN
Prof. Dr. Selçuk KUTLUAY
Assoc. Prof. Dr. Can EYÜPOĞLU
Assoc. Prof. Dr. Ceyhan AKSOYLU
Assoc. Prof. Dr. Emine Elif NEBATİ
Assoc. Prof. Dr. Erdem YAVUZ
Assoc. Prof. Dr. Göker AKSOY
Assoc. Prof. Dr. Mehmet KONAR
Assoc. Prof. Dr. Metin TOKUŞ
Assoc. Prof. Dr. Mustafa DOĞAN
Assoc. Prof. Dr. Özgür HAKLI TUTUŞ
Assoc. Prof. Dr. Serhat Berat EFE
Assoc. Prof. Dr. Utku ERDOĞAN
Assoc. Prof. Dr. Zeynep Ebru AYATA
Assist. Prof. Dr. Ahmet Furkan AYDOĞAN
Assist. Prof. Dr. Ahmet KARA
Assist. Prof. Dr. Ali Hakan TOR
Assist. Prof. Dr. Aysun GÜRAN
Assist. Prof. Dr. Beyhan İPEKYÜZ
Assist. Prof. Dr. Melek GÖKMEN KAYA
Assist. Prof. Dr. Salim CEYHAN
Assist. Prof. Dr. Seda ARIK HATİPOĞLU
Assist. Prof. Dr. Selcen ÇAKIR
Assist. Prof. Dr. Sercan SERİN
Assist. Prof. Dr. Serkan ETLİ
Assist. Prof. Dr. Volkan TUNALI
Dr. Ahmet Akkaya
Dr. Şükrü OKUL

Istanbul Ticaret University
Dokuz Eylül University
Ankara University
Karadeniz Technical University
Dokuz Eylül University
Selçuk University
İstanbul University-Cerrahpaşa
İnönü University
National Defence University
Konya Technical University
Istanbul Sabahattin Zaim University
Bursa Technical University
Gebze Technical University
Erciyes University
Van Yüzüncü Yıl University
Kırıkkale University
Muğla Sıtkı Koçman University
Bandırma Onyedil Eylül University
Eskişehir Technical University
Yıldız Technical University
University of North Caroline Wilmington
Hitit University
Abdullah Gül University
Dogus University
Dicle University
Usak University
Bilecik Selçuk Edebalı University
Erciyes University
Canakkale Onsekiz Mart University
Osmaniye Korkut Ata University
Kahramanmaraş Sutcu Imam University
University of the West of Scotland
Cukurova University
Scientific and Technological Research Council
of Turkey

EDİTÖRDEN

Değerli İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Okurları,

Dergimizin 24. yılında, 2025 Bahar döneminde yayımlanan 47. sayıyı değerli okurlara ulaştırmaktan onur duyuyoruz.

Dergimizin bu sayısında İnşaat Mühendisliği, Fizik, Bilgisayar Mühendisliği, Kimya, Endüstri Mühendisliği, Matematik ve Elektrik Mühendisliği alanlarından on altı makaleyi siz okurlarımızın istifadesine sunmaktan mutluyuz.

Bu sayıda, üniversitemiz içinden ve dışından çalışmalarını bizim aracılığıyla okuyucularıyla paylaşan yazarlarımıza, makalelerin hakemlik süreçlerine itinalı çalışmaları ile katkıda bulunan değerli akademisyenlere ve derginin hazırlanmasında emeği geçen çalışma arkadaşlarımıza teşekkürlerimizi sunarız.

Sayının fen bilimleri alanında değindiği konulara özgün ve güncel bakış açıları kazandırmasını temenni eder, bir sonraki sayıda okuyucularımızla buluşmayı dileriz.

Prof. Dr. Berk AYVAZ
Fen Bilimleri Dergisi Editörü

EDITORIAL POST

Dear Readers of İstanbul Commerce University Journal of Science,

In the 24th year of our journal, we are honored to share with you our esteemed readers the 47th issue of the Spring 2025 edition.

In this issue, we are pleased to publish sixteen articles from the fields of Civil Engineering, Physics, Computer Engineering, Chemistry, Industrial Engineering, Mathematics and Electrical Engineering to the readers.

We are eternally grateful to our writers who share their original scientific paper with the readers and our colleagues who have contributed to the preparation of the journal and the valuable academicians.

We hope that the issue will provide unique and actual scientific view into the subjects of natural science. Looking forward to meet with the next issue.

Prof. Dr. Berk AYVAZ
Editor

YAYIN POLİTİKASI

Dergimizde yazarların çalışmalarını makale olarak yayımlamaları, okuyucuların makale okumaları ve indirmeleri ücretsizdir. Aynı şekilde hakem değerlendirmesi ve yayımlanma sürecinde de ücret talep edilmemektedir. Dergimizin tüm sayılarına <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ticaretfbid> adresinden ulaşılabilir.

Dergimize yayınlanmak üzere gönderilen çalışmalar, benzerlik kontrol yazılımı olan İntihal.Net ile kontrol edilir. Çift-körleme hakem değerlendirme sürecine sadece benzerlik oranı $\leq$ % 20 çalışmalar alınır. Bu durumda değilse yazar/lar'dan çalışmanın tekrar revize edilerek yüklenmesi istenir. Benzerlik oranı % 20'den yüksekse, başvuru reddedilir.

Dergimize gönderilen makaleler için değerlendirme aşamaları aşağıdaki gibidir;

1. Makale Ön İncelemeye alınır;

- Makalenin yazım formatı incelenir ve İntihal.Net programı ile benzerlik taraması yapılır.
- Makalenin örnek makale şablonuna uygunluğu kontrol edilir.
- Şablona uymayan makaleler yazara bildirilir ve makalenin düzeltilmesi istenir.
- Makale sunum ve telif hakkı devir formu bilgilerinin kontrolü yapılır.

2. Makale Değerlendirme aşamasına geçer.

- Dergimiz makale değerlendirme sürecinde hakem ve yazarlar birbirlerinin bilgilerini göremediği çift-körleme hakemlik sistemini kullanmaktadır.
- Makaleye en az iki hakem ataması yapılır. Hakemlere değerlendirme için 21 gün süre tanınır. Değerlendirme süreci tamamlanmazsa ek 7 gün süre verilir.
- Makalenin sonucu ret, düzeltme ya da kabul olabilir. Sonuca göre aşağıdaki madde/maddeler uygulanır:
 - Hakem görüşlerinin çoğunluğu doğrultusunda makale ret edilmişse süreç sonlandırılır ve makale reddedilir. Eşitlik durumu söz konusu ise üçüncü hakem ataması yapılır.
 - Makale için düzeltme istenirse hakem görüşleri doğrultusunda yazarın düzeltmeleri yapması istenir.
 - Makale kabul alırsa düzenleme aşamasına geçilir.

3. Mizanpaj aşamasında, düzeltmeler gerekirse yazardan istenir.

4. Süreç tamamlanır ve yazara bilgilendirme mesajı gönderilir.

Makale kabul süreci ortalama 3 ay sürmektedir.

İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Budapeşte Açık Erişim Girişimi'ne bağlı kalır ve Açık Erişim politikasını orijinal BOAI'da geliştirilen tanıma göre tanımlar:

Açık Erişim, “Hakem denetimli bilimsel literatürün, internet aracılığıyla; finansal, yasal ve teknik engeller olmaksızın, erişilebilir, okunabilir, kaydedilebilir, kopyalanabilir, yazdırılabilir, taranabilir, tam metne bağlantı verilebilir, dizinlenebilir, yazılıma veri olarak aktarılabilir ve her türlü yasal amaç için kullanılabilir olması”dır. [Bknz, <https://www.budapestopenaccessinitiative.org/translations/turkish-translation>]

PUBLICATION POLICY

In our journal, it is free for authors to publish their works as articles, and for readers to read and download articles. Likewise, no fee is charged during the referee evaluation and publication process. All issues of our journal can be accessed at <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ticaretfbid>.

Manuscript sent to our journal for publication are checked with İntihal.Net, a similarity checking software. Only manuscript with a similarity rate $\leq 20\%$ are included in the double-blind peer-review process. If this is not the case, the author/s are requested to revise and upload the manuscript again. If the similarity rate is higher than 20%, the application is rejected.

The evaluation stages for the articles sent to our journal are as follows;

1. The article is taken to Preliminary Review;
 - The format of manuscript is checked and İntihal.Net programme is used for the plagiarism.
 - Compliance of the article with the sample article template is checked.
 - Articles that do not fit the template are reported to the author and the article is requested to be corrected.
 - Article presentation and copyright transfer form information is checked.
 2. The article goes to the evaluation stage.
 - The journal has double-blind peer-review system in which the referees and authors cannot see each other's information in the article review process.
 - At least two referees are assigned to the article. Referees are given 21 days for review. If the evaluation process is not completed, an additional 7 days is given.
 - Conclusion to the article can be rejection, correction or acceptance. According to the result, the following article/s are applied:
 - If the article is rejected in line with the majority of the referee's opinions, the process is terminated and the article is rejected. In case of equality, the 3rd referee is appointed.
 - If corrections are requested for the article, the author is requested to make them in line with the referee's comments.
 - If the article is accepted, it goes to the editing stage.
 3. At the layout stage, if some corrections needed, it is requested from the author.
 4. The process is completed and a notification message is sent to the author.
- The article review process is almost 3 months.

Istanbul Commerce University Journal of Sciences adheres to the Budapest Open Access Initiative and defines Open Access policy according to the definition developed in the original BOAI:

By "open access" to peer-reviewed scientific literature, we mean its free availability on the public internet, permitting any users to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of these articles, crawl them for indexing, pass them as data to software, or use them for any other lawful purpose, without financial, legal, or technical barriers other than those inseparable from gaining access to the internet itself. [See, <https://www.budapestopenaccessinitiative.org/read>]



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

- STİREN AKRİLİK KOPOLİMER KULLANIMININ ÇİMENTO
ESASLI KOMPOZİT HARÇLARIN PERFORMANSINA ETKİSİ** 1
*INFLUENCE OF USING STYRENE ACRYLIC COPOLYMER ADDITIVE ON THE
PERFORMANCE OF CEMENT BASED COMPOSITE MORTARS*
Şevket Onur KALKAN, Lütfullah GÜNDÜZ

- SUGGESTIONS FOR SOLUTIONS TO URBAN TRANSPORTATION
PROBLEMS WITH INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS:
THE CASE OF KARABÜK** 23
*KENT İÇİ ULAŞIM SORUNLARINA AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİYLE
ÇÖZÜM ÖNERİLERİ: KARABÜK ÖRNEĞİ*
Özlem BATTAL ŞAL, Abdalla ELMAADAWY

- AYNI DÖŞEME BOŞLUK ORANINA SAHİP BETONARME
BİNALARDA BOŞLUK KONUMUNUN YAPISAL DAVRANIŞA
ETKİSİNİN DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ** 42
*INVESTIGATION WITH LINEAR AND NONLINEAR METHODS OF THE EFFECT
ON BEHAVIOR OF OPENING LOCATION IN REINFORCED CONCRETE BUILDINGS
WITH THE SAME SLAB OPENING RATIO*
Samet Oğuzhan DOĞAN, İsmail TOZLU, Şenol GÜRSOY

Fizik / Physics

- MATHEMATICAL MODELING OF QUARTZ LUMINESCENCE
SIGNALS FOR EARTHQUAKE DETECTION** 60
*DEPREM TESPİTİ İÇİN KUVARS LÜMİNESANS SİNYALLERİNİN
MATEMATİKSEL MODELİNİN OLUŞTURULMASI*
Oğuzhan DERVİŞAĞAOĞLU, Berkay CAMGÖZ

Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering

LINUX PLATFORMUNDA MITRE ATT&CK MATRİSİ KULLANARAK SALDIRI PLANLAMA VE UYGULAMA **84**

ATTACK PLANNING AND IMPLEMENTATION USING MITRE ATT&CK MATRIX ON LINUX PLATFORM

Suat TOKSÖZ, Metin TURAN

INTEGRATING ECONOMETRIC AND DEEP LEARNING MODELS FOR ENERGY PRICE PREDICTION: A HYBRID APPROACH USING WEATHER AND MARKET DATA **135**

ENERJİ FİYATI TAHMİNİ İÇİN EKONOMETRİK VE DERİN ÖĞRENME MODELLERİNİN ENTEGRASYONU: HAVA DURUMU VE PİYASA VERİLERİNİ KULLANAN KARMA BİR YAKLAŞIM

Cemal ÖZTÜRK

PERFORMANCE COMPARISON OF SMOTE-BASED MACHINE LEARNING MODELS ON UNBALANCED DATASETS: A STUDY ON DATE AND PISTACHIO FRUITS **176**

SMOTE TABANLI MAKİNE ÖĞRENMESİ MODELLERİNİN DENGESİZ VERİ KÜMELERİ ÜZERİNDE PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI: HURMA VE ANTEP FISTIĞI MEYVELERİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Fatih BAL, Fatih KAYAALP

TAGUCHI METHOD-BASED MAN-HOUR OPTIMIZATION FOR BOEING 777 A-CHECK INTERVAL **201**

BOEING 777 A-BAKIM ARALIĞI İÇİN TAGUCHI METODU TABANLI ADAM-SAAAT OPTİMİZASYONU

Cahit BİLGİ, Can EYÜPOĞLU, Abdullah BÜLBÜL

Kimya / Chemistry

SYNTHESIS, EVALUATION OF ANTIFUNGAL ACTIVITY AND DRUG-LIKENESS OF BENZOYL THIOUREA DERIVATIVES **217**

BENZOİL TİYOÜRE TÜREVLERİNİN SENTEZİ, ANTİFUNGAL AKTİVİTESİNİN VE İLAÇ OLABİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Şule EROL GÜNAL, Engin KAPLAN

Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering

BİR VANA ÜRETİM SÜRECİNDEKİ İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ RİSKLERİNİN BULANIK HATA TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ **229**

EVALUATION OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY RISKS IN A VALVE PRODUCTION PROCESS WITH FUZZY FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

Gökmen TAK, Fatih ÖZTÜRK

Matematik / Mathematics

FIFTH-ORDER COMPACT FINITE DIFFERENCE SCHEME FOR BURGERS-HUXLEY EQUATION 249

*BURGERS-HUXLEY DENKLEMİ İÇİN BEŞİNCİ MERTEBEDEN
KOMPAKT SONLU FARK ŞEMASI*
Canan AKKOYUNLU

INVESTIGATING THE EFFECTS OF MATHEMATICAL MUSIC ON EEG BRAINWAVE FREQUENCIES 261

*MATEMATİKSEL MÜZİĞİN EEG BEYİN DALGA FREKANSLARI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI*
Cemil KARAÇAM, Halil YAKIT, Şerif Efe DARTAR, Kayra Ege ALTUN

Elektrik Mühendisliği / Electrical Engineering

DESIGN OF PASSIVE HARMONIC FILTER FOR THE CLAW-POLE SYNCHRONOUS GENERATORS UNDER NON-LINEAR LOADING 284

*PENÇE-KUTUPLU SENKRON GENERATÖRLER İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN YÜKLEME
ALTINDA PASİF HARMONİK FİLTRE TASARIMI*
Yusuf TOPRAK, Oktay KARAKAYA, Şevket CANTÜRK, Murat Erhan BALCI

DEVELOPMENT OF AN EMBEDDED SYSTEM-BASED COLD CATHODE VACUUM MEASUREMENT SYSTEM FOR (ULTRA HIGH VACUUM) UHV APPLICATIONS 303

*ULTRA YÜKSEK VAKUM UYGULAMALARI İÇİN GÖMÜLÜ SİSTEM TABANLI
SOĞUK KATOT VAKUM ÖLÇÜM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ*
Tarık ÜNLER

Derleme Makaleler / Review Articles

Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering

A COMPREHENSIVE SURVEY OF NEXT-GENERATION OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR TARGET COVERAGE IN MOBILE WIRELESS SENSOR NETWORKS 318

*MOBİL KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA HEDEF KAPSAMA İÇİN YENİ NESİL
OPTİMİZASYON ALGORİTMALARINA YÖNELİK KAPSAMLI BİR DERLEME*
Gözde BAYAT, Eyüp Emre ÜLKÜ, Buket DOĞAN

Kimya / Chemistry

OTOİMMÜN HASTALIKLARDA GLİKAN BİYOBELİRTEÇLERİN KEŞFİ: TANI VE TEDAVİDE SON GELİŞMELER 349

*DISCOVERY OF GLYCAN BIOMARKERS IN AUTOIMMUNE DISEASES:
RECENT ADVANCES IN DIAGNOSIS AND TREATMENT*
Müşerref ÇAĞLI, Rafiq GURBANOV, İsmail POYRAZ



STİREN AKRİLİK KOPOLİMER KULLANIMININ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT HARÇLARIN PERFORMANSINA ETKİSİ

INFLUENCE OF USING STYRENE ACRYLIC COPOLYMER ADDITIVE ON THE PERFORMANCE OF CEMENT BASED COMPOSITE MORTARS

Şevket Onur KALKAN¹

Lütfullah GÜNDÜZ²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1467719>

Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

Geliş Tarihi
(Received)
14.04.2024

Revizyon Tarihi
(Revised)
10.02.2025

Kabul Tarihi
(Accepted)
10.02.2025

Öz

Son yıllarda, çimentolu ürünlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla polimer katkıların önem kazandığı görülebilmektedir. Bu katkılardan önemli bir tanesi de stiren akrilik kopolimer katkıdır. Bu çalışmada, stiren akrilik kopolimer (SAK) kullanımının çimento esaslı kompozit harçların performansı üzerindeki etkisine, özellikle, SAK kullanımının harçtaki yayılma, birim hacim ağırlık, su emme, eğilme ve basınç dayanımı, büzülme ve şişme karakteristiğine olan etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, SAK ile çimento yer değiştirme oranı arttıkça harçların yayılma ve kuru ve yaş birim hacim ağırlık değerleri azalmıştır. SAK kullanımının en önemli olumlu katkısı ise SAK kullanım oranı arttıkça harçların kütlece su emme değerlerinin azalması ve eğilme dayanımlarının önemli ölçüde iyileşmesi olarak tespit edilmiştir. Bunun yanında SAK kullanım oranı arttıkça harçların basınç dayanımları ve şişme değerleri azalmış, büzülme değerlerinin ise arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimer, stiren akrilik kopolimer, hafif harç, kompozit harç, performans.

Abstract

In recent years, it can be seen that polymer admixtures have gained importance in order to improve the physical and mechanical properties of cementitious products. One of these admixtures is the styrene acrylic copolymer admixture. In this study, the effect of styrene acrylic copolymer (SAK) use on the performance of cement-based composite mortars, especially the effects of SAK use on the dispersion, unit volume weight, water absorption, bending and compressive strength, shrinkage and swelling characteristics of the mortar, were investigated. According to the study results, as the cement displacement rate with SAK increased, the spread and dry and wet unit volume weight values of the mortars decreased. It has been determined that the most important positive contribution of the use of SAK is that as the rate of SAK usage in mortars increases, the mass water absorption values of the mortars decrease, and their bending strength improves significantly. In addition, it was observed that as the SAK usage rate increased, the compressive strength and swelling values of the mortars decreased, and the shrinkage values increased.

Keywords: Polymer, styrene acrylic copolymer, lightweight mortar, composite mortar, performance.

¹ İzmir Kâtip Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye.
sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

² İzmir Kâtip Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye.
lutfullah.gunduz@ikcu.edu.tr

1. GİRİŞ

Polimer modifiyeli çimento malzemelerinin avantajları birçok araştırmacı tarafından incelenmektedir (Aggarwal ve ark, 2007; Kharazian ve ark, 2019; Lee, 2017; Su ve ark, 1996). Polimer modifiyesi çimento bazlı malzemelerin işlenebilirliğini, yapışma gücünü, su direncini, çekme dayanımını ve birçok başka avantajını geliştirmek birçok çalışmada incelenmiştir (Kharazian ve ark., 2019). Özellikle aşırı ortamlara maruz kalan köprüler ve pistlerde uygulanan polimer modifiyeli harçlar hem son kat harçlarında hem de onarımlarda kullanılmaktadır (Kharazian ve ark., 2019). Çimentolu ürünlerin bu tip özelliklerini iyileştirmek ve olumsuz durumların üstesinden gelmek için yapılan çalışmalar, polimerler için en iyi kimyasal bileşimi bulma üzerine odaklanmıştır. Bunun yanında, daha çevreci ürünlerin üretilmesi ve atık değerlendirilmesi bağlamında yapılan bilimsel çalışmalarda, atık polimerlerin yapı malzemeleri ve özellikle beton içerisinde kullanımı ve betonun fiziksel mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi de son yıllarda artan polimer üretimi ve atık polimer meydana gelmesi ile artmaktadır (Gesoglu ve ark., 2017; Akgül ve ark., 2020; Etlı, 2023; Akgül & Etlı, 2024; Etlı 2024;). Polimer teknolojisindeki gelişmeler, 20. yüzyıl boyunca sentezlenen daha ileri seviye lateksler, reçineler ve polimerler için fırsat sağlamaktadır. Polimerler ilave edilerek üretilen çimentolu ürünler, organik polimer malzemelerin performans özelliklerini ve inorganik silikat malzemeleri birleştirir ve polimer içeriğine göre iki kategoriye ayrılabilir (Ning ve ark., 2018). Birincisi, düşük polimer-çimento oranına sahip sert bir polimer çimento kompozitidir. Bu tür malzemeler, harç veya beton içinde yüksek moleküler polimer ile karıştırılarak harcın işlenebilirliğini, mekanik özelliklerini, dayanıklılığını artırır ve çeşitli fonksiyonel harç veya onarım malzemesi olarak kullanılabilir (Al-Zahrani ve ark., 2003; Lho ve ark., 2012; Ma & Li, 2013; Medeiros ve ark., 2009; Mirza ve ark., 2002; Ohama, 1997, 1998; Senff ve ark., 2015; Zhong & Chen, 2002). Diğeri ise yüksek polimer-çimento oranına sahip esnek bir polimer çimento kompozit malzemedir. Yüksek polimer içeriği nedeniyle, organik yüksek moleküler polimer ile çimento arasında karmaşık bir çapraz bağlama reaksiyonu meydana gelir, bu da iyi bir bağ performansı ve su geçirmezlik performansı sergiler (Diamanti ve ark., 2013; Ning ve ark., 2018; Xue ve ark., 2015). Bu tip önemli özelliklerinden dolayı son yıllarda selüloz, doğal kauçuk, polivinil asetatlar (PVA), vinil asetat/etilen kopolimerleri, akrilik polimerler, stiren-bütadien kauçuk ve epoksi reçineler, beton ve çimento bazlı malzemeleri modifiye etmek için yaygın olarak kullanılan bir dizi polimerdir (Aggarwal ve ark., 2007; Assaad, 2018; Assaad & Gerges, 2019; Assaad & Issa, 2017; Muhammad & Ismail, 2012).

1.1. Literatür Çalışması

Akrilik polimerler, Portland çimento kompozitlerini modifiye etmek için 50 yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır. Akrilik terimi, benzer bir kimyasal yapıya sahip ancak geniş bir özellik yelpazesine sahip malzemelerin büyük bir polimer ailesini ifade etmektedir (Lavelle, 1988). Stiren-akrilik kopolimeri (SAK), çimento harcında kullanılan akrilik polimerler ailesinde önemli bir rol oynamaktadır. Uygun bir SAK emülsiyonu çimentoya eklendiğinde, SAK/çimento oranının artmasıyla dinamik elastik modül azalabilmektedir. Belirli bir sönümlenme kapasitesi, darbe mukavemeti ve aşındırıcılık, SAK/çimento oranının artmasıyla artabilmektedir (Wang & Wang, 2010; Wong ve ark., 2003). Schulze ve ark (Schulze & Killermann, 2001), stiren-akrilik (SA) ile modifiye edilmiş harçların açık hava ve kapalı ortam ikliminde 10 yıl süresince

kararlı mekanik değerler ve mikroyapı sergilediğini tespit etmiştir. Ohama ve ark. (1991), monomer oranının stiren-bütül akrilat lateksli polimer modifiyeli harçların tipik özellikleri üzerindeki etkisini rapor etmiştir. Sonuç olarak özellikler hem monomer oranından hem de polimer-çimento oranından büyük ölçüde etkilenmiştir. Pei ve ark. (2002), stiren-bütül akrilat kopolimeri modifiye edilmiş harç üzerinde emülgatör tiplerinin etkisini incelemiş ve makromolekül emülgatörlerin düşük moleküllü olanlardan daha iyi performans gösterdiğini sonucuna varmışlardır. Cemalgil ve ark. (2018) deneysel olarak stiren-bütadien kauçuk (SBR) ile kauçuklaştırılmış harcın (RM) mekanik özellikleriyle ilgili araştırma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, SBR kullanımının artması erken kürlenme yaşında harcın eğilme dayanımını azalttığını göstermiştir. Ayrıca, harcın mekanik özellikleri, SBR yer değiştirme seviyesinin artan oranıyla su kürü süresinden önemli ölçüde etkilenmiştir. Feiteira & Ribeiro (2013), sırasıyla modifiye edici olarak stiren-bütadien kauçuk lateksi, stiren-akrilik lateksi ve epoksi polimerini kullanarak çimento bazlı harcın alkali-silika reaksiyonu üzerinde polimer türlerinin etkilerini incelemiş ve polimerin katılmasının alkali-silika reaksiyonunu sınırlandırabileceğini bulmuşlardır. Zhang ve ark. (2019) stiren-akrilik kopolimer lateksin (SA), Portland çimentosu/kalsiyum alüminat çimentosu/alçıtaşı bazlı üçlü bağlayıcı sistem harcı üzerindeki etkileri, mekanik özellikler, çekme bağ mukavemeti ve su emme değerlerini incelenmiştir. Sonuçlar, SA polimerinin eklenmesiyle üçlü bağlayıcı harcının eğilme mukavemetinin ve çekme bağ mukavemetinin geliştirilebileceğini göstermiştir. Wang ve Wang (Wang & Wang, 2010) stiren-akrilik ester kopolimer (SAE) lateksinin çimento harcı performansı üzerindeki etkisine, SAE lateksinin harçtaki su azaltma ve su tutma etkileri, taze harcın hava içeriği ve kütle yoğunluğu ile sertleşmiş harcın kütle yoğunluğu, basınç ve eğilme mukavemetleri, büzülme oranı, kılcal su absorpsiyonu üzerine deneysel çalışma yapmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, SAE lateksinin harçta iyi su azaltma ve su tutma etkileri tespit edilmiştir. SAE lateksinin ayrıca hava sürüklenme etkisi de saptanmıştır. SAE lateksi, basınç dayanımının gelişimini etkilemiş ancak eğilme dayanımını çok az etkilemiş ve harcın tokluğunu, büzülme özelliğini, su geçirmezlik kalitesini önemli ölçüde artırmıştır. Cruz ve ark. (2021) stiren akrilik kopolimer ile çimento levhaların özelliklerini iyileştirmeyi denemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, polimer modifiyeli çimento levhaların su emme değeri, eskitme döngüleri sonrasında modifiye edilmemiş levhalara göre %50 oranında azalmıştır. Elastisite modülü değerlerinin %40'a kadar düşürülmüş ve levha büzülmesi %15 oranında azaltılarak levhanın sertliğinde iyileşmeler tespit edilmiş, levhaların boyutsal stabilitesi artırılmış ve selüloz lifinin çimentolu malzemeye yapıştırılmış halde tutulmasıyla liflerin mineralizasyon sürecinden çıkması engellenmiştir.

1.2. Çalışmanın Önemi

Literatürde, çimentolu ürünlerde polimer kullanımının çimentolu ürünün su emme, mukavemet, gözeneklilik gibi önemli özelliklerine etkisi uzun zamandır çalışla gelen bir araştırma konusu olsa da özellikle stiren akrilik kopolimer katkısının hafif harçlarda ve hafif kompozit harçlarda kullanımının harcın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmaların yeterli derecede olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, polimer modifiyesi çimentolu malzemeler alanında karma suyu ihtiyacı, kuma, işlenebilirlik ve stabilite geliştirme gibi alanlarda önemli başarılar elde edilmiştir (Kharazian ve ark., 2019; Meyer, 1974). Ancak, polimer modifiyesinin çimento bazlı ürünler üzerinde esneklik ve yapışma dayanımlarının artırılmasına rağmen, literatürde

halen çeşitli eksiklikler bulunmaktadır (Assaad, 2018; Assaad & Gerges, 2019; Knapen & Van Gemert, 2009; Kong ve ark., 2016; Montanaro ve ark., 1990). Özellikle büzülme ve şişme gibi alanlar hala iyileştirilmesi gereken noktalardır. Bununla birlikte, SAK kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalarda kullanılan polimerin ilave olarak harç tasarımlarına eklendiği gözlemlenmekte ve çimento ile yer değiştirme olarak yapılan çalışmaların sayısının yetersiz olduğu gözlemlenmektedir. Bu sebeplerle, bu çalışmada, hafif kompozit harçların yüksek su emme değerlerinin azaltılması ve nispeten düşük mekanik özelliklerinin iyileştirilebilmesi bakımından SAK hafif kompozit harçlarda çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. SAK kullanılarak üretilen hafif kompozit harçların yayılma, birim hacim ağırlık (BHA), dayanım, su emme ve rötre özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

2.1.1. Çimento

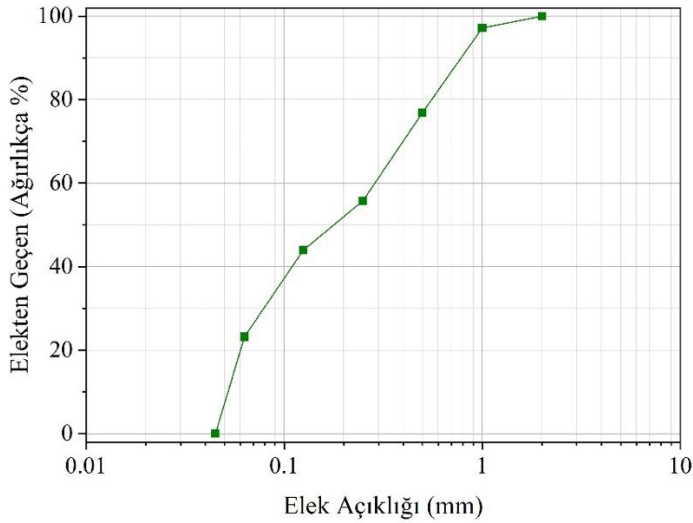
Bu çalışmada, 9 farklı çimento esaslı kompozit harç (ÇEKH) üretiminde CEM I 42.5R Portland çimentosu ana bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun özgül ağırlığı 3,15'tir. Çimentonun kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

2.1.2. Volkan cürufu

Volkanik cüruf (VC) agregası gözenekli hafif bir agregadır olup, çeşitli volkanik aktiviteler nedeniyle çatlaklar boyunca bazaltik karakterli lavların sızması sonucu oluşan, bazaltik andezitik bileşimli camsı volkanik kaya türüdür (Gündüz & Kalkan, 2023). Volkanik olaylar sonucu oluşan, gözenekli bir yapıya sahip olan cüruf oluşumlarına, volkanik faaliyetlerin mevcut olduğu dünyanın birçok yerinde rastlanmaktadır. Oldukça kabarcıklı ve volkanik cam bakımından zengindir, bu da ona yüksek gözeneklilik ve düşük yoğunluk kazandırır (Ercan ve ark., 1978). Bir patlama sırasında gaz yüklü lav damlacıklarının havaya fırlatılması ve uçarken soğumasıyla oluşur ve sıkışıp kalmış gaz kabarcıkları tarafından oluşturulan boşluklar içeren koyu renkli volkanik kaya olarak oluşur (Ercan ve ark., 1983). Volkanik cüruf malzemeleri çoğunlukla yüksek demir içeriğinden dolayı genellikle kırmızımsı ila siyah renktedir. Bazı volkanik cürufların yüzeyi koyu yeşil alacalı bir renge sahip olabilir; oksidasyon koyu kırmızımsı kahverengi bir renge yol açabilir (Demirdag & Gunduz, 2008). Volkanik cüruf agregası örnekleri Türkiye'nin Ege bölgesindeki ocaklardan elde edilmiştir. Agregası malzemesi, çimento esaslı hafif harç birleşimlerinde kullanılmak üzere ince hafif doğal agregası olarak kırılmış, elenmiş ve 0/2 mm olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Ortalama kuru birim ağırlığı $790 \pm 35 \text{ kg/m}^3$, ortalama özgül ağırlığı 1,81'dir. TS EN 13055-1'e göre yapılan volkanik agreganın ezilme direnci ortalama $6,43 \pm 0,18 \text{ N/mm}^2$ 'dir. VC agregası numunesinin doymuş yüzey kuru durumu için ağırlıkça ortalama su emme oranı $\%31 \pm 1$ 'dir. Kullanılan VC agregasının kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. VC'na ait agregası tane boyut analizi Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çimento ve Volkan Cürufunun XRF Analizi Soncu Kimyasal İçeriği

Kimyasal Bileşen (%)	Çimento	Volkan Cürufu
SiO ₂	19,15	44,50
Al ₂ O ₃	4,78	20,80
Fe ₂ O ₃	3,55	7,30
MgO	0,94	7,00
CaO	64,70	11,60
Na ₂ O+K ₂ O	1,11	7,60
TiO ₂	0,00	0,03
Kızdırma Kaybı	2,12	2,98



Şekil 1. VC Agreganın Elek Analizi

2.1.3. Süperakışkanlaştırıcı

ÇEKH test örneklerinin hazırlanmasında harç karışımının işlenebilirlik ve dayanımını artırmak amacıyla çimento esaslı malzemelerde karışım suyunu azaltan ve yüksek akışkanlık özelliği kazandıran, toz formunda, melamin sülfonat formaldehit (MSF) süper akışkanlaştırıcı (SA) piyasa koşullarından temin edilerek karışımlarda kullanılmıştır. MSF toz katkı, beyaz renkli, suda kolay çözünebilen, ortalama %30-35'lik çözeltide pH değeri 8,5-9,5 aralığında olan, klor iyonu içermeyen, özgül ağırlığı ortalama 0,6 g/cm³ ve ASTM C 494 standardına uygun bir katkı malzemesidir.

2.1.4. Mukavemet artırıcı

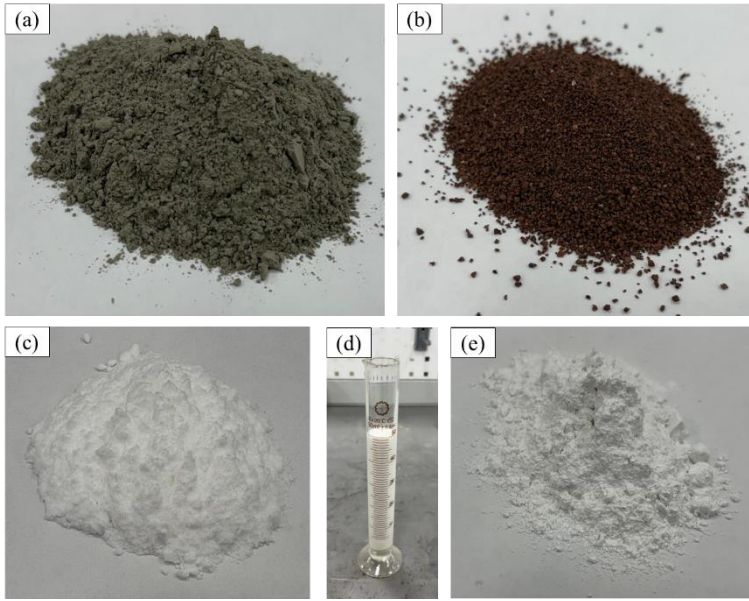
Bu çalışmada kullanılan mukavemet artırıcı (MA) toz polimer, polivinil alkol ortamında vinil asetat ve versatik asidin vinil esterinden oluşan bir kopolimer bazlı yeniden dağılıbilir polimer tozudur. Orta sertlikte bir filme sahiptir ve çimento, alçı

veya polimer bağlayıcı bazlı kuru karışım harçlarının modifikasyonu için tasarlanmıştır. Genellikle beyaz renktedir, pH değeri 7-10 aralığında ve 500 µm'den büyük tane içeriği en fazla %0,5'tir. Özgül ağırlığı ortalama 1,18'dir.

2.1.5. Stiren akrilik kopolimer

Bu çalışmada stiren akrilik kopolimer (SAK) özellikle su yalıtım membranı ve dayanım artırıcı özellikleri sebebiyle bir polimer katkı olarak çimento ile yer değiştirme yöntemi ile kullanılmıştır. Karbon zinciri, hidrofilik grup ve hidrofobik grup olmak üzere iki tür yan grup içeren SAK'in ana zincirini oluşturur. Hidrofilik grup, yüksek alkali koşullar altında kısmen hidrolize olabilir ve polimerin suda çözünmesini sağlar. Hidrofobik grup ise SAK parçacıklarının polimer filmleri oluşturmaya yardımcı olur (Zhang ve ark., 2019). Stiren akrilik kopolimerin ortalama özgül ağırlığı 1,09'dur.

Çalışma kapsamında kullanılan malzemeler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çalışma Kapsamında Kullanılan Malzemeler: (a) Çimento, (b) Volkan Cürufu, (c) Süperakışkanlaştırıcı, (d) Stiren Akrilik Kopolimer, (e) Mukavemet Artırıcı

2.1. Metot

2.2.1. ÇEKH üretimi ve test yöntemleri

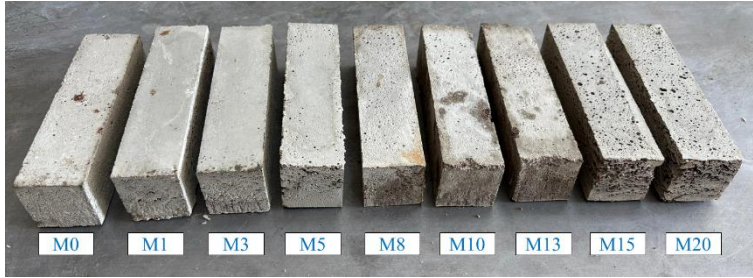
Bu deneysel çalışmada, SAK'in çimento esaslı hafif kompozit harçlar üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla sekiz farklı harç karışım oranı tasarlanmıştır. Ayrıca SAK kullanımından doğabilecek etkilerin doğru bir şekilde incelenmesi amacıyla referans ÇEKH karışımı olarak SAK içermeyen ayrı bir karışım tasarlanmıştır. Kompozit kombinasyonların tasarımı Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Karışım Tasarımı

Grup	Karışım Kodu	SA (çimentonun ağırlığına %)	MA (çimentonun ağırlığına %)	S/Ç	A/Ç	SAK (çimentonun ağırlığına %)
R	M0	1,50	1,00	1,00	2,30	0,00
1	M1	1,45	1,00	1,00	2,30	1,00
	M3	1,45	1,00	1,00	2,30	3,00
	M5	1,45	1,00	1,00	2,30	5,00
	M8	1,425	1,00	1,00	2,30	8,00
2	M10	1,425	1,00	1,00	2,30	10,00
	M13	1,425	1,00	1,00	2,30	13,00
	M15	1,40	1,00	1,00	2,30	15,00
3	M20	1,40	1,00	1,00	2,30	20,00

Tablo 2'den kolaylıkla görülebileceği gibi SAK'in ÇEKH'lar üzerindeki etkisini belirlemek için karışımlarda kullanılan çimento ağırlığına %0, %1, %3, %5, %8, %10, %13, %15 ve %20 oranlarında SAK çimento ile yer değiştirilerek dokuz farklı kompozit harç karışımı üretilmiştir. Bütün karışımlarda A/Ç (agrega/çimento) oranı 2,30 olacak şekilde sabit tutulmuştur. S/Ç (su/çimento) oranı bütün karışımlarda 1,00 olarak sabitlenmiştir. MA toz polimer bütün karışımlarda çimento ağırlığının %1,00'ı olacak şekilde harç karışımlarına eklenmiştir. Tablo 2'de gösterildiği gibi referans karışımı (R grubu) çimento ağırlığında %1,50 SA katkı kullanılarak üretilmiştir ve Grup 1, Grup 2 ve Grup 3 karışımlarında kullanılan SA katkı sırasıyla çimento ağırlığında %1,45, %1,425 ve %1,40 olacak şekilde azaltılarak harç kombinasyonlarına eklenmiştir. Bunun sebebi, literatürde polimer modifiyeli harçların, yüksek akışkanlık ve işlenebilirlik gibi çimento ve polimerin avantajlarını birleştirmesidir (Berkak ve ark., 2020; Mermerdaş ve ark., 2021; Shete & Upase, 2014; S. Zhang ve ark., 2011). Karıştırma aşamasında homojen kuru karışım elde etmek için öncelikle tüm malzemeler mikserle konularak 2 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra sıvı malzemeler kendi içerisinde homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Taze çimento esaslı hafif kompozit karışımlar üretmek için mikserle sıvı karışım ilave edilmiş ve karışım 2 dakika daha karıştırılmıştır. Çalışmada kullanılan su şebeke suyudur ve $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklığında kullanılmıştır. Taze ÇEKH'lar elde edildikten sonra harçların işlenebilirliğinin tespit edilebilmesi için TS EN 1015-3 (Turkish Standards Institution, 2000a) standardına uygun olarak harçların yayılma değerleri tespit edilmiştir. ÇEKH'ların taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlıkları sırasıyla TS EN 1015-6 (Turkish Standards Institution, 2000b) ve TS EN 1015-10 (Turkish Standards Institution, 2001) standartlarına uygun olarak tespit edilmiştir. Hafif kompozit harçların eğilme ve basınç dayanımlarının tespiti için her bir seride 3'er numune olacak şekilde $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarında prizma kalıplar kullanılarak prizma numuneler üretilmiştir (Şekil 3). Üretilen numuneler TS EN 1015-11 standardına uygun olarak öncelikle eğilme dayanımı testine tabi tutulmuş, bu test sonucu kırılıp iki parça haline gelen numunelere basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Eğilme ve basınç dayanımı testleri 3, 7, 28 ve 180 gün kür uygulanan numuneler üzerinde yapılmıştır. Her bir kür süresine bağlı dayanım testi için 3 numune kullanılmıştır. Numunelere mekanik test süresi gelinceye kadar hava kürü ($23 \pm 2^\circ\text{C}$ ve $\%50 \pm 5$ bağıl nem) uygulanmıştır. Numunelere normal hava

kürü uygulanmasının sebebi, SAK katkısının hava kürü koşullarında polimer film yapabilme karakterinin daha iyi olduğunun daha önceki çalışmalarda tespit edilmesidir (Zhang ve ark., 2019). Harçların ağırlıkça su emme değerleri ASTM C642-13 (ASTM, 2013) standardında belirtilen yöntemlerle tespit edilmiştir. Çimento esaslı kompozit harçların büzülme ve şişme özelliklerinin tespiti için TS EN 13872 (*TS EN 13872, Perdah ve/Veya Tesviye İşlerinde Kullanılan ve Hidrolik Priz Alabilen Bileşiklere Uygulanacak Deney Metotları - Büzülmenin Tayini*, 2010) 'ye uygun olarak analiz edilen $40 \times 40 \times 160$ mm³ boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Büzülme test örneklerinin 28 gün sonrası büzülme değerleri 3'er numune üzerinden analiz edilmiştir. Şişme test örneklerinin 28 gün kür edildikten sonra 28 gün suda bekletilerek su emmesi sağlanarak 3'er numune üzerinden şişme analizleri elde edilmiştir.

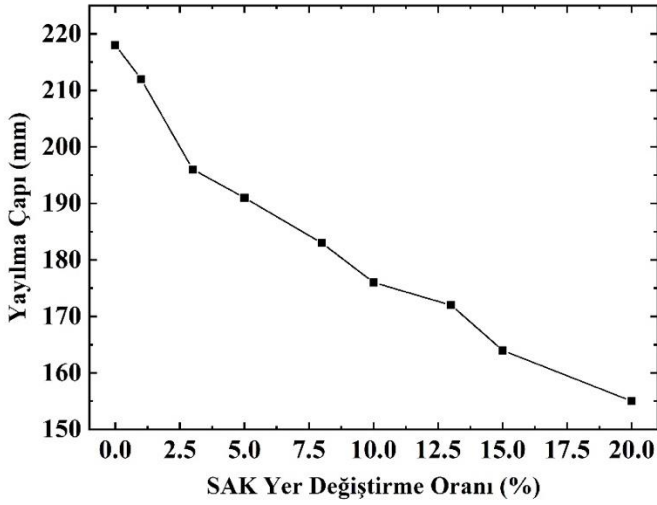


Şekil 3. Çalışma Kapsamında Üretilen Numuneler

3. DENEYSEL BULGULAR

3.1. Yayılma

Taze harçların işlenebilirlik özelliklerini belirlemek amacıyla her bir taze harç için yayılma tablası testi yapılmıştır. Bütün ÇEKH örneklerinin yayılma değerleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. ÇEKH'ların Yayılma Değerleri

Şekil 4 incelendiğinde, harç örneklerinin yayılma özelliğinin çimento ile SAK yer değiştirme oranı arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Diğer bir deyişle, SAK katkısının harçların işlenebilirlik özelliğinde negatif etki sergilediği tespit edilmiştir. Her ne kadar benzer sonuçların literatürde elde edilmiş olmasına rağmen (Chew ve ark., 2004), literatürde daha fazla elde edilen işlenebilirlik analiz sonuçları polimer katkısının harçlarda işlenebilirliği geliştirebildiği yönündedir (Berkak ve ark., 2020; Mermerdaş ve ark., 2021; Shete & Upase, 2014; S. Zhang ve ark., 2011). Ancak, literatür incelendiğinde polimer katkılı harçların genellikle normal yoğunluklu agregâ/kum kullanılarak normal yoğunluklu harçlar için kullanımları incelenmiştir. Bu çalışmada, hafif agregâ olarak gözenekli ve düşük yoğunluklu volkan cürufu kullanılmıştır. İşlenebilirlik kaybının bir sebebinin SAK katkısının agregâ tarafından gözeneklere emilerek etkisinin azaldığı değerlendirilebilir. Ayrıca, MA toz polimer ile SAK birlikte kullanımının da işlenebilirlik kaybında bir etkisi olup olmadığı ayrıca incelenmelidir. MA toz polimer ile SAK ortak kullanımı ile polimer zincirlerinin toplam özgül yüzey alanı artarak harcın akış sürecinde zincirlerin birbirlerine kenetlenerek akış özelliğini engellemiş olabileceği düşünülebilir. Bu sebeplere bağlı olarak, %1-%20 çimento ile SAK yer değiştirme oranında, harçların akıcılık özelliğinde %2,75 ile %28,90 aralığında azalma gözlemlenmiştir. Bunun yanında, karışım tasarımları hazırlanırken SAK oranındaki artışın harcın akma özelliğini iyileştireceği düşünülüp harçlarda SAK oranı arttıkça 1., 2., ve 3. Grup örneklerin süperakışkanlaştırıcı katkı içeriği azaltılmıştır. Taze harçların yayılma değerindeki azalmaya bu durumunda katkı sağladığı düşünülebilir, gelecek çalışmalar için sabit SA katkı kullanım oranlarında yayılma değerlerinin değişimi gözlemlenebilir.

3.2. Birim Hacim Ağırlık

ÇEKH örneklerinin taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlık (BHA) değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

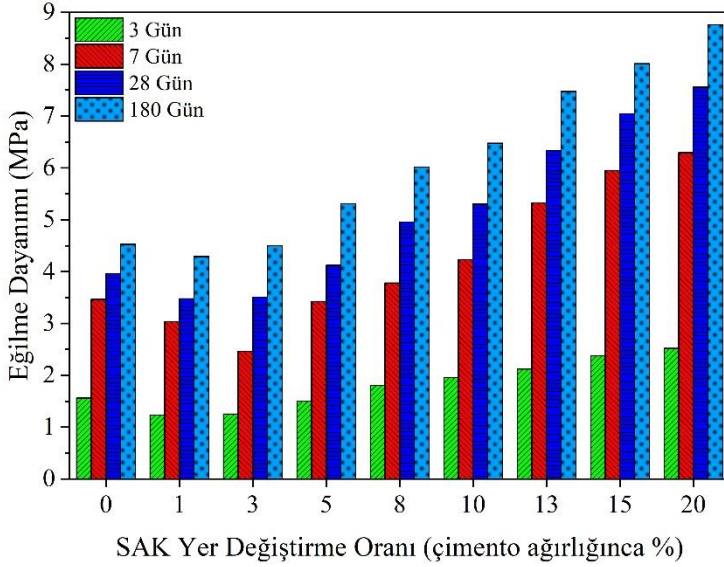
Tablo 3. ÇEKH Örneklerinin BHA Değerleri

Karışım Kodu	Taze Harç BHA (kg/m ³)	Sertleşmiş Harç BHA (kg/m ³)
M0	1793	1489
M1	1790	1487
M3	1787	1485
M5	1787	1484
M8	1784	1481
M10	1781	1479
M13	1778	1476
M15	1775	1473
M20	1770	1469

Tablo 3 incelendiğinde, ÇEKH'ların taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlıklarının az miktarda azaldığı tespit edilmiştir. Birçok araştırmacı, polimer ilavesinin bir sonucu olarak polimer modifiyeli harçlarda hapsolmuş aşırı hava boşluklarının varlığını bildirmiştir (Kharazian ve ark., 2019; Knapen & Van Gemert, 2015; Wang & Wang, 2010). Bu çalışmaların sonuçlarına göre, polimerlerin boşlukları oluşturmadığı ancak boşlukların taze harçlarda stabilize edilmesi için bir koşul sağladığını, dolayısıyla matris sertleşene kadar boşlukların daha uzun süre kalmasını tetiklediğini tespit etmişlerdir. Bu da daha az yoğun harçların üretileceği ve daha düşük basınç dayanımı seviyelerine ulaşılabilceği anlamına gelmektedir. Bu çalışma kapsamında üretilen hafif kompozit harçların, SAK kullanımı ile birlikte literatür sonuçlarına paralel olarak, SAK kullanım oranının artması ile BHA değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, BHA ağırlıklardaki azalma miktarı minimal seviyelerde bulunmuştur. Bunun sebebinin sıvı polimerin bir kısmının gözenekli agrega tarafından emilmesi ve polimerin hava boşluklarını stabilize etmesinin bir miktar engellenmiş olması olarak değerlendirilebilir. En yüksek kullanım oranı olan %20 çimento ile SAK yer değiştirme oranında, taze harcın BHA değeri %1,28, sertleşmiş harcın BHA değeri %1,34 oranında azalmıştır.

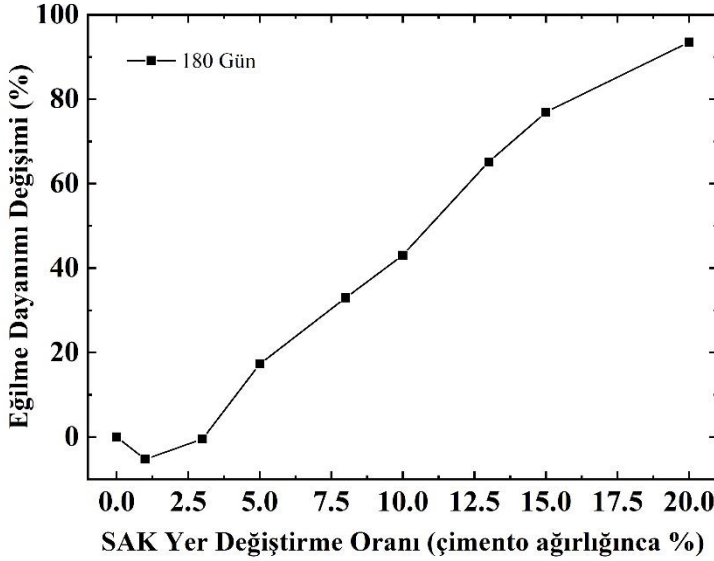
3.3. Eğilme ve Basınç Dayanımı

ÇEKH örneklerinin 3, 7, 28 ve 180 gün hava kürü uygulanmasından sonra eğilme testi sonucu dayanım değerleri Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Harçların Farklı Yer Değiştirme Oranlarında Eğilme Dayanımı Gelişimi

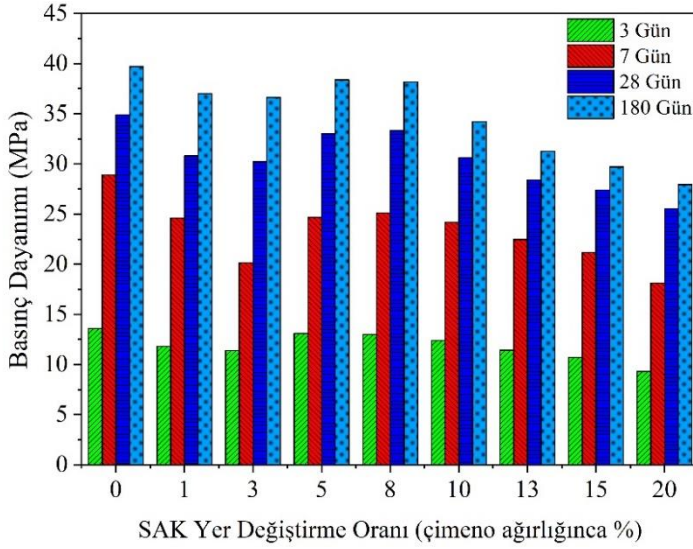
Şekil 5'ten görülebileceği gibi SAK'in çimento ile yer değiştirme seviyesi arttıkça ÇEKH'ların eğilme mukavemeti değerleri 3, 7, 28 ve 180. günlerde arttığı ve bu iyileşmenin %20'ye kadar hep ilerlediği gözlemlenmiştir. %1 ve %3 SAK yer değiştirmeli M1 ve M3 örneklerinin 3, 7, 28 ve 180. günlük eğilme dayanımlarının SAK kullanılmayan M0 referans örneğinin eğilme dayanımına yakın veya az miktarda altında kaldığı gözlemlenmiştir. SAK katkısının eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin hafif harçlar için özellikle %3 yer değiştirme oranından sonra kendisini gösterdiği belirlenmiştir. SAK katkısının harçların eğilme dayanımını artırdığı diğer araştırmacılar tarafından da tespit edilmiştir (Berkak ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2011; Zhang ve ark., 2019). Ayrıca, kür süreleri dikkate alındığında, hava kürü süresi arttıkça numunelerin eğilme mukavemetlerinin önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Özellikle uzun dönem (180 gün) hava kürü sonucunda numunelerin eğilme dayanımının oldukça iyileştiği tespit edilmiştir. M0 referans örneğinin 3, 7, 28 ve 180 gün kür sonunda eğilme dayanımları sırasıyla 1,56, 3,46, 4,00 ve 4,50 MPa olarak tespit edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımını sergileyen M20 (%20 çimento ile SAK yer değiştirme) örneğinin 3, 7, 28 ve 180 gün kür sonunda eğilme dayanımları sırasıyla 2,56, 6,30, 7,60 ve 8,80 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 6'da SAK yer değiştirmeli test örneklerinin eğilme dayanımlarının 180 gün kür sonucunda M0 kodlu SAK kullanılmayan referans örneklerinin eğilme dayanımlarına oranı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. Harçların Farklı Yer Değiştirme Oranlarında Eğilme Dayanımı Gelişimi

Şekil 6 irdelendiğinde, %1 çimento ile SAK yer değiştirme oranında harçların eğilme dayanımlarının ortalama %5,30 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu azalmanın düşük kullanım oranında polimerlerin henüz istenilen performansı sağlamaması ve çimento miktarının azalmasından kaynaklı hidrasyon ürünlerinin miktarının azalmasından kaynaklı olabileceği söylenilebilir. %3 çimento ile SAK yer değiştirme oranında eğilme dayanımlarının artık iyileşmeye başladığı ve referans harcına oranla ortalama sadece %0,50 oranında dayanım kaybının olduğu gözlemlenmiştir. Polimer kullanımındaki artış ile polimer film oluşumunun başladığı ve bu film oluşumunun eğilme dayanımını iyileştirdiği söylenebilir. Bu kullanım oranından sonra %20 çimento ile SAK yer değiştirme oranına kadar bütün SAK kullanım oranlarında harçların eğilme dayanımlarının önemli ölçüde iyileştiği tespit edilmiştir. Literatürde, yüksek oranda stiren akrilik kullanımının hidrasyon ürünleri üzerinde, boşlukları dolduran ve hidrasyon ürünlerini birbirine bağlayan, elastisite modülü nispeten düşük ve dolayısıyla esnek bir film tabakası oluşturduğu ve böylelikle harçların eğilme dayanımını arttırdığı belirtilmektedir (Zhang ve ark., 2019). Literatür bilgisine benzer şekilde, bu çalışmada da özellikle %5 ile %20 oran aralığında SAK ile çimento yer değiştirmesinde harçların eğilme dayanımları referans (M0) harcına göre 180 gün kür sonrasında %17,3 ile %93,5 aralığında dayanım kazanmıştır.

ÇEKH örneklerinin 3, 7, 28 ve 180 gün hava kürü uygulanmasından sonra basınç dayanımı testi sonucu dayanım değerleri Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Harçların Farklı Yer Değiştirme Oranlarında Basınç Dayanımı Gelişimi

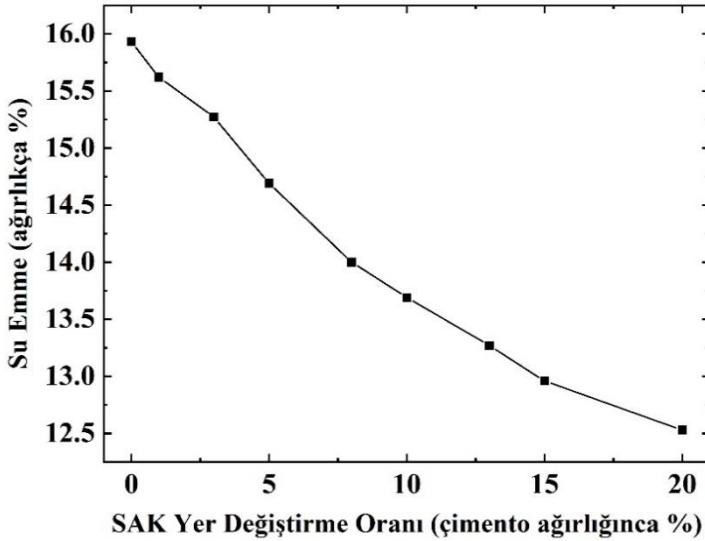
Şekil 7 irdelendiğinde, beklendiği üzere kür süresi arttıkça harçların basınç dayanım değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, SAK ile çimento yer değiştirme oranı arttıkça, özellikle %10'dan sonra olduğu gibi yüksek kullanım oranlarında, harçların basınç dayanım özelliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi özellikle bu çalışmada çimento ile yer değiştirme metodu kullanıldığı için, azalan çimento miktarına bağlı azalan hidratasyon ürünleridir. Bir diğer önemli sebep ise, bu çalışma açısından az da olsa polimer katkının taze harç içerisinde oluşan sıkışmış hava kabarcıklarını bir miktar sabitlemesidir (Wei & Meyer, 2015; Zhang ve ark., 2019). Bu çalışmada, sertleşmiş harçların birim hacim ağırlıklarının referans harcına oranla %1,34 kadar daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Birim ağırlıktaki bu kayıp da harçların basınç dayanımının kaybına sebebiyet vermektedir. Bununla birlikte, %1, %3, %5 ve %8 oranında SAK ile çimento yer değiştirme oranlarında test harçlarının referans harcına oranla 180 günlük basınç dayanım kaybı sırasıyla %6,8, %7,8, %3,27 ve %3,78 olarak oldukça düşük oranlarda tespit edilmiştir. Daha yüksek yer değiştirme oranlarında ise test örneklerinin basınç dayanım değerlerinin en fazla (M20) %29,6 oranında azalabildiği tespit edilmiştir. Basınç dayanım değerlerinin eğilme dayanımı değerlerine kıyasla düşük olmasının bir sebebi de harçlarda polimer film oluşabilmesi için hava kürü uygulanması ve bu sebeple çimento taneciklerinin yeteri derecede hidrate olamayışı olarak değerlendirilebilir. Bu etki eğilme dayanımında negatif etki sağlamamaktadır çünkü oluşan polimer filmin çekme dayanımı kuvvetli ve eğilme dayanımını artırmaktadır. Ayrıca, basınç dayanımının düşük olması yine polimer filmin hidratasyon ürünleri üzerinde gelişmesi ve bunun sonucunda hidratasyonu azaltması olarak değerlendirilebilir. Diğer yandan, bu polimer film hidrate boşluklar arasını da doldurarak harçların çekme dayanımını iyileştirdiği söylenebilir.

SAK ile çimento yer değiştirmesi sonucu ÇEKH örneklerinin basınç dayanımları her ne kadar referans harcının basınç dayanım değerinin altında kalsa da düşük yer değiştirme oranlarında (özellikle M5 ve M8 harcı) dayanım kaybının minimal

seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. Harçların mekanik davranışı göz önüne alındığında (hem eğilme hem basınç) bu örneklerin optimum seviye SAK kullanım oranına sahip olduğu söylenilebilir. Bununla birlikte, sadece eğilme dayanımları göz önüne alındığında SAK kullanımının bütün oranları etkili olarak çalışmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada çimentodan azaltılarak polimer kullanıldığı için de daha çevreci bir ürün üretilbileceği söylenilebilir.

3.4. Su Emme

ÇEKH örneklerinin 28 gün hava kürü uygulanmasından sonra etüvde kurutulup suya daldırılması sonucu elde edilen su emme değerleri Şekil 8’de gösterilmiştir.

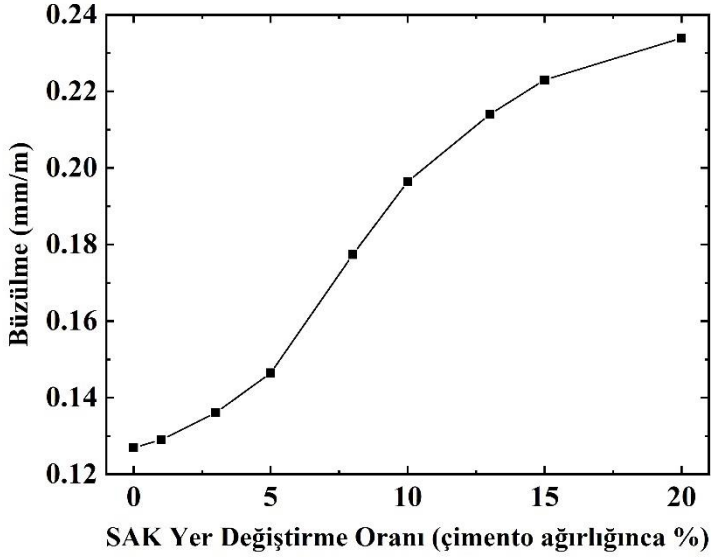


Şekil 8. Harçların Kütlece Su Emme Değerleri

Şekil 8 incelendiğinde, SAK ile çimento yer değiştirme oranı arttıkça ÇEKH örneklerinin kütlece su emme değerlerinin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmektedir. SAK içermeyen referans harcının kütlece su emme değeri %15,93 olarak tespit edilmişken, %1, %3, %5, %8, %10, %13, %15 ve %20 oranında SAK kullanılan harç örneklerinin su emme değerleri sırasıyla %15,62, %15,27, %14,69, %14,00, %13,69, %13,27, %12,96 ve %12,53 olarak azalan bir trend ile saptanmıştır. Polimer modifiyeli harçların yapısında, polimer tarafından sürüklenen ve kısmen polimer zincirleri tarafından doldurulan veya polimer film tarafından kapatılan çok sayıda mikro gözenek bulunmaktadır (Ramli & Tabassi, 2012). Bu etki her zaman polimer içeriğinin artmasıyla artmaktadır (Zhang ve ark., 2019). SAK kullanım oranının artması ile su emme özelliğinin azalması, ÇEKH numunelerinde büyük ve küçük boyutlu gözeneklerin mevcut olmasına rağmen gözeneklerin SAK polimeri tarafından doldurulup kapatılabildiğini göstermektedir. Diğer araştırmacılar da harçlarda stiren akrilik modifiyesinin hem kütlece su emme değerlerini hem de harçların kapiler su emme değerlerini azaltabildiğini tespit etmişlerdir (Wang & Wang, 2010; Zhang ve ark., 2019).

3.5. Büzülme ve Şişme

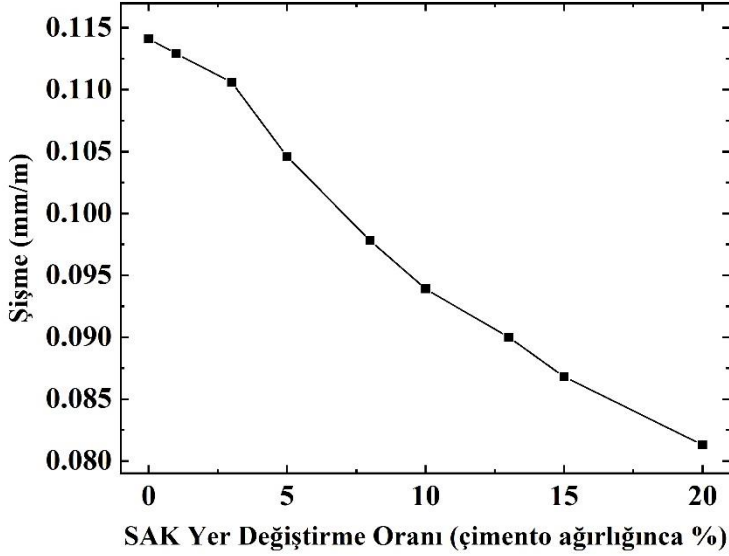
ÇEKH örneklerinin büzülme karakteristiği Şekil 9'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 9. SAK Kullanım Oranına Göre Harçların Büzülme Değerleri

Şekil 9 incelendiğinde elde edilen bulgulara göre karışımlarda artan SAK miktarına bağlı olarak kompozit harçların büzülme özelliklerinde belirgin bir artış eğilimi olduğu gözlemlenmiştir. Literatür incelendiğinde stiren akrilik modifiyesinin çimentolu ürünlerde büzülme azaltabileceği sonucuna ulaşan çalışmalar bulunmaktadır (Cruz ve ark., 2021; Wang & Wang, 2010). Ancak, bu çalışmada bu sonucun aksine SAK kullanım oranının artması ile harçların büzülme değerlerinin de arttığı görülmektedir. Harcın kuruma etkisinde büzülme değerine etki eden en önemli faktörlerden birisi, harcın gözenekli yapısıdır (Gündüz & Kalkan, n.d.). ÇEKH test örneklerinde karışımdaki volkan cürufu matris yapıyı daha gözenekli bir forma büründürmekle birlikte, karışımda SAK miktarının da artması harcın gözenekliliğini bir miktar daha artırıp rötre özelliğini olumsuz yönde etkileyerek büzülme değerinin artmasına neden olmaktadır.

Şekil 10'da ÇEKH örneklerinin 28 gün sonunda kurutulup su emdirilmesi sonucu şişme özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 10. SAK Kullanım Oranına Göre Harçların Şişme Değerleri

Şişme, çimento esaslı harç veya beton numunelerinin sürekli ıslak koşullarda tutulduğunda meydana gelen bir özelliğidir. Sürekli ıslak ortamda kalan numuneler, birim ağırlıklarındaki artışla birlikte hacimlerinde de artış gösterebilirler. Bu gelişim beton örnekler için yaklaşık %1'e kadar değişim gösterebilmektedir. Nem genleşmesi, suyun çimento jeli tarafından emilmesiyle ilgilidir, bu nedenle su parçacıkları, malzemenin ortaya çıkan yapısındaki kohezyon kuvvetlerine karşı koyan bir etki sergiler (Gündüz & Kalkan, n.d.; Lenart, 2015). Bu çalışma sonucu elde edilen bulgulara göre, harçların şişme özelliği olarak M0 – M20 aralığındaki örneklerin şişme değerleri 0,144 mm/m'den 0,081 mm/m değerine kadar azalarak değişmektedir. Harçların şişme değerlerinin azalmasının en önemli sebebi, harçlarda gözenekliliğin bir miktar artmasına rağmen, bu gözenekleri kullanan polimerin nispeten kapatabilmesi ve film oluşturarak su emme değerlerini azaltabilmesidir (Şekil 8). Harçların su emme özelliklerinin azalması ile birlikte şişme karakteristiği de azalmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, hafif kompozit harçların yüksek su emme değerlerinin azaltılması ve nispeten düşük mekanik özelliklerinin iyileştirilebilmesi bakımından SAK katkısı hafif kompozit harçlarda çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre,

1. %1-%20 çimento ile SAK yer değiştirme oranında, harçların akıcılık özelliğinde %2,75 ile %28,90 aralığında azalma gözlemlenmiştir. Buna bir sebep çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcının azaltılması olabilir. Harçların akıcılık özelliğinin iyileştirilmesi amacıyla farklı tip süperakışkanlaştırıcı katkıları denenebilir. Ayrıca, bu çalışmada mukavemet

- artırıcı polimer de bir miktar akıcılık özelliğini azaltmış olabilir bu polimerin ayrıca harçların akıcılık özelliğine etkisi deneysel olarak araştırılmalıdır.
2. SAK kullanım oranının artması ile BHA değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, BHA ağırlıklardaki azalma miktarı minimal seviyelerde bulunmuştur. En yüksek kullanım oranı olan %20 çimento ile SAK yer değiştirme oranında, taze harcın BHA değeri %1,28, sertleşmiş harcın BHA değeri %1,34 oranında azalmıştır. Malzemelerin basınç dayanımlarının bir miktar azalmasının bir sebebi de BHA değerlerindeki azalmadan kaynaklanmış olabilir.
 3. Özellikle uzun dönem (180 gün) hava kürü sonucunda numunelerin eğilme dayanımının oldukça iyileştiği tespit edilmiştir. bu çalışmada da özellikle %5 ile %20 oran aralığında SAK ile çimento yer değiştirmesinde harçların eğilme dayanımları referans (M0) harcına göre 180 gün kür sonrasında %17,3 ile %93,5 aralığında dayanım kazanmıştır.
 4. SAK ile çimento yer değiştirme oranı arttıkça, özellikle %10'dan sonra olduğu gibi yüksek kullanım oranlarında, harçların basınç dayanım özelliğinin azaldığı tespit edilmiştir. %10'a kadar bu çalışmada kullanılmayan SAK kullanım oranı bağlamındaki ara değerler ileriki çalışmalarda kullanılabilir.
 5. SAK kullanım oranının artması ile su emme özelliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. En basit durabilite testi olan su emme deneylerinde olumlu sonuç veren bu tip harçların ileriki çalışmalar için diğer durabilite özellikleri deneysel olarak araştırılabilir.
 6. Karışımlarda artan SAK miktarına bağlı olarak kompozit harçların büzülme özelliklerinde belirgin bir artış eğilimi olduğu gözlemlenmiştir. Büzülme özelliklerini azaltmak için farklı katkı maddelerinin (örneğin, kalsiyum karbonat, fiber takviyeler) etkisi test edilebilir. Büzülme eğilimlerinin uzun vadeli çatlak oluşumuna etkisi üzerine bir çalışma yapılabilir.
 7. Harçların şişme özelliği olarak M0 – M20 aralığındaki örneklerin şişme değerleri 0,144 mm/m'den 0,081 mm/m değerine kadar azalarak değişmektedir.

SAK ile çimento yer değiştirmesi sonucu ÇEKH örneklerinin basınç dayanımları her ne kadar referans harcının basınç dayanım değerinin altında kalsa da düşük yer değiştirme oranlarında (özellikle M5 ve M8 harcı) dayanım kaybının minimal seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. Harçların mekanik davranışı göz önüne alındığında (hem eğilme hem basınç) bu örneklerin optimum seviye SAK kullanım oranına sahip olduğu söylenilebilir. Özellikle harçların eğilme dayanımları göz önüne alındığında, SAK ile çimento yer değiştirmesine bağlı harçların eğilme dayanımları %90'ın üzerinde artabilmektedir. Eğilme dayanımının yüksek arzu edilebileceği uygulamalarda bu tip ürünlerin kullanılabilirliği düşünülmektedir. Çekme kuvvetlerinden dolayı çatlama riski daha yüksek olan yapısal elemanlar (döşemeler, zemin betonları, geniş yüzeye uygulanacak son kat uygulamalar, prekast cephe panelleri, geniş yüzeyli prefabrike elemanlar vb. gibi geniş yüzeyli çimentolu ürünler) için SAK kullanımının uygun olabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, çimento ile yer değiştirme yapıldığı için SAK kullanılarak üretilen ÇEKH örneklerinin konvansiyonel harç örneklerine kıyasla çok daha çevreci ürünler olduğu söylenebilir.

Yazarların Katkısı

1. yazar %60 oranında, 2. yazar %40 oranında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Aggarwal, L. K., Thapliyal, P. C., & Karade, S. R. (2007). Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions. *Construction and Building Materials*, 21(2), 379–383.
- Akgül, M., Dogan, O., & Etli, S. (2020). Farklı çimento ile üretilen granül atık kauçuk agregaların ikame edilmiş kendiliğinden yerleşen beton harcının mekanik özelliklerinin incelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(2), 787–798.
- Akgül, M., & Etli, S. (2024). Investigation of the variation of mechanical and durability properties of elements manufactured with rubber substituted SCMs with element height. *Construction and Building Materials*, 428, 136300.
- Al-Zahrani, M. M., Maslehuddin, M., Al-Dulaijan, S. U., & Ibrahim, M. (2003). Mechanical properties and durability characteristics of polymer-and cement-based repair materials. *Cement and Concrete Composites*, 25(4–5), 527–537.
- Assaad, J. J. (2018). Development and use of polymer-modified cement for adhesive and repair applications. *Construction and Building Materials*, 163, 139–148.
- Assaad, J. J., & Gerges, N. (2019). Styrene-butadiene rubber modified cementitious grouts for embedding anchors in humid environments. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 84, 317–325.
- Assaad, J. J., & Issa, C. A. (2017). Effect of recycled acrylic-based polymers on bond stress-slip behavior in reinforced concrete structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(1), 4016173.
- ASTM. (2013). *ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.
- Berkak, H., Bederina, M., & Makhoulfi, Z. (2020). Physico-mechanical and microstructural properties of an eco-friendly limestone mortar modified with styrene-polyacrylic latex. *Journal of Building Engineering*, 32, 101463.
- Chew, M. Y. L., Tan, P. P., & Yeo, Y. S. (2004). Effect of styrene acrylic ester polymer on mortar render properties. *Architectural Science Review*, 47(1), 43–52.

- Cruz, E. O., Radler, M. J., Perello, M., & Savastano Jr, H. (2021). Fiber cement boards modified with styrene-acrylic copolymer: An approach to address dimensional stability and cellulose fiber preservation. *Journal of Composite Materials*, 55(3), 437–452.
- Demirdag, S., & Gunduz, L. (2008). Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units. *Construction and Building Materials*, 22(3), 135–142.
- Diamanti, M. V., Brenna, A., Bolzoni, F., Berra, M., Pastore, T., & Ormellese, M. (2013). Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 720–728.
- Ercan, T., Dinçel, A., Metin, S., Türkecan, A., & Günay, E. (1978). Uşak Yöresinin Neojen Havzaları Jeolojisi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 21(2), 104.
- Ercan, T., Türkecan, A., Dinçel, A., & Günay, E. (1983). Kula-Selendi (Manisa) dolaylarının jeolojisi. *Jeoloji Mühendisliği*, 17, 3–29.
- Etli, S. (2023). Evaluation of the effect of silica fume on the fresh, mechanical and durability properties of self-compacting concrete produced by using waste rubber as fine aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135590.
- Etli, S. (2024). Mechanical Properties of Self-Compacting Mortars Containing Rubber Waste Particles as Fine Aggregate in Freeze–Thaw Cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(9), 4024246.
- Feiteira, J., & Ribeiro, M. S. (2013). Polymer action on alkali–silica reaction in cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 44, 97–105.
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Hansu, O., Etli, S., & Alhassan, M. (2017). Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder. *Construction and Building Materials*, 140, 562–569.
- Gündüz, L., & Kalkan, Ş. O. (n.d.). İnce pomza agreganın çimento esaslı kendiliğinden yayılan tesviye şapının performansına etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(1), 1.
- Gündüz, L., & Kalkan, Ş. O. (2023). The effect of different natural porous aggregates on thermal characteristic feature in cementitious lightweight mortars for sustainable buildings. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47, 843–861.
- Kharazian, H. A., Zare, M. R., Noktehdan, M., & Sedaghatdoost, A. (2019). Effect of water-based acrylic copolymer on void systems of cementitious repair mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00261.

- Knapen, E., & Van Gemert, D. (2009). Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers. *Cement and Concrete Research*, 39(1), 6–13.
- Knapen, E., & Van Gemert, D. (2015). Polymer film formation in cement mortars modified with water-soluble polymers. *Cement and Concrete Composites*, 58, 23–28.
- Kong, X., Pakusch, J., Jansen, D., Emmerling, S., Neubauer, J., & Goetz-Neuhoeffer, F. (2016). Effect of polymer latexes with cleaned serum on the phase development of hydrating cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 84, 30–40.
- Lavelle, J. A. (1988). Acrylic latex-modified Portland cement. *Materials Journal*, 85(1), 41–48.
- Lee, J.-B. (2017). Physical properties of polymer-modified cement mortars by the functional additives and modification of polymerization. *Journal of Ceramic Processing Research*, 18(3), 220–229.
- Lenart, M. (2015). Assessment of mortar shrinkage in aspect of organic and inorganic modifiers use. *Procedia Engineering*, 108, 309–315.
- Lho, B. C., Joo, M. K., Choi, K. H., & Choi, J. Y. (2012). Effects of polymer-binder ratio and slag content on strength properties of autoclaved polymer-modified concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16, 803–808.
- Ma, H., & Li, Z. (2013). Microstructures and mechanical properties of polymer modified mortars under distinct mechanisms. *Construction and Building Materials*, 47, 579–587.
- Medeiros, M. H. F., Helene, P., & Selmo, S. (2009). Influence of EVA and acrylate polymers on some mechanical properties of cementitious repair mortars. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2527–2533.
- Mermerdaş, K., Algin, Z., Ekmen, Ş., & Karadağ, M. (2021). Stiren-Bütadien Kauçuk Lateks Modifiyeli Harçların Erken Yaştaki Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(2), 154–162.
- Meyer, J. (1974). Stability of polymer composites as positive-temperature-coefficient resistors. *Polymer Engineering & Science*, 14(10), 706–716.
- Mirza, J., Mirza, M. S., & Lapointe, R. (2002). Laboratory and field performance of polymer-modified cement-based repair mortars in cold climates. *Construction and Building Materials*, 16(6), 365–374.
- Montanaro, L., Festa, D., Bachiorrini, A., & Penati, A. (1990). Influence of added polymer emulsions on the short-term physical and mechanical characteristics of plastic mortar. *Cement and Concrete Research*, 20(1), 62–68.

- Muhammad, B., & Ismail, M. (2012). Performance of natural rubber latex modified concrete in acidic and sulfated environments. *Construction and Building Materials*, 31, 129–134.
- Ning, Y., Er-lei, B., Jin-yu, X., Guang, P., & Bo-xu, M. (2018). Study on tensile mechanical property of styrene-acrylic cement composite material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 153(2), 22022.
- Ohama, Y. (1997). Recent progress in concrete-polymer composites. *Advanced Cement Based Materials*, 5(2), 31–40.
- Ohama, Y. (1998). Polymer-based admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 20(2–3), 189–212.
- Ohama, Y., Demura, K., Hamatsu, M., & Kakegawa, M. (1991). Properties of polymer-modified mortars using styrene-butyl acrylate latexes with various monomer ratios. *Materials Journal*, 88(1), 55–61.
- Pei, M., Kim, W., Hyung, W., Ango, A. J., & Soh, Y. (2002). Effects of emulsifiers on properties of poly (styrene-butyl acrylate) latex-modified mortars. *Cement and Concrete Research*, 32(6), 837–841.
- Ramli, M., & Tabassi, A. A. (2012). Effects of polymer modification on the permeability of cement mortars under different curing conditions: a correlational study that includes pore distributions, water absorption and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 28(1), 561–570.
- Schulze, J., & Killermann, O. (2001). Long-term performance of redispersible powders in mortars. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 357–362.
- Selim, C., Serkan, E., & Onur, O. (2018). Curing effect on mortar properties produced with styrene-butadiene rubber. *Computers and Concrete*, 21(6), 705–715. <https://doi.org/10.12989/CAC.2018.21.6.705>
- Senff, L., Modolo, R. C. E., Ascensão, G., Hotza, D., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. A. (2015). Development of mortars containing superabsorbent polymer. *Construction and Building Materials*, 95, 575–584.
- Shete, G. N., & Upase, K. S. (2014). Evaluation of compressive strength and water absorption of styrene butadiene rubber (SBR) latex modified concrete. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 4(10), 40–44.
- Su, Z., Sujata, K., Bijen, J., Jennings, H. M., & Fraaij, A. L. A. (1996). The evolution of the microstructure in styrene acrylate polymer-modified cement pastes at the early stage of cement hydration. *Advanced Cement Based Materials*, 3(3–4), 87–93.
- TS EN 13872, *Perdah ve/veya tesviye işlerinde kullanılan ve hidrolik priz alabilen bileşiklere uygulanacak deney metotları - Büzülmenin tayini*. (2010).

- Turkish Standards Institution. (2000a). *TS EN 1015-3 - Methods of test for mortar for masonry- Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*.
- Turkish Standards Institution. (2000b). *TS EN 1015-6, Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar*.
- Turkish Standards Institution. (2001). *TS EN 1015-10, Methods of test for mortar for masonry- Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar*.
- Wang, R., & Wang, P. (2010). Function of styrene-acrylic ester copolymer latex in cement mortar. *Materials and Structures*, 43, 443–451.
- Wei, J., & Meyer, C. (2015). Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. *Cement and Concrete Research*, 73, 1–16.
- Wong, W. G., Fang, P., & Pan, J. K. (2003). Dynamic properties impact toughness and abrasiveness of polymer-modified pastes by using nondestructive tests. *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1371–1374.
- Xue, X., Yang, J., Zhang, W., Jiang, L., Qu, J., Xu, L., Zhang, H., Song, J., Zhang, R., & Li, Y. (2015). The study of an energy efficient cool white roof coating based on styrene acrylate copolymer and cement for waterproofing purpose—Part II: Mechanical and water impermeability properties. *Construction and Building Materials*, 96, 666–672.
- Zhang, S., Li, G. Z., & Ning, C. (2011). Properties of the Mortar Modified with the Styrene-Acrylic Emulsion. *Advanced Materials Research*, 194, 1022–1025.
- Zhang, X., Li, G., & Song, Z. (2019). Influence of styrene-acrylic copolymer latex on the mechanical properties and microstructure of Portland cement/Calcium aluminate cement/Gypsum cementitious mortar. *Construction and Building Materials*, 227, 116666.
- Zhong, S., & Chen, Z. (2002). Properties of latex blends and its modified cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 32(10), 1515–1524.



SUGGESTIONS FOR SOLUTIONS TO URBAN TRANSPORTATION PROBLEMS WITH INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS: THE CASE OF KARABÜK

KENT İÇİ ULAŞIM SORUNLARINA AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİYLE
ÇÖZÜM ÖNERİLERİ: KARABÜK ÖRNEĞİ

Özlem BATTAL ŞAL¹

Abdalla ELMAADAWY²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1527794>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
ozlembattal@karabuk.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
04.08.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
21.04.2025

Accepted
(Kabul Tarihi)
22.04.2025

Abstract

Transportation problems, irregular urbanisation, inadequate transportation infrastructure, and unplanned urbanisation in our country are growing daily. The fact that the Karabük city centre is an old settlement unsuitable for creating alternative roads is a problem. This study aims to identify and prioritise Intelligent Transportation Systems (ITS) strategies for the city of Karabük using the Best Worst Method (BWM), a multi-criteria decision-making technique. Ten experts from Karabük Municipality and related departments participated in pairwise comparisons of ITS-related action items outlined in the 2020 National ITS Strategy Document by the Ministry of Transport and Infrastructure. The consistency ratios of their responses confirmed data reliability. Results indicate that traffic safety, environmental impacts, and real-time traffic information are the most important criteria. These findings underline the importance of promoting public transportation and effective passenger information systems. Furthermore, the results provide insights into improving municipalities' range and quality of services.

Keywords: Urban transportation, transportation analysis, public transport, intelligent transportation systems, best-worst method.

Öz

Ülkemizde yaşanan ulaşım sorunları, düzensiz şehirleşme, ulaşım alt yapısının yetersiz oluşu ve plansız şehirleşme her geçen gün büyümektedir. Karabük şehir merkezinin eski bir yerleşim olması ve alternatif yollar oluşturmada elverişsiz olması başlı başına bir sorundur. Bu çalışma, Karabük ili için Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) stratejilerini belirlemek ve önceliklendirmek amacıyla çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olan En İyi-En Kötü Yöntemi (BWM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karabük Belediyesi ve ilgili kurumlardan on uzman, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı tarafından 2020 yılında yayımlanan Ulusal AUS Strateji Belgesi'nde yer alan eylem maddelerine yönelik ikili karşılaştırmalar yapmıştır. Uzman görüşlerinden elde edilen tutarlılık oranları verilerin güvenilir olduğunu göstermiştir. Çalışma sonuçlarına göre; trafik güvenliği, çevresel etkiler ve gerçek zamanlı trafik bilgisi en önemli kriterler olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, toplu taşıma sistemlerinin teşvik edilmesinin ve yolcu bilgilendirme sistemlerinin etkinliğinin artırılmasının önemine dikkat çekmektedir. Ayrıca, belediyeler tarafından sunulan hizmetlerin çeşitliliğini geliştirme konusunda da yol gösterici bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kent içi ulaşım, ulaşım analizi, toplu taşıma, akıllı ulaşım sistemleri, best worst method.

¹ Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye.
ozlembattal@karabuk.edu.tr.

² Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye.
abdullah.m.elmadawy@gmail.com.

1. INTRODUCTION

With the rise in population, socio-economic development, and the rapid expansion of the automotive industry, the number of privately owned vehicles in Turkey has been steadily increasing (Şenbil & Yetişkul Şenbil, 2020). However, this surge has not been matched by a corresponding improvement in the urban transportation infrastructure of Karabük. One of the primary reasons for this mismatch lies in the city's topographical limitations; Karabük is an old and rugged settlement where urban growth is largely restricted to a confined mountainous area. Historically, transportation and traffic issues in the city have been either overlooked or addressed with superficial and short-term measures, which have exacerbated congestion within the transportation network. Although awareness of these issues has increased in recent years, the response has been delayed and fragmented, complicating efforts to resolve the underlying problems.

Moreover, the existing infrastructure, including roads, intersections, and parking areas, remains insufficient to meet current demand. In addition to the general problem of irregular parking, public vehicles like buses and minibuses lack defined roadside loading and unloading zones, further impedes traffic flow. The increase in traffic accidents is largely caused by behavioural issues, such as drivers' and pedestrians' disregard for traffic laws, and physical infrastructure flaws (Selimoğlu, 2014).

A thorough urban transportation strategy needs to be created and implemented to address these issues. This plan should maintain the historic urban fabric, encourage the efficient use of local resources, and put people before cars. Furthermore, it should incorporate Intelligent transit Systems (ITS), promote environmentally friendly mobility solutions, promote the use of public transit, and offer affordable, secure, and sustainable transportation options. ITS is a collection of tools, applications, and systems that use contemporary information systems and technology to improve transportation infrastructure's sustainability, safety, and efficiency. Road safety, efficiency, ecologically friendly transportation, and traffic management are all greatly enhanced with ITS. These systems' primary goals are to streamline transportation procedures and lessen urban traffic congestion.

This study uses the Best Worst Method (BWM), a multi-criteria decision-making technique, to determine and rank the ITS options for Karabük. Ten experts from Karabük Municipality and related departments participated in pairwise comparisons of ITS-related action items outlined in the 2020 National ITS Strategy Document by the Ministry of Transport and Infrastructure. The results obtained were interpreted by comparing them with the current transportation situation of Karabük province.

2. INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

ITS is a comprehensive transportation management and service system that aims to provide innovative services for different transportation management modes (Lin et al., 2017). Tektaş et al. (2016) define ITS as “systems that include monitoring, measuring, analysing and controlling with multi-way data exchange between user-vehicle-infrastructure-center developed for purposes such as reducing travel times, increasing traffic safety, optimum use of existing road capacities, increasing mobility, contributing

to the country's economy by providing energy efficiency and reducing environmental damage.” The most basic feature of ITS is that it combines high technology and developments in information systems, communication, sensors, controllers, and advanced mathematical methods with the traditional transportation infrastructure world (Sussman, 2005a). When these technologies are integrated into the infrastructure of the transportation system and the vehicles themselves, they eliminate traffic congestion and increase safety and productivity (Yan et al., 2012).

ITS can be defined as using information and communication technologies, including monitoring, measurement, analysis, and control mechanisms, to ensure interoperability in transportation-related applications and solutions. Therefore, ITS includes various interdisciplinary intersections, including computer science and informatics, telecommunications, communications, transportation engineering, sensors and control, finance, e-commerce, and automobile manufacturing. ITS can be considered a tool to provide innovative mobility solutions in all modes of transportation. Various technologies such as sensors, wireless, infrared communication, data analytics, artificial intelligence, and machine learning are among the tools used in ITS applications.

Intelligent transportation uses modern technologies to enable quicker visibility and notifications of problems, making travel safer and more comfortable, and giving communities and people inexpensive options (Mazur, 2020; Peak, 2020). Furthermore, the primary advantages of intelligent transportation are its efficiency, safety, and environmental aspects (Mazur, 2020). Additionally, cutting-edge driver assistance technologies are being created to stop collisions and guarantee passenger safety. Furthermore, connected, collaborative, and autonomous mobility (CCAM) will be made possible by vehicle-to-passenger (V2P), vehicle-to-infrastructure (V2I), vehicle-to-home (V2H), vehicle-to-vehicle (V2V), and in-vehicle mobility (In-V) (Gajewska, 2017).

The Republic of Turkey's Ministry of Transport and Infrastructure (2020) defines ITS as information communication-based systems that include monitoring, measurement, analysis, control mechanisms, and multidirectional data exchange between users, infrastructure, vehicles, and centres. These systems were created to accomplish objectives like making the best use of the road's current capacity, reducing travel times, improving traffic safety and mobility, using energy efficiently, and reducing environmental degradation. Three key ITS application areas, mobility, safety, and the environment, are currently receiving attention (Khan et al., 2017). Human errors in all forms of transportation can be reduced with the help of solutions that use ITS technologies, which are still being developed and used today. At the same time, traffic-related delays, fatal and serious injury accidents, material losses, air pollution, and many other undesirable circumstances can be avoided.

Population expansion, demographic shifts, urbanisation, and climate change are all significant issues for medium-, large, and mega-sized cities worldwide, particularly regarding sustainability. The following five trends are defined by Deloitte (2022) as addressing the issues facing the transportation industry: 1) Creating sustainable financing methods for transportation, 2) Addressing the issue of electric vehicles and infrastructure for charging them, 3) Modernizing transportation systems fairly and

inclusively, 4) Increasing the sustainability of transportation networks, and 5) Quickening the pace of technological and digital advancement (Deloitte, 2022). In addition to these difficulties, 193 member nations, including ours, have proposed the Sustainable Development Goals, which focus on resolving current crises and boosting prosperity for 2015–2030. With the help of the Paris Agreement, these objectives aim to turn the battle against climate change into a socially and economically inclusive model.

2.1 Advantages of Intelligent Transportation Systems

The benefits of ITS applications, which have become widespread with technology development, are detailed below.

1. Improved traffic efficiency

The capacity of ITS to enhance traffic flow and lessen traffic congestion is among its most significant advantages. Traffic signals can be controlled by identifying areas of congestion and rerouting traffic to less congested routes using real-time data from cameras, GPS, and traffic sensors. Adaptive signal management systems, for instance, adjust signal timing based on the situation to reduce waiting times at junctions. This results in better traffic flow, shorter travel times, and more seamless traffic movement, particularly during rush hour.

2. Improved road safety

ITS increases road safety for bicycles, pedestrians, drivers, and passengers. ITS helps reduce accidents by utilising technology like speed monitoring systems, real-time hazard warnings, and object identification. Additionally, ITS facilitates quicker arrival at the site and early intervention through applications created in response to traffic accidents. For instance, collision avoidance systems and Electronic Stability Control (ESC) assist drivers by informing them of potentially hazardous circumstances. Automatic speed control systems and red-light cameras are examples of traffic enforcement techniques that can identify reckless driving and promote safer driving practices.

3. Environmental benefits

Because ITS optimises traffic flow, it also lessens stop-and-go situations. As a result, vehicles use less fuel and emit fewer emissions. Carbon dioxide and other air pollutants can be considerably reduced by reducing waiting periods at junctions and in traffic. By offering real-time monitoring, intelligent routing, and convenient access to trip information, ITS also facilitates the integration of eco-friendly transportation solutions like electric cars and public transportation networks. Additionally, it encourages commuters to choose more environmentally friendly modes of transportation.

4. Encouraging public transport use and user experience

ITS improves public transport systems by providing real-time information on bus or train arrivals, delays, and route changes, increasing the convenience and reliability of

public transport services. Passengers can plan their journeys more efficiently using mobile applications and digital screens at stops. ITS can also help public transport agencies optimise applications and improve service delivery by supporting smart cards, electronic fare collection, and passenger counting features. For passengers, this means a smoother, more predictable, more accessible, and more enjoyable travel experience.

2.2. Disadvantages of Intelligent Transportation Systems

Despite the numerous advantages, Intelligent Transportation Systems have some disadvantages. They are explained in detail below.

1. High implementation and maintenance costs:

One of the main disadvantages of ITS is the significant financial investment required for implementation. The development of an ITS application involves the integration of advanced technologies such as sensors, communication networks, GPS, traffic cameras, integration software, data analysis systems, and communication network installation. The installation costs cover infrastructure applications such as electricity lines, data centres, and communication network setup. These parts are expensive up front and must be updated and maintained frequently to be safe and functional while the application runs. A yearly budget is also necessary after the system is deployed. The size and technological sophistication of the system determine the costs of things like staff training, technical support, cybersecurity precautions, data backup, software upgrades, license fees, routine maintenance and troubleshooting. This may significantly hamper adoption in poorer nations with tight funds. Additionally, installing, running, and debugging these systems calls for qualified staff, which raises continuing operating costs.

2. Data security and privacy issues:

ITS gathers and sends traffic, driver behaviour, and vehicle location data. Concerns regarding safeguarding personal privacy may surface throughout the storage, tracking, and analysis of this data. Unauthorised people can access or misuse sensitive information if it is improperly maintained. Data theft, control problems, or misuse of personal information may result from this. Additionally, cyberattacks using internet-based technologies are becoming more and more likely to target ITS.

3. Technological and infrastructure challenges

Technology compatibility and the current infrastructure are major factors in the effectiveness of ITS. The performance of ITS is greatly impacted by poor road conditions, systems that are incompatible with modern technology, and systems that are not accessible from all regions. Interoperability issues, such as ineffective communication between systems from different manufacturers or geographical locations, can also arise when integrating ITS with legacy systems or multiple applications. ITS programs must be updated frequently to keep up with technological advancements, which disrupt services and may raise long-term expenses.

4. Social and behavioural aspects

Notwithstanding its advantages, ITS may encounter prejudice from system engineers and users due to shifting customs or a lack of faith in technology. For fear of losing control or being secretly monitored, drivers may hesitate to trust traffic management or control-based application systems. Additionally, employing ITS capabilities may come with a learning curve, particularly for users not accustomed to digital technology or older populations. If ITS implementation is not adequately explained and supported, it may result in misunderstandings, annoyance, or even decreased adherence to traffic laws.

Although there are many prospects in the transportation sector with Intelligent Transportation Systems, their implementation calls for careful planning, funding, and social adjustment. The early identification and suitable resolution of issues, including excessive costs, insufficient infrastructure, data security threats, and user approach, strongly impact the success of ITS projects. Furthermore, ITS applications can become expensive and time-consuming undertakings if not properly designed. As a result, every project should start with well-defined objectives, thorough budget projections, and a workable, realistic timeframe. Planning adaptable time and cost management frameworks also lessens the impact of potential project delays or cost increases.

2.3. Environmental and Sustainable Impacts of Intelligent Transportation Systems

Intelligent transportation systems are strategic tools that safeguard the environment and promote sustainable urban living, as well as technical solutions that control traffic. They have a beneficial impact on several things, including lowering carbon emissions, conserving energy, lowering air pollution, and encouraging a sustainable mobility culture.

1. Reducing carbon emissions

Smart transportation systems minimise stop-and-go driving and needless waiting by maximising traffic flow. As a result, automobiles use less gasoline, and carbon emissions are greatly decreased. Smart signalling systems, for instance, guarantee that cars wait less at red lights. Vehicles spend less time in traffic when guided to the best path by real-time traffic control applications. Both individual automobile use and overall carbon emissions are decreased by incorporating public transit options. Therefore, ITS applications are crucial for regulating greenhouse gas emissions and lowering the carbon footprint of cities.

2. Energy efficiency and resource savings

ITS applications enable more efficient use of energy in transportation systems. For example, the infrastructure of smart charging stations for electric vehicles contributes to the balanced use of the electricity grid. Integrated with public transportation systems, ITS makes public transportation more attractive. Thus, more passengers can be transported with less energy. As traffic density decreases, resource consumption, such

as fuel and tire wear. This provides both economic savings and enables more sustainable use of natural resources.

3. Reducing air and noise pollution

Traffic density and irregular vehicle movements in traffic are the main factors that increase air and noise pollution in cities. ITS can provide direct solutions to these problems: With ITS applications, heavy traffic can be reduced, and fewer exhaust gases can be released. Less stop-and-go of vehicles reduces engine noise and brake sounds. Encouraging public transportation and reducing the number of individual vehicles can also reduce noise pollution caused by urban traffic. In this way, a more livable and healthy environment can be created in cities.

4. Increasing the culture of sustainable transportation

ITS not only improves existing transportation but also encourages the adoption of more sustainable transportation habits. Systems integrated with bicycle paths and pedestrian crossings support existing transportation. Mobile access to public transportation information and ease of use make it easier for individuals to choose public transportation instead of private vehicles. E-scooters and micro-mobility systems provide transportation for those with fewer resources. In the long term, these systems will contribute to sustainable city life by spreading environmentally friendly transportation models.

3. KARABÜK PROVINCE TRANSPORTATION CURRENT STATUS

3.1. Highway Transportation

Karabük is connected to the Black Sea highway, the TEM highway and the E-5 Highway from the south. It neighbours Bartın in the northeast and Kastamonu in the southeast. In addition, connection work to Zonguldak continues with the road that follows the Yenice Stream valley from the west and is under construction.

There is a total of 385 km of road network in Karabük. 48% (185 km) of this road network consists of state roads, and 52% (200 km) of provincial roads (Table 1). When we look at the type of road surface, there are 2 km of parquet, stabilised, and dirt roads and 115 km of bituminous hot-coated roads. In addition, there are 268 km of surface paved roads, 30% of which are bituminous hot pavement (Figure 1).

Table 1. Current State and Provincial Road Length in Karabük Province as of July 2024 (km) (General Directorate of Highways [KGM], 2024)

City	State highway	City Highway	Total
Karabuk	185	200	385

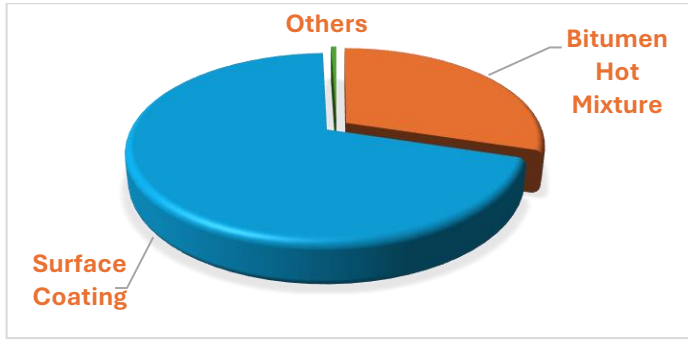


Figure 1. Road Network Surface Types in Karabük Province

The public transportation options available in Karabük are private and municipal public buses, minibuses, and taxis. While there is a high demand for public buses to transport people to the city centre, there are inadequacies in the number and frequency of trips. Long waiting times at the stops, buses waiting for short periods due to the absence or insufficient pockets in the road superstructure design, and bus stops when it approaches the stop while continuing in the current traffic, especially in the city centre, stop the traffic. There is frequent congestion due to the number of vehicles parked on the roadside, insufficient parking, and irregularity. This density negatively affects pedestrians and people who want to park their vehicles. Pedestrian traffic cannot cross the street safely due to the long queues created by vehicles and the incorrect positions of pedestrian crossings. This problem occurs frequently on weekdays and weekends, especially on the main street where Kares Shopping Centre is in the city centre.

3.2. Railway Transportation

Railway transportation is also available in Karabük. Karabük has a railway connection to Zonguldak and Ankara via Çankırı. Passenger transportation is carried out between Ankara and Zonguldak with Karaelmas Express. In addition, passenger transportation, mainly for workers, is carried out between Karabuk and Zonguldak. The raw material needs of Kardemir Iron and Steel Enterprises are met via the existing railway line and are used for product transportation.

Trains travel from Karabük to sea level at an altitude of 258 m. Due to uphill travel, the Turkish National Railway System (TCDD) has defined the average cruising speeds on the line as 70 km/h towards Zonguldak and 60 km/h towards Karabük. However, due to the line renewal works completed in 2018, it takes time for the line to be put into place, and trains have been instructed to travel slowly and carefully. For this reason, trains remain far from planned speeds. When the train travel times on the railway track between Karabük and Zonguldak are compared, an average travel time of 168.5 minutes emerges in the current situation. During this period, trains travel at an average speed of 43,03 km/h. This speed is 59% lower than the mediocre 60 km/h (Akay & Aygun, 2022).

3.3. Airway Transportation

Among the closest airports providing transportation to Karabük, Ankara Esenboga Airport is 240 km away. Additionally, Zonguldak Airport is 97,6 km away, and Kastamonu Airport is 136,4 km away. Ankara Esenboğa Airport hosts national and international flights due to its distance from Karabük and the capital's central location, Ankara. This airport is generally a preferred option for transportation to Karabük.

Although Zonguldak Airport is closer to Karabük, flight options are more limited since it is a smaller airport. Kastamonu Airport can also be an alternative option for transportation to Karabük. However, it is less preferred since it is farther away than other airports. Zonguldak Airport serves the province of Zonguldak, which is located close to Karabük, but it is a smaller airport. The airport is generally used for domestic flights, which are generally directed to Istanbul. Flights from Zonguldak Airport to Istanbul are generally organised on certain days of the week.

3.4. Karabük Province Traffic Accident Statistics

Every year in our country, thousands of people are injured, disabled, or lose their lives due to traffic accidents. As a result of traffic accidents, serious damage may occur to both your physical integrity and your property. While injuries can cause short or long-term health problems, in severe cases, permanent disabilities may also occur. Additionally, accidents can cause property damage, causing damage to your vehicles and other belongings that need to be repaired or replaced. This situation causes great costs and losses individually and socially, and creates an economic burden. To prevent traffic accidents and mitigate their consequences, it is vital to comply with traffic rules, adopt safe driving techniques, and take necessary emergency precautions.

Statistics on traffic accidents in Karabük in 2023 show serious traffic safety problems in the city. Three thousand one hundred ninety-three traffic accidents occurred, and 761 were recorded as fatal and injured (Table 2). As a result of these accidents, 48 people lost their lives, and 1203 people were injured. The total number of motor vehicles in Karabük is 73,886, and the number of accidents is quite high compared to this vehicle density (TUIK, n.d.).

Table 2. Karabük Province 2023 Traffic Accident Statistics

City	Total number of accidents	Total Number of Motor Vehicles	Number of Accidents with Fatal Injury	Number of Deaths	Number of Injured
Karabuk	3193	73 886	761	48	1203

Especially considering the number of fatal and injured accidents, it is understood that traffic inspections and driver training are insufficient. The high rate of accidents shows that various measures must be taken to increase compliance with traffic rules and make drivers more conscious. Reviewing and improving the city's road infrastructure and traffic signs can also reduce accidents. Loss of life and injuries caused by traffic

accidents negatively affect not only individuals and families but also the general well-being of society.

3.5. Karabük Province 2050 Population and Vehicle Situation Analysis

3.5.1. 2050 Population Projection

Population projection is making predictions about the population based on future trends of birth, death, and migration data, as well as some assumptions. Population projections are used in many areas. The institution from which we can obtain this data in our country is the Turkish Statistical Institute (TUIK)

Table 3. Population Values of Karabük Province Between 1955 and 2023
(TUIK, n.d.).

Year	Karabük Population
1955	49.654
1960	66.246
1965	84.457
1970	103.767
1975	116.088
1980	131.349
1985	142.569
1990	123.381
2000	116.804
2005	200.084
2010	227.61
2015	236.978
2020	243.458
2023	255.242

The arithmetic Increase Method was used in the 2035 population projection calculation.

$$N_g = N_s + k_a(t_g - t_s) \quad (1)$$

$$k_a = (N_y - N_e)/(t_y - t_e) \quad (2)$$

N_g : Estimated future population

N_s : Latest census (most current population data)

k_a : Arithmetic coefficient of increase rate

t_g : Year corresponding to the next year (the future in which the population estimate will be made)

t_s : Year corresponding to the last census

N_y :New census

N_e : Old census

t_y : New year corresponding to the new census

t_e : Old year corresponding to the old census

$$k_a = (255242 - 49654) / (2023 - 1955) = 3023,35$$

$$N_{2025} = 49654 + 3023,35 * (2025 - 1955) = 261.289 \text{ person}$$

The results of the above data are shown in Table 4. Considering the 2050 provincial population in the table, it is seen that the provincial population will increase by approximately 32% compared to 2023 in an average period of 25 years. In other words, the provincial population is expected to increase by an average of 32% in 2050. Inevitably, this significant increase will also bring transportation problems. Therefore, it is important to make effective plans to solve transportation problems that may arise in the future.

Table 4. Karabük Province's Population Projection for 2050

Year	Population
2025	261.289
2030	276.405
2035	291.522
2040	306.639
2045	321.756
2050	336.872

3.5.2. 2050 Vehicle Projection

The number of motor vehicles in Karabük province between 2019 and 2023 is shown in Table 5.

Table 5. Number of Traffic Vehicles in Karabük According to Years (TUIK, N.D.).

Year	Total Number of Vehicles
2019	66.719
2020	67.165
2021	68.427
2022	69.711
2023	73.886

The arithmetic Increase Method was used in the 2050 traffic vehicle projection calculation.

$$T_g = T_s + k_a(t_g - t_s) \quad (3)$$

$$k_a = (T_y - T_e)/(t_y - t_e) \quad (4)$$

$$k_a = (73.886 - 66.719) / (2023 - 2019) = 1792,75$$

$$T_{2025} = 66.719 + 1792,75 \cdot (2025 - 2019) = 77472 \text{ vehicle}$$

Table 6. 2050 Traffic Vehicle Projection for Karabük Province

Year	Total Number of Vehicles
2025	77 472
2030	86 433
2035	95 395
2040	104 356
2045	113 318
2050	122 279

According to the data in Table 6, the number of vehicles in the Karabük District is expected to increase steadily between 2025 and 2050. The total number of vehicles, which will be 77,472 in 2025, is expected to reach 122,279 in 2050, with an increase of approximately 9,000 to 10,000 units every five years (TUIK, n.d.). This forecast shows that traffic in Karabük province will intensify in the coming years, and therefore, significant planning needs to be made for infrastructure, road expansion, and traffic management. In addition, sustainable transportation solutions need to be developed by considering the environmental impacts of this increase. It is thought that these data will play an important role in determining the future transportation strategies of Karabük province.

Table 7. Number of Motor Vehicles in Karabük Between 2019 and 2023

Year	Total	Automobile	Minibus	Bus	Pickup truck	Truck	Motorcycle	Special Purpose Vehicles	Tractor
2019	66719	41451	1734	627	9718	3024	4085	240	5840
2020	67165	41255	1684	581	9730	3053	4635	261	5966
2021	68427	41901	1636	561	9836	3106	4986	271	6130
2022	69711	42134	1586	539	9939	3195	5780	290	6248
2023	73886	43376	1597	584	10086	3254	8240	308	6459

It is possible to find the average percentages of vehicles by considering the values in Table 7. Average Automobile Percentage (K_A) can be calculated as follows:

$$K_A = (41451 + 41255 + 41901 + 42134 + 43376) / 100 / (66719 + 67165 + 68427 + 69711 + 73886) = 61\%$$

In Karabük, the highest share of road vehicles was taken by automobiles, with a rate of 61%. The 2050 Karabük province traffic vehicle distribution projection, created because of the above calculations, is shown in Table 8.

Table 8. Traffic Vehicle Distribution Projection for Karabük Province for 2025-2050

Year	Total	Automobile	Minibus	Bus	Pickup truck	Truck	Motorcycle	Special Purpose Vehicles	Tractor
%	100	61	2	1	14	4	8	1	9
2025	77472	47258	1549	775	10846	3099	6198	775	6972
2030	86433	52724	1729	864	12101	3457	6915	864	7779
2035	95395	58191	1908	954	13355	3816	7632	954	8585
2040	104356	63657	2087	1044	14610	4174	8348	1044	9392
2045	113318	69124	2266	1133	15865	4533	9065	1133	10199
2050	122279	74590	2446	1223	17119	4891	9782	1223	11005

4. METHODOLOGY

The National Intelligent Transportation Systems Strategy Document, prepared by UAB in 2020, determined the action plan and national strategies between 2020 and 2023 by determining responsible and collaborative organisations through 5 strategic objectives and 31 action items.

This study evaluated urban transportation in Karabük through action items that directly or indirectly concern municipalities within the scope of UAB's National Intelligent Transportation Systems Strategy Document (Table 9). Pedestrians, cyclists, and private vehicle users living in Karabük were asked to determine the importance of 8 criteria consisting of action items. These articles are considered especially useful in evaluating the diversity of services municipalities offer (Republic of Turkey Ministry of Transport and Infrastructure, 2020).

Table 9. Action Items Regarding Municipalities in the Strategy Document

Action 1.4.	Establishing provincial traffic control centres
Action 1.7.	Installation of smart car park applications and electric vehicle charging stations
Action 2.2.	Passenger information systems
Action 4.4.	Establishment of a unit responsible for intelligent transportation systems in local governments
Action 4.5.	Using electric vehicles in public transportation fleets and service vehicles, and encouraging public transportation
Action 4.7.	Expanding the use of bicycles

The best-worst method, one of the multi-criteria decision-making methods, was used in the analysis of the study. Multi-criteria decision-making has proven to be an effective approach for ranking or selecting one or more alternatives from a limited number of

alternatives based on multiple, often conflicting, criteria. One of the alternative methods to these methods is the Best-Worst Method (BWM). This method attracts attention due to its effectiveness in reducing pairwise comparison times and its good performance in maintaining consistency between judgments. BWM is a multi-criteria decision-making method that can select the best and worst criteria and compare these criteria with other criteria.

Table 10. Criteria and Practice Codes

Establishing provincial traffic control centres	Criteria 1
Installation of the smart car park application	Criteria 2
Installation of electric vehicle charging stations	Criteria 3
Passenger information systems	Criteria 4
Establishment of a unit responsible for intelligent transportation systems in local governments	Criteria 5
Use of electric vehicles in public transport fleets and service vehicles	Criteria 6
Encouraging public transportation	Criteria 7
Expanding the use of bicycles	Criteria 8

According to BWM, the most important and least important criteria are determined by decision-makers (Rezaei, 2015). Then, each of these most important and least important criteria is evaluated in a pairwise comparison with other criteria. The most effective feature of BWM, compared to existing MCDM methods, is that it has fewer pairwise comparison matrices and provides more consistent evaluations (Rezaei, 2015).

BWM obtains the importance levels of the criteria through an application consisting of six stages.

Step 1: Criteria $c_1, c_2 \dots c_n$ are determined.

Step 2: Among n criteria, the most and least significant criteria are identified.

Step 3: The importance level of the most important criterion compared to other criteria is obtained by using a scale between 1 and 9 (1: equally important; 9: extremely important). It should be evaluated as 1 when it is equally important and 9 when it is very important. The vector evaluates the most important criterion according to other criteria.

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (5)$$

Step 4: Comparison of other criteria concerning the least important criterion using a scale ranging from 1 to 9. The vector evaluates other criteria according to the least important criterion.

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T \quad (6)$$

Step 5: Optimum weights of the criteria (W_1^* , W_2^* , ..., W_n^*) are calculated. If the consistency indicator is close to "0", it indicates high consistency.

The model that minimizes the maximum of $\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right|$ and $\left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jw} \right|$ differences is the model that minimizes the maximum for all j .

$$\begin{cases} \min \max_j \left\{ \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jw} \right| \right\} \\ \sum_j W_j = 1 \\ W_j \geq 0 \text{ for all } j \end{cases} \quad (7)$$

The equation (7) can be translated into linear form as follows:

$$\begin{aligned} & \min \xi \\ & \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi \text{ for all } j \\ & \left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jw} \right| \leq \xi \text{ for all } j \\ & \sum_j W_j = 1 \\ & W_j \geq 0 \text{ for all } j \end{aligned} \quad (8)$$

Step 6: With the solution of the model, criterion weights and consistency index (ξ) are calculated. In the last stage of the method, the consistency of the evaluations is tested. The consistency ratio is calculated using Eq. 9.

$$\text{Consistency Ratio} = \frac{\xi}{\text{Consistency Index}} \quad (9)$$

Table 11. Consistency Index (CI)

a_{BW}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Consistency index	0	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

As the consistency ratio approaches zero, it is concluded that the evaluations are more consistent.

After the criteria in Table 10 were determined, decision-makers made separate evaluations to make calculations with BWM. First, the most important and least important criteria were determined. The evaluations were completed by evaluating the preference levels of the most important criterion compared to other criteria and the preference levels of other criteria compared to the least important criteria, using the evaluation scale between 1 and 9.

After receiving the evaluations of the decision makers, separate linear programming models were established using Equations (5)-(8). These models were solved using the MS Excel solver add-in, and the criterion weights were calculated, as shown in Table 12. The final weights were obtained by averaging the criterion weights calculated separately for 10 decision-makers. In addition, the consistency of all evaluations was tested using Equation (9), and the consistency rates were transferred to the last line of Table 12.

Table 12. Calculated Criterion Weights and Consistency Rates

Decision Makers	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9	DM10	Final Weights
Criteria1	0,1032	0,1258	0,1940	0,0937	0,0725	0,1027	0,1293	0,1139	0,0848	0,0873	0,1107
Criteria2	0,0248	0,1887	0,1293	0,0586	0,0286	0,0280	0,1293	0,2807	0,0565	0,0748	0,0999
Criteria3	0,0590	0,0252	0,0970	0,1171	0,0453	0,0587	0,0554	0,0854	0,0848	0,0655	0,0693
Criteria4	0,2064	0,3019	0,0970	0,0586	0,0906	0,2054	0,3104	0,1709	0,3948	0,1310	0,1967
Criteria5	0,1376	0,0629	0,0647	0,0669	0,1812	0,1370	0,1940	0,1709	0,1271	0,3286	0,1471
Criteria6	0,0688	0,0943	0,0554	0,0273	0,0906	0,0822	0,0554	0,0683	0,0401	0,0333	0,0616
Criteria7	0,3178	0,1258	0,3319	0,3436	0,3100	0,3175	0,0970	0,0854	0,0848	0,1048	0,2118
Criteria8	0,0825	0,0755	0,0306	0,2342	0,1812	0,0685	0,0291	0,0244	0,1271	0,1746	0,1028
ξ	0,0949	0,0755	0,0562	0,1249	0,0525	0,0934	0,0776	0,0610	0,1138	0,1953	
Consistency Rates	0,3194	0,2917	0,1528	0,1667	0,1528	0,3571	0,2857	0,2083	0,2500	0,3036	

4. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

According to the analysis results conducted within the scope of the study, the most important criterion is "Criteria 7-Encouragement of public transportation," with a weight value of 21,18%. This criterion was followed by "Criteria 4-Passenger information systems" and "Criteria 5-Establishment of a unit responsible for smart transportation systems in local governments". On the other hand, the least important criterion was determined as "Criteria 6-Use of electric vehicles in public transportation fleets and service vehicles," with a weight value of 6.16%. In addition to the results, the consistency rates of the evaluations for all decision-makers were calculated. It was seen that all these coefficients were very close to zero, and therefore, quite consistent evaluations were made by the decision-makers.

The results indicate the first three criteria for public and smart transportation systems. It is concluded that the deficiencies in the current public transportation system should be eliminated, passenger information systems should be integrated with smart transportation systems, and a relevant unit should be established within local governments to establish and manage smart transportation systems. Intelligent transportation systems in urban transportation will positively affect many areas. These

systems play an important role in reducing the cognitive load on drivers, passengers, and pedestrians using urban transportation and improving transportation's economic, environmental, and social impacts. Moreover, smart transportation systems greatly increase the demand for public transportation. It is also important to remember that systems that improve and encourage bicycle and pedestrian safety should be developed within sustainable mobility and transportation.

Based on all these evaluations, the following suggestions are proposed for improving urban transportation in Karabük province:

1. Encouraging public transportation plays an important role in solving transportation problems. Expanding public transportation lines and increasing their hours can ease traffic by reducing the use of private vehicles. Another important issue in public transportation services is accessibility. Whether the vehicles and stops are disability-friendly should be examined, and necessary improvements should be made. Public vehicles should be integrated with smart transportation systems. Single card usage in public vehicles, displaying card information and balance via the internet or mobile systems, and balance loading systems should also be developed.
2. Existing public transport stops should be transformed into smart stops. Smart stops allow passengers to instantly track their journeys, stop information, make electronic payments, and benefit from wireless internet networks and charging units. These improvements are thought to make the city's transportation system more efficient and user-friendly.
3. Using intelligent transportation systems is one of the most effective methods for managing traffic and directing vehicles. Especially in signalled intersections, intersection management, fixed phase, multi-phase, dynamic intersection, green wave, etc., intersection and corridor management systems should be applied. In this way, traffic flow can be regulated, and density can be reduced. In addition, a more efficient transportation network can be created by adjusting the timing of traffic lights and using real-time traffic data.
4. Due to the inadequacy of safety measures on the superstructure of the roads in and around the city centre, unwanted accidents occur every year for vehicles and pedestrians, causing various injuries and deaths. A comprehensive improvement and renovation work is required to increase road safety and prevent accidents. Measures such as arranging pedestrian crossings, paying attention to traffic signs and signals, implementing speed limits more effectively, and increasing lighting should be included in these studies.
5. Improving urban transportation infrastructure will facilitate daily life and contribute to creating a sustainable transportation system in the long term. In this context, it is recommended that local governments work with relevant stakeholders to develop and implement a comprehensive transportation plan.

Contribution of The Authors

The authors declared that they contributed equally to this paper.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement of Research and Publication Ethics

Research rules and publication ethics were followed in the study.

REFERENCES

- Akay, M. E., & Aygün, H. (2022). Karabük – Zonguldak Hattında Demiryolu Hat Kapasitesinin Modellenmesi. *Politeknik Dergisi*, 25(4), 1817-1825. <https://doi.org/10.2339/politeknik.884305>
- Deloitte. (2022). Global transportation trends 2022: Future-ready transportation. Retrieved April 28, 2023, from <https://www.deloitte.com/global/en/Industries/government/public/perspectives/global-transportation-trends-2022.html>
- Gajewska, M. (2017). Application of BAN network to increase security in transport systems: Smart solutions in today's transport. 17th International Conference on Transport Systems Telematics (p. 155–166). Katowice–Ustroń, Poland.
- KGM (2023), 15th Regional Office, Kastamonu. Retrieved April 20, 2023, from <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Bolgeler/15Bolge/Projeler.aspx>
- Khan, S. M., Rahman, M., Apon, A., & Chowdhury, M. (2017). Chapter 1- Characteristics of intelligent transportation systems and their relationship with data analytics. In: M. Chowdhury, A. Apon & K. Dey (Ed.) *Data analytics for intelligent transportation systems* (p. 1–29). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809715-1.00001-8>
- Lin, Y., Wang, P., & Ma, M. (2017). Intelligent transportation system (ITS): Concept, challenge, and opportunity. *Proceedings of the IEEE 3rd International Conference On Big Data Security On Cloud (Bigdatasecurity), IEEE International Conference On High Performance And Smart Computing (Hpsc), And IEEE International Conference On Intelligent Data And Security*. Beijing, China, 167-172, doi: 10.1109/BigDataSecurity.2017.50.
- Mazur, S. (2020, December 9). An introduction to smart transportation: Benefits and examples. Retrieved April 28, 2023, from <https://www.digi.com/blog/post/introduction-to-smart-transportation-benefits>
- Peak, E. (2020, December 22). What makes transportation smart? Defining intelligent transportation. Retrieved March 16, 2023, from <https://www.iotforall.com/what-makes-transportation-smart-defining-intelligenttransportation>
- Republic of Turkey Ministry of Transport and Infrastructure. (2020). *National Intelligent Transportation Systems Strategy Document and 2020-2023 Action Plan*.

- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega (United Kingdom)*, 53, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- Selimoğlu, E. (2014). Trafik Kazalarının Nedenleri, Sonuçları ve Kazaların Önlenmesine İlişkin Öneriler. *Ziraat Mühendisliği* (361), 51-54.
- Sussman, J. (2005a). Perspectives on intelligent transportation systems (ITS). Springer Science+Business Media.
- Şenbil, M., & Yetişkul Şenbil, E. (2020). Türkiye’de Son Dönem Otomobilleşme: 2007-2018 Arası İller Bazında Analizler. *İDEALKENT*, 11(29), 373-405. <https://doi.org/10.31198/idealkent.712272>
- Tektaş M., Korkmaz K., & Erdal H. (2016). Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Geleceği Ekonomik ve Çevresel Faydaları. *Balkan Journal of Social Sciences*, 561-577
- TUIK (2023). Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri, 2023. Retrieved April 18, 2023 from <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Karayolu-Trafik-Kaza-Istatistikleri-2023-53479>
- Yan, X., H. Zhang, H., & Wu, C. (2012). Research and development of intelligent transportation systems. *Proceedings of the 11th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering Science*. pp. 321–327.



AYNI DÖŞEME BOŞLUK ORANINA SAHİP BETONARME BİNALARDA BOŞLUK KONUMUNUN YAPISAL DAVRANIŞA ETKİSİNİN DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION WITH LINEAR AND NONLINEAR METHODS OF THE
EFFECT ON BEHAVIOR OF OPENING LOCATION IN REINFORCED
CONCRETE BUILDINGS WITH THE SAME SLAB OPENING RATIO

Samet Oğuzhan DOĞAN¹

İsmail TOZLU²

Şenol GÜRSOY³

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1528656>

*Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
sgursoy@karabuk.edu.tr*

*Geliş Tarihi
(Received)
05.08.2024*

*Revizyon Tarihi
(Revised)
04.02.2025*

*Kabul Tarihi
(Accepted)
06.02.2025*

Öz

Deprem gerçeğiyle sürekli olarak karşı karşıya kalan ülkemizde, binalardaki hasarların maalesef deprem yönetmeliğinde belirtilen yapısal düzensizlikler nedeniyle oluştuğu görülmektedir. Ayrıca uygulama ve projelerdeki hatalar da binaların hasar görmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada betonarme binalarda bulunan aynı döşeme boşluklarının konumunun doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal davranışa etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla örnek olarak seçilmiş betonarme bir bina modelinde farklı konumlarda aynı orandaki döşeme boşluklarının, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği koşulları da dikkate alarak, deprem performansına etkileri Sta4-CAD programı yardımıyla irdelenmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal çözümlemelerden elde edilen sonuçlar perde duvarların etrafında döşeme boşluğu olması durumunda yatay yük aktarımında büyük problemler oluştuğunu ve söz konusu döşeme boşluğunun planda köşe noktalarında yapılması durumunda yapısal davranışın olumsuz etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Depreme dayanıklı tasarım, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz, döşeme boşluğu konumu.

Abstract

In our country, which is constantly faced with the reality of earthquakes, unfortunately, it is seen that the damages in buildings occur due to the structural irregularities specified in the earthquake regulations. In addition, errors in implementation and projects also cause damage of buildings. In this study, the effects of the location of the same slab openings in reinforced concrete buildings on linear and nonlinear structural behaviour were comparatively investigated. For this purpose, the effects on the earthquake performance, considered the conditions of the Turkish Building Earthquake Code, of the same ratio of slab openings at different locations in a reinforced concrete building model selected as an example were examined with the help of the Sta4-CAD program. The results obtained from linear and nonlinear structural analyses reveal that major problems occur in horizontal load transfer in cases where there is a slab opening around the shear walls, and that structural behaviour is negatively affected when the slab opening is made at the corner points in the plan.

Keywords: Earthquake resistant design, linear and nonlinear analysis, slab opening location.

¹ Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, Türkiye.
oguzhan_dogan_1@windowslive.com.

² Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye.
ismailtozlu@karabuk.edu.tr

³ Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye.
sgursoy@karabuk.edu.tr

1. GİRİŞ

Türkiye’de dünya mimarisinden esinlenerek ve ülke koşulları göz ardı edilerek farklı mimari tasarımlar ortaya konulmaktadır. Bundan dolayı da Türkiye’deki deprem gerçeğine rağmen inşaat uygulamalarında hala estetik kaygılar ve çok fonksiyonlu kullanımlar öncelik taşımaktadır. Diğer bir ifadeyle söz konusu tasarımlar ülkemizin koşullarına bakılmaksızın estetik kaygılar ön plana çıkarılarak yapılmaktadır. Ayrıca estetik kaygılar ön plana çıkarılarak asimetrik ve/veya simetrik döşeme boşlukları olan yapılar oluşturulmaktadır. Özetle, gelişen ve değişen inşaat uygulamalarına bakıldığında öncelikli olarak mimari tasarımlar ön plana çıkmaktadır. Diğer taraftan depremlerde hasar gören binalar incelendiğinde meydana gelen hasarların bazen doğrudan doğruya mimari tasarımlarla ilişkili olduğu görülmektedir (TMMOB-a, 1993; TMMOB-b, 1993; Durmuş vd., 1999; Sezen vd., 2003; Doğangün, 2004; Korkmaz vd., 2011; Işık vd., 2022). Mimari tasarımda özgür davranmak adına ülke koşulları gözardı edilerek taşıyıcı sistem düzenlemesi normal koşullarda dahi güvenli bir çözümü zorlaştırırken, bu duruma deprem etkileri de eklendiğinde taşıyıcı sistem davranışında maalesef çok daha önemli sorunlar ortaya çıkmaktadır (Gürsoy, 2014; Gürsoy vd., 2015; Gürsoy ve Öz, 2016; Gürsoy ve Doğan, 2020; Akbaş ve Çalışkan, 2023; Tozlu ve Gürsoy, 2024a). Bu hususlar düşünüldüğünde taşıyıcı sistemin tasarım ve düzenlenmesinin tekniğine uygun yapılması büyük önem arz etmektedir. Türkiye’de çoğu deprem ülkesinde olduğu gibi farklı zamanlarda yürürlükte olan deprem yönetmeliklerinde gerçekleştirilecek tasarımlar için bazı hüküm ve öneriler bulunmaktadır (ABYYHY, 1998; TDY, 2007; TBDY, 2019).

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde (TBDY) *Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar* kapsamında, herhangi bir kattaki döşemede merdiven ve asansör boşlukları dahil, boşluk alanları toplamının kat brüt alanının 1/3’ünden büyük döşeme boşluklarından kaçınılması gerektiği belirtilmektedir. Aksi durumda döşeme süreksizliğinden dolayı planda A2-I türü döşeme süreksizliği oluşacağı ve döşemelerin yatay düzlemde rijit diyafram olarak çalışmadığı ifade edilmektedir (TBDY, 2019). Söz konusu döşeme süreksizliği bulunan betonarme binalarda, döşemelerin kendi düzlemlerinde etkiyen deprem kuvvetlerini düşey taşıyıcı yapısal elemanlara güvenle aktarabildiğinin gösterilmesi için iki boyutlu *levha (membran)* veya *kabuk* sonlu elemanlar ile modellenmesi gerekmektedir. Literatürdeki çalışmalarda döşeme boşluğu içeren betonarme yapılarda boşluk oranıyla birlikte döşeme boşluğunun kat planındaki yerinin, taşıyıcı sistem seçiminin ve kat planına yerleştirilme şeklinin önemli olduğu dile getirilirken (Terzi ve Elçi, 2006; Yön vd. 2009) söz konusu düzensizliklerin mevcut olduğu betonarme binalarda, burulma etkilerini azalttığı için, taşıyıcı sistem olarak perdeli veya perde + çerçeveli olan betonarme yapıların incelenmesi buna ek olarak da uygulayıcılar tarafından tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir (Aktan ve Kıraç, 2009; Terzi ve Elçi, 2009; Öztürk, 2013; Kasap vd., 2015; Boru, 2022; Öztemel vd., 2022).

Bu çalışmada Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği koşulları dikkate alınarak betonarme binalarda planda farklı konumlarda aynı orandaki döşeme boşluklarının söz konusu binanın deprem performansına etkileri Sta4-CAD programı yardımıyla incelenmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal çözümlemelerinden elde edilen bulguların karşılaştırılmasıyla daha emniyetli ve ekonomik tasarımlar için bazı sonuç ve öneriler sunulmuştur.

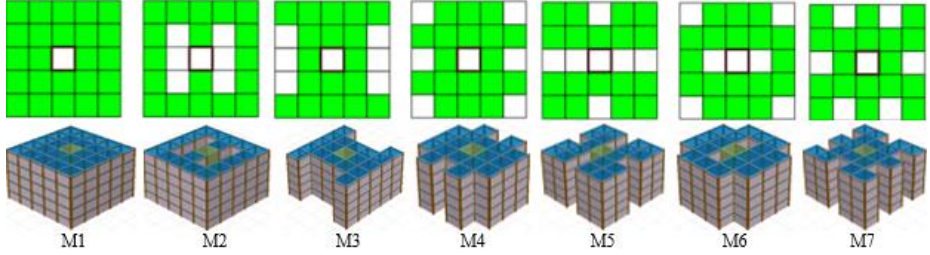
2. MATERYAL METOT

Bu çalışmada aynı oranda ve farklı konumlarda döşeme süreksizliğine sahip 7 adet betonarme bina modeli incelenmiştir. Bunlardan 1. model (M1) referans model olarak dikkate alınarak diğer bina modelleri boşluk alanının plan alanına oranı eşit olacak şekilde seçilmiştir. Bu çalışmada dikkate alınan çekirdek perdeli ve çerçeve sistemli taşıyıcı sistemlere sahip konut türü 7 adet binanın kat planları ve 3 boyutlu görünimleri Şekil 1’de verilmiştir. Bu şekilde 5 kattan oluşan söz konusu binaların kat yükseklikleri eşit ve 3m’dir. En dıştaki donatının dış yüzünden beton yüzüne olan mesafeyi ifade eden net beton örtü kalınlığı genel geçer bir değer olarak 25 mm alınmıştır. Bu durumda çekme donatısı ağırlık merkezinden beton yüzüne olan mesafe olarak tanımlanan beton örtü kalınlığı (d') çekme donatısı ve etriye kalınlığı göz önünde bulundurularak yaklaşık 40 mm olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca kolonlar ve kirişler çubuk eleman, kalınlıkları 150 mm olan döşemeler ise alan eleman olarak modellenmiştir. Yapısal çözümlemelerde TBDY etkin kesit rijitlikleri dikkate alınmış, düğüm noktaları tam rijit birleşim ve zemin kat kolonlarının temele tam ankastre bağlantılı olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca her bir açıklığı 5 m’den oluşan kat planlarının toplam yatay uzunlukları her iki doğrultuda 25 m’dir. Yapısal çözümlemelerde dikkate alınan diğer tasarım parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. TBDY md. 6.1.3 gereğince yapısal olmayan elemanların ağırlığının, bulunduğu katın ağırlığına oranı %10’dan büyük olması halinde taşıyıcı sistemin bir parçası olarak analizlerde dikkate alınması gerekse de yapılan çalışmada tuğla duvarların yatay rijitliğe katkısı ihmal edilerek değerlendirme yapılmıştır. Bu durumda tuğla duvarlar ölü yük olarak kirişlere etkiltilmiştir.

Tablo 1. Yapısal Çözümlemelerde Kullanılan Tasarım Parametreleri

Bina önem katsayısı (I)	1	
Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R)	5,6	
Dayanım fazlalığı katsayısı (D)	2,5	
Hareketli yük katılım katsayısı (n)	0,3	
Kolonların enkesit boyutları (mm)	450 x 450	
Kirişlerin enkesit boyutları (mm)	300 x 600	
Perde duvarların kalınlıkları (mm)	300	
Döşemelerin kalınlığı (mm)	150	
Deprem düzeyi	DD2	
Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{ds})	0,8812	
1s’lik periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (S_{d1})	0,354	
Eksantirisite (%)	5	
Sönüm oranı (%)	5	
Yerel zemin sınıfı	ZC	
Betonarme birim hacim ağırlığı (kN/m^3)	2,5	
Malzeme sınıfları	Beton	C25
	Donatı	B420C
Elastisite modülü (MPa)	Beton	30000
	Donatı	200000
Tüm döşemeler için kaplama yükü	G (kN/m^2)	2,12
	Q (kN/m^2)	2

Tuğla duvar	Kalınlık (mm)	130
	Yükü (kN/m)	3,25



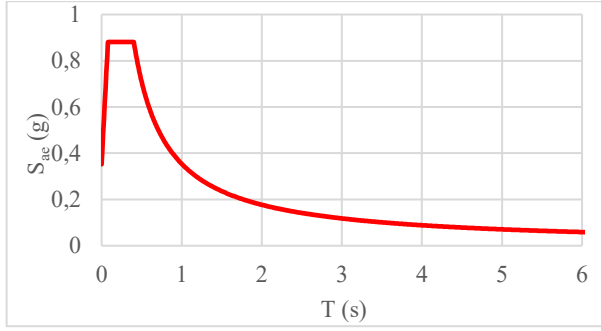
Şekil 1. Bina Modellerinin Kat Planları ve 3 Boyutlu Görünümleri

3. YAPISAL ÇÖZÜMLEMELER

Bina modellerinin doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal çözümlemeleri TBDY koşulları gözetilerek gerçekleştirilmiştir. Doğrusal (lineer) hesap için taşıyıcı sistem davranış katsayısı süneklik düzeyi yüksek boşluksuz perdeli ve çerçevesi sistemler için 7 alınsa da TBDY'e göre perde duvar taban momentinin toplam yapı devrilme momentine oranı tüm modeller için 1/3'ten büyük çıktığı için 4/5 oranında azaltılarak 5,6 alınmıştır. Ayrıca yapısal çözümlemelerde dikkate alınan tasarım spektrum eğrisi Şekil 2'de verilmektedir.

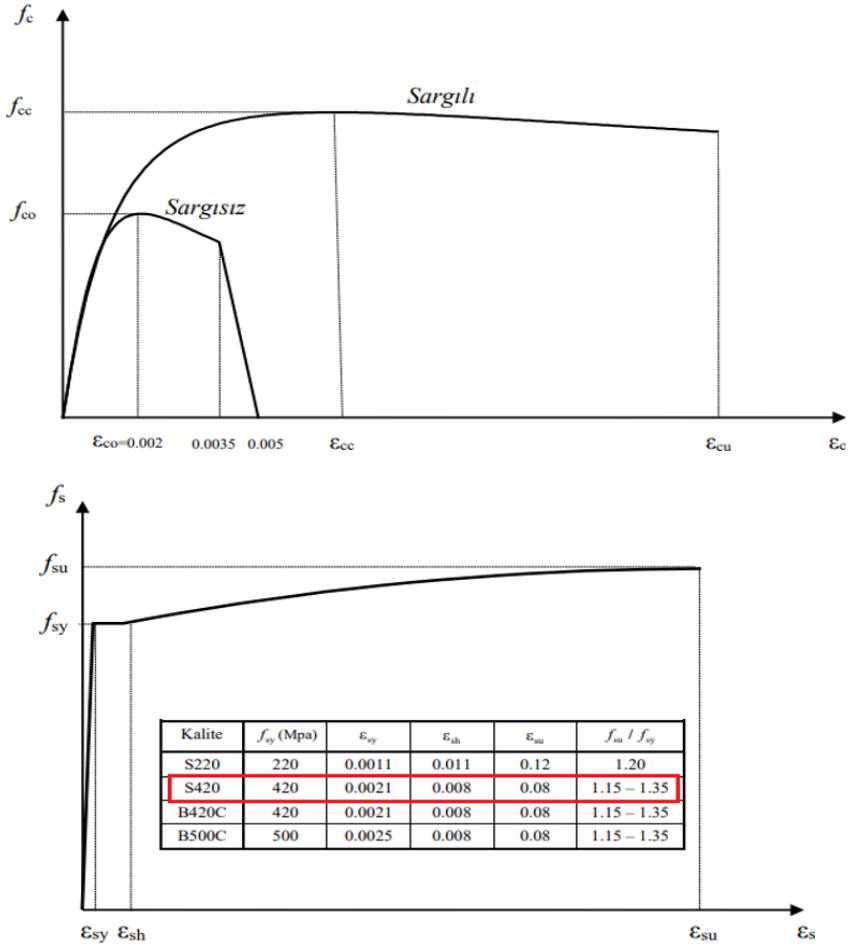
İncelenen modeller konut olarak ele alındığından *Bina Kullanım Sınıfı* (BKS) değerinin 3 olması ve kısa periyot spektral ivme değerinin (S_{DS}) 0,75'ten büyük olması sebebiyle *Deprem Tasarım Sınıfı* (DTS) 1 olarak tespit edilmiştir. Toplam bina yüksekliği (15 m) ve DTS'na göre *Bina Yükseklik Sınıfı* (BYS) değeri 6'dır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen doğrusal analizler modellerin *Dayanım Göre Tasarım* (DGT) felsefesiyle öntasarımı için kullanılmıştır. Buradaki amaç ele alınan modeller için uygun kesit boyutlarını ve donatı oranlarını belirlemektir. Bunun yanı sıra çekirdek perdeli olarak düzenlenen taşıyıcı sistemlerde burulma etkilerinin daha etkin olabilmesi sebebiyle burulma düzensizlikleri karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak DGT yaklaşımındaki kontrollerden görel kat ötelenmeleri sonuçları değerlendirilmiştir. Modeller için ikincil mertbe etkileri ihmal edilebilir düzeyde olduğu için bu durum hakkında değerlendirme gerçekleştirilmemiştir.

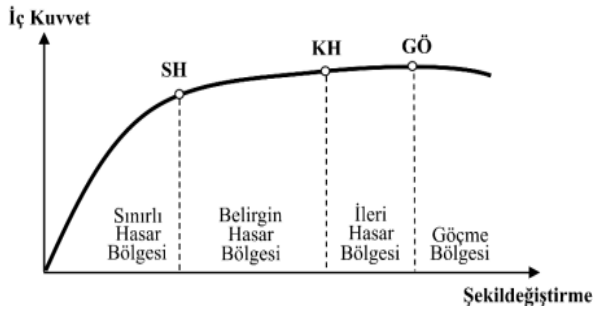


Şekil 2. Yapısal Çözümlerinde Dikkate Alınan Tasarım Spektrumu

DGT ile öntasarımı yapılmış modellerin mevcut yapılar olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle performans hedefi için değerlendirme yaklaşımı TBDY gereği doğrusal olmayan yöntemlerle analiz edilmiştir. Doğrusal olmayan çözümler TBDY'ne göre gerçekleştirilmiştir. Buna göre analiz modellerinde kolon ve kirişler çubuk eleman, perde duvarlar ise düzlem dışı şekil değiştirmelerin de dikkate alınabildiği 3 boyutlu kabuk sonlu eleman olarak modellenmiştir. Çekirdek perdeli taşıyıcı sistemlerde burulma etkilerinin daha fazla olabilmesi nedeniyle doğrusal olmayan analiz için tek modlu itme metodu yerine çok modlu itme metodu tercih edilmiştir. Dikdörtgen kesitli ya da plandaki en büyük kol uzunluğunun toplam perde yüksekliğine oranının 0,5 değerini aşmaması durumunda perde elemanlar için TBDY şartlarıncı yığılı plastik mafsallı davranış modeli kullanılabilir. Ancak mevcut yapıların çekirdek perdeli sistem olması nedeniyle doğrusal olmayan yapısal çözümlerde taşıyıcı sistem elemanlarında yayılı plastik mafsallı davranış modeli dikkate alınmıştır. Modellemede tercih edilen malzeme davranışları Şekil 3'te ve TBDY'de kesit hasar sınırları ise Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 3. Beton ve Donatı Çeliğinin Doğrusal Olmayan Malzeme Modelleri (TBDY, 2019)



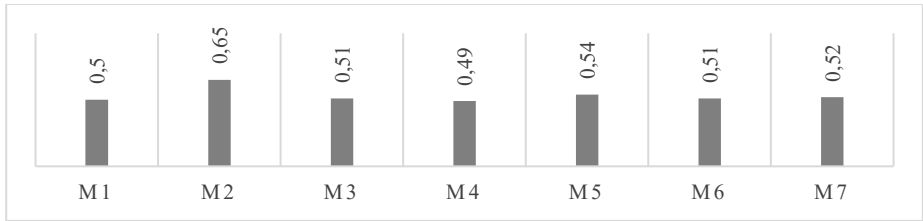
Şekil 4. TBDY'ne Göre Hasar Bölgeleri ve Sınırları (TBDY, 2019)

3.1. Modal Analiz Sonuçları

Modal analizler sonucu elde edilen ilk 3 mod değerleri tüm modeller için Tablo 2’de, burulma modu periyot değerleri Şekil 5’te verilmektedir. Tüm bina modelleri için hâkim mod burulma etkisinde çıkmıştır. Bu durumun kat kütle merkezlerinde bulunan perde duvarlardan kaynaklandığı açıkça ortadadır. Ayrıca en büyük burulma etkilerinin M2 ve M5 modellerinde olduğu görülmüştür. Bu husus diğer bina modelleriyle düşünüldüğünde, bina merkezindeki perde elemanlara döşeme boşlukları nedeniyle yük aktarılamaması durumunda, perde elemanların yeterli yük alamaması sebebiyle çevre akslardaki çerçeve elemanların daha çok zorlanmasıyla artan yatay deplasman değerlerinden olduğu söylenebilir.

Tablo 2. Modellerin İlk 3 Mod Değerleri (s)

Modeller	Burulma Modu Periyodu	X-X Doğrultusu Periyodu	Y-Y Doğrultusu Periyodu
M1	0,50	0,394	0,394
M2	0,65	0,388	0,644
M3	0,52	0,353	0,351
M4	0,49	0,351	0,353
M5	0,54	0,355	0,356
M6	0,51	0,354	0,353
M7	0,52	0,363	0,361

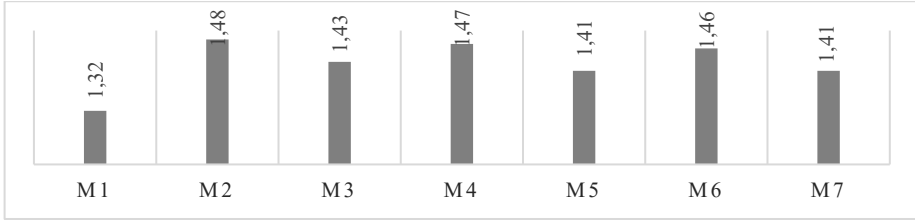


Şekil 5. Bina Modellerinin Burulma Modu Periyot Değerleri

Dikkate alınan yapı planları her iki yatay eksene göre yükleme ve taşıyıcı sistem boyutları olarak simetrik olduğu için kat kütle merkezi ve rijitlik merkezi tüm modeller için kat merkezinde çakışmaktadır. Burada burulma modlarının baskın olmasının nedeni kütle ve rijitlik merkezi arasındaki fark (eksantirisite) yerine yatay rijitliği büyük olan perde duvarların kat merkezinde toplanmasından kaynaklanmaktadır.

3.2. Doğrusal Hesap Sonuçları

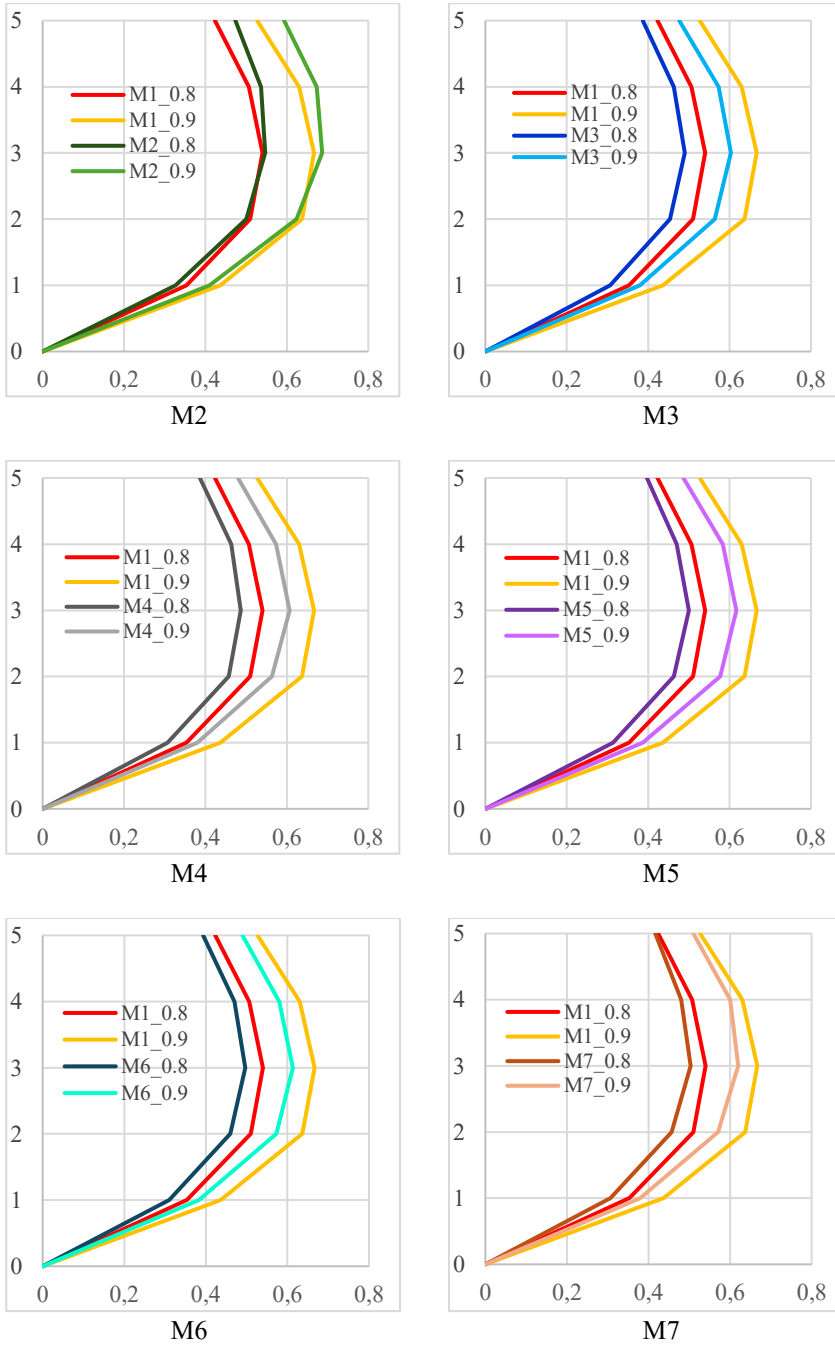
Doğrusal analiz sonucu elde edilen burulma düzensizliği katsayıları Şekil 6’da verilmektedir. Bu şekilden de beklendiği gibi en düşük burulma düzensizliği katsayısı M1 modelinde elde edilmiştir. Ancak bu model dahil tüm bina modellerinde perde duvarlar kütle merkezinde toplandığı için TBDY’de verilen sınır değer aşılmıştır.



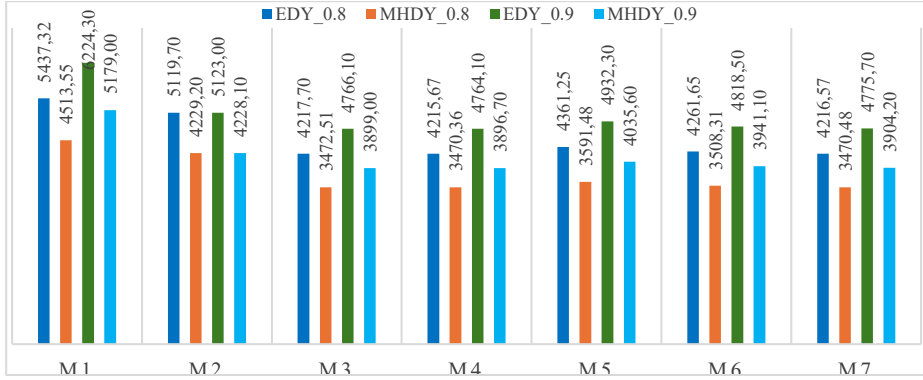
Şekil 6. Bina Modellerinin Burulma Düzensizliği Katsayıları

Doğrusal yapısal çözümlemeler sonucu her bir model için x-x doğrultusundaki görelî kat ötelenmeleri, eşdeğer taban kesme kuvveti büyütme katsayısı hesabında kullanılan ampirik katsayının (γ_E) burulma düzensizliği gereği dikkate alınması ve alınmaması durumları için karşılaştırmalı olarak Şekil 7’de verilmektedir. Kütlelerin azalmasına bağlı olarak yatay yükün azalmasıyla M2 modeli dışındaki tüm bina modellerinde M1 modeline göre görelî kat ötelenmeleri mertebelerinde azalmalar olduğu görülmektedir. M2 modelinde ise kütle ve yatay yük azalsa da döşeme süreksizliğinden kaynaklı yük aktarımı problemlerinden dolayı görelî ötelenme değerleri M1 modelinden büyük çıkmıştır. M2 modelindeki görelî ötelenmelerinin M1 modelindeki görelî ötelenmelere oranının maksimum değeri $\gamma_E=0,8$ ve $\gamma_E=0,9$ için sırasıyla 1,12 ve 1,13 olarak elde edilmiştir. Ayrıca görelî kat ötelenmeleri M3-M4-M5-M6 için yaklaşık değerler göstermiştir. Diğer taraftan M1 modelindeki görelî ötelenmelere oranı, M3-M4-M5-M6 için ortalama 0,92 olarak elde edilmiştir. M7 modelinde üst katlarında M3-M4-M5-M6 modellerine göre M1 modeli görelî kat ötelenmeleri değerlerine yaklaşımlar gözlemlenmiştir.

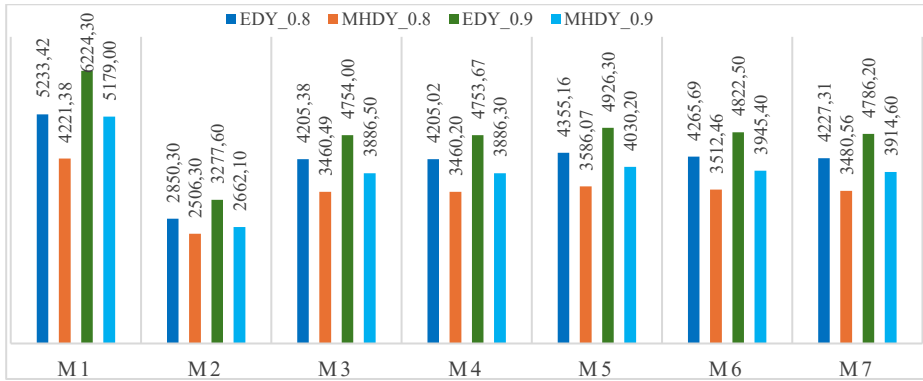
Yapısal çözümlemelerden her bir model için burulma düzensizliğinden dolayı eşdeğer taban kesme kuvveti büyütme katsayısı hesabında kullanılan ampirik katsayının (γ_E) burulma düzensizliği gereği dikkate alınması ve alınmaması durumlarında x-x doğrultusu için elde edilen taban kesme kuvveti değerleri Şekil 8’de verilmektedir. Modal hesap sonucu elde edilen taban kesme kuvvetlerinin eşdeğer deprem yükünden elde edilen taban kesme kuvvetlerine oranı γ_E katsayısının 0,8 ve 0,9 alınması durumlarının her ikisi için tüm modellerde yaklaşık 1,2 çıkmıştır. γ_E değerinin 0,9 alınması durumunda 0,8 alınması durumuna göre hem eşdeğer deprem yükünden hem de modal hesaptan elde edilen taban kesme kuvveti değerleri %10 artmıştır. Benzer karşılaştırmalar y-y doğrultusu için Şekil 9’da verilmektedir. Bu şekilden de x-x doğrultusu için elde edilen sonuçların y-y doğrultusu için de yaklaşık olarak geçerli olduğu görülmektedir. Burada dikkat çeken husus y-y doğrultusunda döşeme süreksizliğinden dolayı M2 modelinde perde duvarlara yük aktarımında yaşanan problem nedeniyle söz konusu doğrultudaki perde duvarların yük alamamasından kaynaklanan toplam taban kesme kuvvetindeki düşüştür. Bu değerlendirmelerin genel sonucunda döşeme boşluk oranının aynı olması durumunda plandaki yerleşimi eşdeğer deprem yükünden ve modal analizden, γ_E değerinin 0,8 ya da 0,9 alınması durumları için elde edilen sonuçların değişmeyeceği söylenebilmektedir.



Şekil 7. Bina Modellerinin Görel Kat Ötelenmeleri



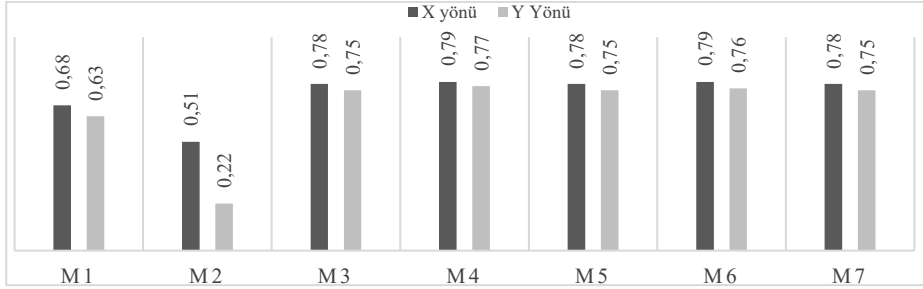
Şekil 8. Bina Modellerinin x-x Doğrultusundaki Toplam Deprem Yüğü (kN)



Şekil 9. Bina Modellerinin y-y Doğrultusundaki Toplam Deprem Yüğü (kN)

Çalışmada ele alınan yapı planlarında boşluk alanı/brüt kat alanı değeri M1 referans modeli dışındaki tüm modeller için 0,28 değerinde olup 1/3 (0,33) değerinden küçüktür. Modellerdeki A2 düzensizlik durumu boşluk oranının fazlalığından değil, taşıyıcı sistem elemanları arasındaki yük aktarımını güvenle sağlayamayacak yerel döşeme boşluklarının olması nedeniyle oluşmaktadır. Bilindiği gibi yapıya gelen yatay yükün büyük bir kısmı perde duvarlar tarafından taşınmaktadır. Yerel döşeme boşluklarının perde elemanlar etrafında olması durumunda perde elemanlara oldukça düşük yatay yük iletilebildiği için perde elemanların taşıyıcı sistemin tümü göz önüne alındığında yatay yük taşıma kapasitesinde etkisiz kalmaktadır. Perde elemanların yatay yük taşımasında etkisizliği ile oluşan bu durum çerçeve elemanların daha çok zorlanmasına neden olmaktadır. Gerçekleştirilen doğrusal yapısal çözümlemelerden perde duvar taban devrilme momentlerinin bina devrilme momentlerine oranı Şekil 10'da verilmektedir. Bu şekilden düzenli olan M1 modelindeki oran düşey taşıyıcı elemanların azalmasına bağlı olarak, M2 modeli hariç, diğer modellerde x-x doğrultusu için yaklaşık %15 ve y-y doğrultusu içinse yaklaşık olarak %20 değerinde artmıştır. Ayrıca M2 modelinde ise bazı perde duvarların, döşeme süreksizliğinden dolayı yük aktarımındaki problemten kaynaklı perde duvar olarak çalışamamasından dolayı diğer bina modellerine kıyasla oldukça az yatay yük aldıkları dolayısıyla da perde duvar

taban devrilme momentlerinin bina devrilme momentlerine oranında, M1 modeline kıyasla x-x doğrultusu için yaklaşık 1,33 kat ve y-y doğrultusu için yaklaşık 2,86 kat azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 10. Bina Modellerinin Perde Duvar Taban Momenti Oranları

3.3. Doğrusal Olmayan Hesap Sonuçları

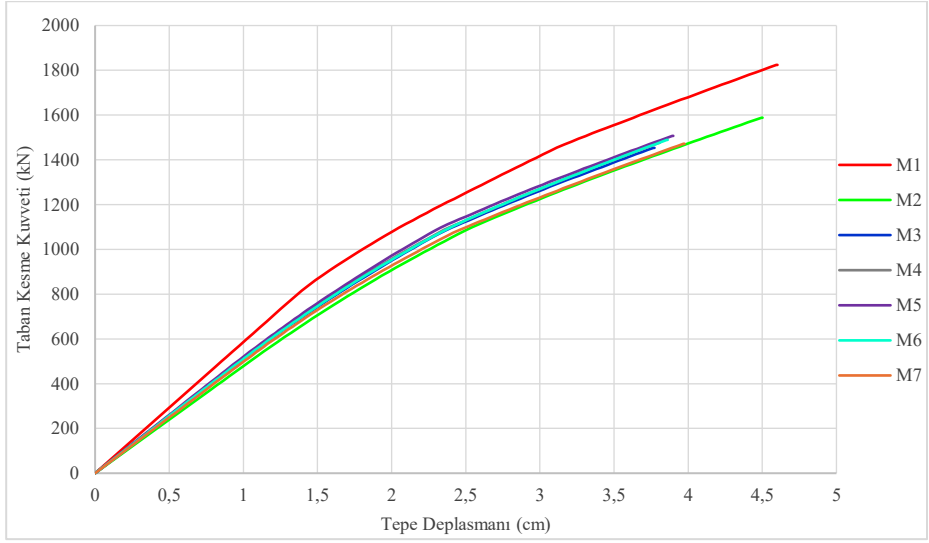
Doğrusal olmayan yapısal çözümlemelerden x ve y doğrultusunda elde edilen itme eğrileri sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmektedir. Döşeme süreksizliği en az olan M1 modelinde kapasitenin en büyük olduğu her iki şekilden de görülmektedir. Ayrıca M2 modeli hariç diğer bina modelleri için planda her iki doğrultuda benzer özellikler olduğu için x-x ve y-y doğrultularında sonuçlar oldukça benzer olarak elde edilmiştir. Ancak M2 modelinde y-y doğrultusunda yatay doğrultudaki döşeme süreksizliğinden dolayı perde duvarlara yük aktarımı problemi olduğu için M2 modeli y-y doğrultusunda perde-çerçeve sistemli bina gibi değil çerçeve sistemli bir bina gibi davranmış göstermektedir. Bu nedenle y-y doğrultusunda yapısal rijitliğin az olduğu, diğer bir ifadeyle maksimum yerdeğiştirmenin plastik şekildeğiştirmelerin başladığı andaki şekildeğiştirmeye oranı temsil eden sünekliğinin diğer modellerden oldukça büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca yapısal çözümlemelerden sünekliğin artması deprem etkisinde yapısal sistemlerin hasar alarak enerji tüketiminin artmasını sağlasa da tek başına deprem güvenliğinin sağlanması koşulunu yerine getirmek için yeterli olmadığı görülmüştür. Diğer taraftan sünekliğin yanında yapısal davranışta yüklerin güvenle taşıyıcı elemanlar arasında aktarımının da son derece önemli olduğuna söz konusu çalışmayla dikkat çekilmiştir. Diğer taraftan diğer bina modellerinin itme eğrileri her iki doğrultu için benzer çıkmıştır.

TBDY’nde Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH), Göçmenin Önlenmesi (GÖ) ve göçme durumu olarak 4 farklı performans düzeyi verilmektedir. Hesaplamalar sonucu herhangi bir kat için düşey taşıyıcı elemanlarda plastik hasarın mevcut olmaması ve kirişlerin en çok %20’si hasar almış ise SH performans düzeyi sağlanmış kabul edilmektedir. Eğer kirişlerin en çok %35’i ileri hasar bölgesinde ve düşey taşıyıcı elemanların tümünün Sınırlı hasar bölgesinde ya da belirgin hasar bölgesinde olması durumunda ya da ileri hasar bölgesindeki düşey taşıyıcı elemanların her bir katta toplam kesme kuvvetinden aldığı payın %20’nin (en üst katta %40) altında olmak şartıyla ileri hasar bölgesinde olması durumunda KH performans düzeyinin sağlandığı varsayılır. Buna ek olarak kat kirişlerinin en fazla %20’si göçme bölgesinde ve diğer tüm elemanların göçme bölgesine ulaşmamış olması ve belirgin hasar sınırı aşılmış

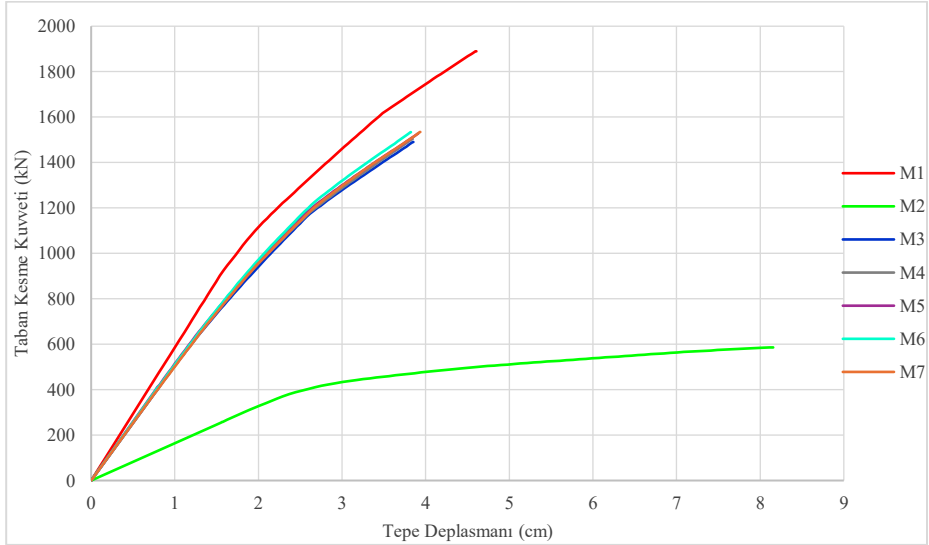
olan düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetlerinin, o kattaki tüm düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetine oranının %30'u aşmaması durumunda GÖ performans düzeyinin sağlandığı belirtilmektedir. GÖ durumunun sağlanamaması durumunda ise yapının göçtüğü kabul edilmektedir.

Doğrusal olmayan çok modlu itme analizi sonucu elde edilen yapısal elemanlardaki hasar dağılımları x ve y doğrultuları için elverişsiz durum dikkate alınarak Tablo 3'te verilmektedir. Bu tablodan M2 modeli dışındaki diğer bina modellerinde kiriş hasarı görülmemiştir. Düşey taşıyıcı elemanlardaki hasar dağılımları incelendiğinde perde duvarların yük almamasına bağlı olarak M2 modelinin 1. katındaki kolonların yaklaşık %70'i belirgin hasar mertebesine geçmiştir. Diğer bina modellerinin düşey taşıyıcı hasarları 1. ve 2. katlarında gözlemlenmiştir. Bu durum dikkate alındığında en iyi yapısal performansın M1 modelinden elde edildiği görülmektedir. Daha sonra M5 ve M7 modelleri gelirken en olumsuz yapısal performans M4 ve M6 modellerinde olduğu görülmüştür. Sonuç olarak döşeme süreksizliğinin bulunmadığı M1 modelinde en iyi yapısal performans, döşeme süreksizliğinin konumuna bağlı olarak M2 modelinde en olumsuz performansın elde edildiği görülmektedir. Ayrıca diğer bina modelleri için değerlendirme yapıldığında, bina modeli planın köşe noktalarında kolon-kiriş-döşeme olan modeller (M5&M7) köşe noktasında süreksizlik olan modellerden (M4&M6) daha iyi performans göstermektedir. Bu durumun köşe noktalarında mevcut olan yapısal elemanların burulma rijitliğini arttırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca bu husus teknik literatürdeki perde-çerçeve sistemler için yapılan çalışmalarda da burulma rijitliğinin artması için perde duvarların köşe noktalara her iki doğrultuda çalışacak şekilde yerleştirilmesi mantığıyla da uyushmaktadır (Aktan ve Kıraç, 2010; Sayın vd., 2010; Boru, 2022; Tozlu ve Gürsoy, 2024b). Diğer taraftan Şekil 6'da verilen burulma düzensizliği katsayıları da incelendiğinde köşe noktalarda taşıyıcı elemanlar bulunan M3-M5-M7 modellerinin burulma düzensizliği katsayılarının M4-M6 modellerinden düşük olduğu da görülmektedir.

Tablo 3 incelendiğinde, sonuç olarak her bir model için özellikle zemin katlardaki düşey taşıyıcı elemanlarda hasar mevcut olması hiçbir modelin SH performans düzeyini sağlayamadığını göstermektedir. M2 modelinde perde elemanların yatay yük taşınmasına yeterli katkı sağlayamadığından artan deplasmanlarla birlikte çerçeve elemanlarda oldukça büyük mertebelerde plastik hasarlar olduğu görülmektedir. Diğer modeller kirişlerde plastik hasar görülmemektedir. Düşey taşıyıcı elemanların ise %5~10 mertebelerinde belirgin hasar mertebesinde olduğu görülmüştür. Bütün bu durumlar birlikte değerlendirildiğinde incelenen modeller için Şekil Değiştirmeye Göre Tasarım (ŞDGT) ilkesiyle hedeflenen KH performans düzeyinin sağlandığı görülmüştür. Ancak hasarlı düşey taşıyıcı eleman yüzdesi M1 referans modeline göre M2 modeli haricindeki diğer modellerde 1,2~1,8 kat artış olduğu görülmüştür.



Şekil 11. Bina Modellerinin x-x Doğrultusundaki İtme Eğrileri



Şekil 12. Bina Modellerinin y-y Doğrultusundaki İtme Eğrileri

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu makalede, TBDY koşulları dikkate alınarak planda farklı konumlarda aynı orandaki döşeme boşluklarının söz konusu binanın deprem performansına etkileri Sta4-CAD programı yardımıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar ve önerileri aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

Tablo 3. Taşıyıcı Sistem Elemanları Hasar Dağılımları (%)

Bina modelleri	Katlar	Kirişler		Düşey taşıyıcı elemanlar		Bina modelleri	Katlar	Kirişler		Düşey taşıyıcı elemanlar	
		SH	BH	SH	BH			SH	BH	SH	BH
M1	5	100	0	100	0	M5	5	100	0	100	0
	4	100	0	100	0		4	100	0	100	0
	3	100	0	100	0		3	100	0	100	0
	2	100	0	99,8	0,2		2	100	0	99,8	0,2
	1	100	0	94,6	5,4		1	100	0	93,4	6,6
M2	5	100	0	100	0	M6	5	100	0	100	0
	4	100	0	100	0		4	100	0	100	0
	3	14,3	85,7	100	0		3	100	0	100	0
	2	0	100	100	0		2	100	0	99,8	0,2
	1	0	100	28,3	71,7		1	100	0	90,4	9,6
M3	5	100	0	100	0	M7	5	100	0	100	0
	4	100	0	100	0		4	100	0	100	0
	3	100	0	100	0		3	100	0	100	0
	2	100	0	99,8	0,2		2	100	0	99,8	0,2
	1	100	0	93,3	6,7		1	100	0	93,2	6,8
M4	5	100	0	100	0						
	4	100	0	100	0						
	3	100	0	100	0						
	2	100	0	99,8	0,2						
	1	100	0	90,3	9,7						

SH: Sınırlı Hasar BH: Belirgin Hasar

- Gerçekleştirilen modal analizlerden döşeme boşluklarının kat kütle merkezine yakın olduğu bina modellerinde burulma periyodunun arttığı görülmektedir.
- Doğrusal yapısal çözümlerlerden, M2 modeli hariç, tüm bina modellerinde M1 modeline göre görece kat ötelenmelerinde azalmalar ve M2 modelinde ise döşeme süreksizliğinden kaynaklı yük aktarımı problemlerinden dolayı görece ötelenme değerlerinde M1 modeline göre artma olduğu görülmektedir.
- Gerçekleştirilen doğrusal yapısal çözümlerlerden perde duvar taban devrilme momentlerinin bina devrilme momentlerine oranının, M2 modeli hariç, M1 modelinde diğer bina modellerine göre hem x-x doğrultusunda hem de y-y doğrultusunda arttığı görülmektedir. Buna karşın M2 modelinde döşeme süreksizliğinden dolayı bazı perde duvarların yük aktarımındaki problemlerden kaynaklı perde duvar taban devrilme momentlerinin bina devrilme momentlerine oranında, hem x-x doğrultusunda hem de y-y doğrultusunda M1 modeline kıyasla azalma olduğu görülmüştür.

- Yapısal çözümlemelerden elde edilen bulgular, perde duvarların etrafında döşeme boşluğu olması yatay yük aktarımında büyük problemler oluşturduğunu ve bu durumun söz konusu binanın yapısal davranışı önemli ölçüde değiştirebileceğini göstermektedir. Elde edilen bu sonuç perde duvar etrafında döşeme boşluğu yapılmasından kesinlikle kaçınılması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.
- Doğrusal olmayan çok modlu itme analizi sonucu M2 modeli dışındaki diğer bina modellerinde kiriş hasarı görülmediği ve perde duvarların yük almamasına bağlı olarak M2 modelinin 1. katındaki kolonların yaklaşık %70'i belirgin hasar bölgesine geçtiği görülmüştür. Özetle döşeme süreksizliğinin bulunmadığı M1 modelinde en iyi yapısal performansın ve en kötü yapısal performansın M2 modelinden elde edildiği görülmektedir.
- Yapısal çözümlemelerden planda köşe noktalarında kolon-kiriş-döşeme olan modellerin köşe noktaları süreksiz olan modellere göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca köşe noktalarında kolon-kiriş-döşeme olan modellerin burulma düzensizliği katsayılarının köşe noktaları süreksiz olan modellere göre düşük olduğu görülmektedir.
- Doğrusal olmayan yapısal çözümlemelerden planda köşe noktaları süreksiz olan modellerin hasar mertebelerinin arttığı görülmüştür.
- Yazarlar çekirdek perde duvarlı-çerçeve elemanlardan oluşan binalar için döşeme boşluğu yapılması gerekliliği durumda, yapısal davranışın olumsuz etkilenmemesi için döşeme boşluğunun perde duvarların çevresinde ve kat planı köşe noktalarında yapılmamasını önermektedirler.
- Sonuçlar değerlendirildiğinde perde duvar etrafında döşeme boşluğu olması durumu kolonlara göre daha bariz olumsuzluklara yol açmıştır. Bu nedenle TBDY'nde A2 türü düzensizlik kapsamında bulunan "Deprem yüklerinin düşey taşıyıcı sistem elemanlarına güvenle aktarılabilmesini güçleştiren yerel döşeme boşluklarının bulunması durumu" kolon ve perdeler için ayrı ayrı değerlendirilmeli ve perde duvarlar için daha kısıtlayıcı kurallar açık bir şekilde ifade edilmelidir.

Kat sayısının artırılması ve buna bağlı olarak artan iç kuvvet değerlerini karşılamak adına artırılması gereken beton basınç dayanımı değeri, döşeme kalınlığı ve hatta kat içinde döşeme kalınlığının farklılık göstermesi gibi durumlar bunun yanı sıra farklı zemin ve deprem tasarım sınıflarında sonuçların tartışılması gerektiği açıktır. Bu çalışmada uygulamada sıklıkla karşılaşılan durumun ortaya konması hedeflendiğinden bu durumlar çalışma kapsamına alınmasa da gelecek çalışmalarda yukardaki durumların göz önüne alındığı araştırmaların yapılması tavsiye edilmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- ABYYHY, (1998). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik. *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.
- Akbaş, A. & Çalışkan, Ö. (2023). Deprem etkisinde hasar alan betonarme yapıların düzensizlik türleri yönü ile incelenmesi. *In International Conference on Scientific and Academic Research*, 1, 428-435.
- Aktan, S. & Kırac, N. (2010). Betonarme binalarda perdelerin davranışa etkileri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 15-32.
- Boru, E. (2022). Betonarme perdelerin planda farklı yerleşiminin bina davranışına etkisinin incelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10(2), 259-272. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1062254>
- Doğangün, A. (2004). Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl earthquake in Turkey. *Engineering Structures*, 26(6), 841-856.
- Durmuş, A., Doğangün, A., Hüsem, M. & Pul, S. (1999). 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin mühendislik açısından öndeğerlendirme raporu. *TMMOB İnşaat Mühendisler Odası Trabzon Şubesi*, 53s.
- Gürsoy, Ş. (2014). Comparative investigation of the costs and performances of torsional irregularity structures under seismic loading according to TEC. *Computers and Concrete*, 14(4), 405-417.
- Gürsoy, Ş. & Doğan, S.O. (2020). Betonarme binalardaki döşeme boşluğu konumu ve büyüklüğünün deprem davranışı ve kaba inşaat maliyetine etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(2), 1407-1422.
- Gürsoy, Ş. & Öz, R. (2016). Yumuşak kat düzensizliğinin betonarme binaların deprem davranışına ve kaba inşaat maliyetine etkisinin incelenmesi. *Uluslararası Doğal Afet ve Afet Yönetimi Sempozyumu (DAAYS'16)*, Karabük, Türkiye, 243-250.
- Gürsoy, Ş., Öz, R. & Baş, S. (2015). Investigation of the effect of weak-story on earthquake behaviour and rough construction costs of RC buildings. *Computers and Concrete*, 16(1), 141-161.
- Işık, E., Karasin, İ.B. & Öncü, M.E. (2022). The effect of slab discontinuities on structural performance caused by mezzanine. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 13(1), 111-126. <https://doi.org/10.24012/dumf.1080070>
- Kasap, H., Mert, N., Sevim, E. & Şeber, B. (2015). Perdeli-çerçeve taşıyıcı sistemli binalarda taşıyıcı sistem seçiminin yapı davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi. *APJES*, 3(1), 48-55.

- Korkmaz, K.A., Uçar, T. & Düzgün, M. (2011). Yapısal düzensizlikleri olan betonarme yapıların deprem davranışlarının değerlendirilmesi. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 22(2), 123-138. <https://doi.org/10.7240/mufbed.62985>
- Öztemel, M., Turan, M.T. & Çolakoğlu, H.E. (2022). Mevcut az katlı betonarme bir binada perde kullanımı ve yerleşiminin yapısal davranışa etkisinin incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 153-159. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1078414>
- Öztürk, T. (2013). Binalarda döşeme boşluklarının taşıyıcı sistem davranışına etkisi. *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, 24(116), 6233-6256.
- Sayın, E., Yön, B. & Calayır, Y. (2010). Perde konumunun ve zemin sınıfının betonarme yapılardaki hasar oranına etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 26(1), 1-6.
- Sezen, H., Whittaker, A.S., Elwood, K.J. & Mosalam, K.M. (2003). Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey. *Engineering Structures*, 25(1), 103-114.
- TBDY, (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara.
- TDY, (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.
- Terzi, M. & Elçi, H. (2006). Çerçeve tipi betonarme yapılarda döşeme süreksizliklerinin kesit tesirlerine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(3), 341-349.
- Terzi, M. & Elçi, H. (2009). Perde-çerçeve betonarme yapılarda A2 türü düzensizliğin kesit tesirlerine etkisi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 83-94.
- TMMOB, (1993). 13 Mart 1992 Erzincan depremi Mühendislik Raporu. *İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi*, Ankara.
- TMMOB, (1993). 13 Mart 1992 Erzincan depremi. *İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi*, İstanbul, 48s.
- Tozlu, İ. & Gürsoy, Ş. (2024a). B3 Düzensizliği konumunun yapısal performansa etkisinin incelenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 23(45), 81-96. (DOI: <https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1406397>).
- Tozlu, İ. & Gürsoy, Ş. (2024b). Farklı yüksekliğe sahip betonarme binalarda perde duvar yerleşiminin bina davranışına etkisinin doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 493-509. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1362519>

Yön, B., Ulucan, Z. Ç. & Öncü, M. E. (2010). Döűemelerdeki boűluk konumunun kayma gerilmesine etkisinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 45-51.



MATHEMATICAL MODELING OF QUARTZ LUMINESCENCE SIGNALS FOR EARTHQUAKE DETECTION

DEPREM TESPİTİ İÇİN KUVARS LÜMİNESANS SİNYALLERİNİN
MATEMATİKSEL MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Oğuzhan DERVİŞAĞAOĞLU¹

Berkay CAMGÖZ²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1519713>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
promedyum@hotmail.com

Received
(Geliş Tarihi)
21.07.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
05.03.2025

Accepted
(Kabul Tarihi)
06.03.2025

Abstract

This study can be accepted pure research. Most part of this research luminescence physics and the other minor parts of the research are applied mathematics and computer science, earthquake science, embedded systems. Main idea is to use smoky quartz solids to detect luminescence light which is crucial to apply on the vibration of earthquake. Furthermore, new algorithm (Pascal's Triangle Multiplication Algorithm) which has been thought as it could be useful on multiply smaller or medium data sets. Thermoluminescence properties of amethyst materials have been obtained. The Pascal triangle multiplication algorithm is considered to be efficient in signal processing within embedded systems. Based on this premise, it has been proposed that smoky quartz, which exhibits triboluminescent properties, could also be utilized in fields such as earthquake detection and dosimetric detectors. Due to the deterministic nature of this multiplication algorithm, it is anticipated that it can be employed in larger data sets through optimizations like data compression by guiding of Huffman coding. That will give the scientists much more time to evaluate data which comes from sensors that detect the triboluminescence from smoky quartz solids according to author who is in charge of writing this paper.

Keywords: Luminescence physics, embedded systems, earthquake, algorithms, huffman coding.

Öz

Bu çalışma, saf bir araştırma olarak kabul edilebilir. Araştırmanın büyük bir kısmı luminesans fiziği ile ilgilidir; diğer daha küçük kısımlar ise uygulamalı matematik, bilgisayar bilimi, deprem bilimi ve gömülü sistemlerle ilgilidir. Ana fikir, deprem titreşimlerine uygulanması kritik olan luminesans ışığını algılamak için dumanlı kuvars katıların kullanılmasıdır. Ayrıca, küçük veya orta ölçekli veri setlerini çarpmada yararlı olabileceği düşünülen yeni bir algoritma (Pascal Üçgeni Çarpım Algoritması) geliştirilmiştir. Ametist malzemelerinin termoluminesans özellikleri elde edilmiştir. Pascal üçgeni çarpım algoritmasının, gömülü sistemlerde sinyal işleme açısından verimli olduğu düşünülmektedir. Bu temele dayanarak, triboluminesans özellikler sergileyen dumanlı kuvarsın, deprem tespiti ve dozimetri dedektörleri gibi alanlarda da kullanılabileceği önerilmiştir. Bu çarpım algoritmasının deterministik doğası nedeniyle, Huffman kodlama gibi veri sıkıştırma optimizasyonlarıyla daha büyük veri setlerinde de kullanılabileceği öngörülmektedir. Bu durum, dumanlı kuvars katılarından gelen triboluminesans sinyallerini algılayan sensör verilerinin değerlendirilmesi için bilim insanlarına çok daha fazla zaman kazandıracaktır. Bu düşünce, makaleyi yazmaktan sorumlu yazarın öngörüsüdür.

Anahtar Kelimeler: Lüminesans fiziği, gömülü sistemler, deprem, algoritmalar, huffman kodlama.

¹ Ege University, Institute of Nuclear Sciences, Department of Nuclear Sciences, İzmir, Türkiye.
promedyum@hotmail.com.

² Ege University, Institute of Nuclear Sciences, Department of Nuclear Sciences, İzmir, Türkiye.
berkay.camgoz@ege.edu.tr.

1. INTRODUCTION

The main hypothesis of this research paper is to investigate photon intensity in quartz materials through luminescence in relation to quantum efficiency. Additionally, it aims to establish a correlation between quartz cementation in fault lines and the data derived after seismic vibrations. To facilitate the management of photon sensor datasets, a multiplication algorithm based on Pascal's Triangle is employed. Furthermore, Huffman coding is utilized for data compression, streamlining the signal processing in microcontroller systems. Similarly, Huffman coding has been considered for data compression by assigning fewer bits to larger signals generated by quartz. In essence, the hypothesis of this study seeks to determine whether the luminescence properties of quartz materials vary with photon intensity due to seismic vibrations and if these variations correlate with cementation along fault lines. This hypothesis is rooted in the principles of physics, encompassing photon emission, energy transfer mechanisms, and the physical interactions of quartz under mechanical stress.

Quartz is the solid mineral which contains SiO_2 chemical compound which can be found in many countries all around the world (Kurum,2022). Emission of light with respect to physical structure of solid is unique. To understand this mechanism, properties of luminescence and luminescence of bands (valance and conducting band) should have been considered. There are various ways to possess luminescence light such as triboluminescence, chemiluminescence, sonoluminescence, thermoluminescence, bioluminescence, electroluminescence, cathodoluminescence, optical-stimulated luminescence and radioluminescence (McKeever,1983). Researches upon luminescence are utterly extensive and on the other hand, existence of quartz has been confirmed in studies of meteor and moon (Wang et al,1998); (Kibar et al,2007). Some studies have been carried out on quartz and also diaspore. Scientists observed natural and synthetic opal quartz (Meakins et al,1987). Li has studied luminescence of quartz which correspond to sensibility of electrical signal (Li,2002). In another study, hydrothermal milk Quartz and metamorphic quartz have been collected. Emission of cathodoluminescence and thermoluminescence have been determined (Topaksu,2012). Diaspore crystals have been irradiated by U.V. with 254 nm and 366 nm wavelengths. Scientists have not detected fluorescence color because of Fe impurity (Hatipoğlu,2010). Other scientists have studied in diaspore crystals by using β source and then observed the efficiency of luminosity with CL and TL emissions. As a different type of quartz such as amethyst has been taken a crucial spot in a research (Topaksu et al,2018). CGCD method has been applied and samples have been induced by β sources such as Sr-90, Y-90 and γ source Co-60 (Nur,2010). Götze and his colleagues have done research on natural and synthetic quartz and 380-700 nm wavelengths have been confirmed as visible region of light emission which come from the quartz samples (Götze et al,2001).

In this study, an idea has been proposed to make a correlation among physics, applied mathematics- computer science, earthquake science and engineering. A few natural crystal solids such as diaspore, amethyst and smoky quartz are main samples to observe luminescence signals. Light intensity of all samples has been analyzed by using thermoluminescence dosimetry. Smoky quartz demonstrated sensitivity to physical stress, as observed by the corresponding author. This suggests that the triboluminescence effect will be a crucial parameter in producing visible light with very

high intensity. He has made an observation when smoky quartz has been applied mechanical pressure, Intensity of the luminosity of smoky quartz has been appeared in not dark room condition. This observation may make the scientists think to study for earthquake prediction connected with sensors and microcontroller- embedded systems. Furthermore, author thinks that his first study which is multiplication algorithm (Pascal's Triangle) can be helpful for data flow between sensors- microcontroller – WIFI/GSM triad. Light sensors sense the light emission of smoky quartz after become fracture or crack in which region of fault line. The data from the light sensor must be processed to generate signals within the framework of the microcontroller system. Consequently, speed performance in handling large datasets plays a crucial role in analyzing the triboluminescence of smoky quartz light emission across small, medium, and large datasets. Huffman coding which can provide data compression in optimization can help out Pascal's triangle multiplication algorithm can be faster and speed performance of it may ease to get signals which come from the quartz cementation after seismic vibration. This algorithm has been thought that it could be useful for software of embedded system which responsible for electronic signals.

2. MULTIPLICATION ALGORITHMS

In this section a few multiplication algorithms have been introduced briefly and these algorithms also evaluated by the speed performance according to different types of bits which are directly connected with data sets. Integer multiplications algorithms are quite diverse which can be used in different technologies and fields such as computer sciences, discrete mathematics, embedded systems, artificial intelligence, operating systems, signal processing and cryptography. Firstly new multiplication algorithm (Pascal's Triangle Multiplication) will be explained shortly and then, the Karatsuba and Schönhage–Strassen multiplication algorithms will come into play and demonstrate their efficiency.

2.1. Pascal's Triangle Multiplication Algorithm:

$$A = \text{small number, } A_x \text{ and } A_y, A = (A_x, A_y) \quad (1)$$

$$B = \text{big number, } B_x \text{ and } B_y, B = (B_x, B_y) \quad (2)$$

$$A_x = \left(A * \frac{A+1}{2} \right) - A \quad (3)$$

$$B_y = \left(B * \frac{B+1}{2} \right) \quad (4)$$

$$A_y = \left(A * \frac{A+1}{2} \right) \quad (5)$$

$$B_x = \left(B * \frac{B+1}{2} \right) - B \quad (6)$$

$$C_x = \left(C * \frac{C+1}{2} \right) - C \quad (7)$$

$$C_y = \left(C * \frac{C+1}{2} \right) \quad (8)$$

$$A * B = \left((A * \frac{A+1}{2}) - A \right) + \left(B * \frac{B+1}{2} \right) - \left(C * \frac{C+1}{2} \right) \text{ and } C = B - A \quad (9)$$

$$A * B = \left(A * \left(\frac{A+1}{2} \right) \right) + \left(\left(B * \left(\frac{B+1}{2} \right) \right) - B \right) - \left(\left(C * \left(\frac{C+1}{2} \right) \right) - C \right) \text{ and } C = A - B \quad (10)$$

This algorithm has been devised in 2003 by author of this paper (Dervişağaoğlu,2020). Complexity of the pascal's triangle algorithm in small data set is $O(1)$, medium data set refers to $O(n)$, in large data set converges to $O(n^2)$. Pascal's multiplication algorithm is more deterministic than the other multiplication algorithms. When it has been optimized by using the computer science method which is data compression, performance of speed in large numbers will be more effective.

2.2. Karatsuba Multiplication Algorithm:

$$X * Y = (X_1 * B^m + X_0) * (Y_1 * B^m + Y_0)$$

$$Z_2 = X_1 Y_1$$

$$Z_1 = X_1 Y_0 + X_0 Y_1$$

$$Z_0 = X_0 Y_0$$

$$Z_1 = (X_1 + X_0) * (Y_1 + Y_0) - Z_2 - Z_0 \quad [12].$$

2.3. Schönhage – Strassen Multiplication Algorithm (SSA):

Integer multiplication is a fundamental operation in arbitrary precision arithmetic related to discrete mathematics. Beyond its direct applications, the development of fast multiplication algorithms are capable of running in nearly linear time along with their ability to reduce other common operations, such as division, square roots, and logarithms, to integer multiplication, drives the need for more efficient techniques in large-scale computation (Berstein 2008). Asymptotically algorithms originated from (FFT) Fast Fourier Transform. Algorithms which are useful for multiplying large integers require huge amount of memory to store input operands and output product. Main purpose in SSA is to compute $P = a * b$. Without lose of generality, we can presume $a > 0$, $b > 0$ also, a and b are N -bit integers. By using the ring, it will be as followings:

$$R_n = \mathbb{Z}/(2^n + 1)\mathbb{Z} \text{ with } I = 2^k \mid n$$

$$2^{n/I} \equiv -1 \pmod{2^n + 1}; \quad 2^{n/I} \in R_n \text{ will be } 2I\text{-th root of unity.}$$

$$a = A(2^M), b = B(2^M), \quad C(x) = A(x) * B(x) \pmod{x^I + 1}$$

$$c = C(2^M) = a * b \pmod{2^{MI} + 1} \quad [14]$$

Table 1. Comparison of All Algorithms According to Data Set

Algorithm Type	Operation number in small data	Operation number in large data	Complexity	Discuss
Pascal’s Triangle	13	Linear or quadratic growth	$O(1), O(n), O(n^2)$	Constant in small data but in large data is slow. Even so, it can be optimized by data compression.
Classical	Increase as quadratic	High amount of operator	$O(n^2)$	Slower than the Pascal method.
Karatsuba	Higher operation	High efficiency	$O(n^{1,585})$	Efficient in large data
Schönhage-Strassen Algorithm	-----	-----	$O(n \log n \log \log n)$	It is applied in different field.

3. LUMINESCENCE MECHANISM

Luminescent materials radiate at various wavelengths. The characteristics of light are closely related to the spectral properties of the material. Depending on the duration of induced radiation, fluorescence or phosphorescence may occur. Time interval of transition between two energy levels for fluorescence is lower than 10^{-8} second. The main difference between them is that the transition from the ground state to the excited state occurs in a shorter time in fluorescence compared to phosphorescence. There is m point which is called trapped region between ground and excited states in phosphorescence. This trapped region refers to metastable. So, transition from trapped state to ground state takes a while. When extra energy is sent to the material, electron escapes from trapped state to reach ground state. When incident energy (radiation) is cut after that fluorescence effect will disappear but in phosphorescence after even the energy is cut, its effect will be continued in a certain time (McKeever,1983). Basic point is phosphorescence needs extra energy, because electron is trapped in point m.

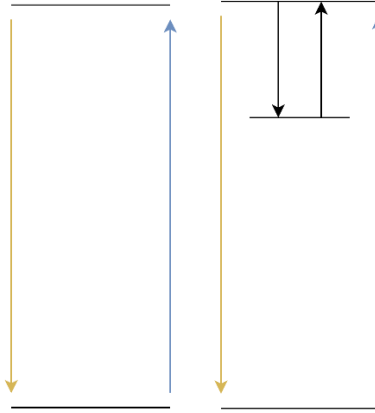


Figure 1a-1b. Fluorescence(1a) and Phosphorescence (1b)

Figure above shows that ground state, excited state and metastable region related trapped state. Time of trapped region for electron in “T” temperature is demonstrated as following:

$$\tau = \frac{1}{s} e^{E/kT} \quad (11)$$

S is constant, k Boltzmann constant, E is energy difference between excited state and trapped region. Luminescence physics is precisely complicated and contains many type of luminosity processes as it mentioned previous section. When thermoluminescence is explained, what we say is to possess light emission of heated material. Natural solid such as quartz firstly is irradiated by radiation source such as α, γ and β . Electrons in solid try to go excited state from ground state and they are trapped in metastable region. When the material is heated electrons are released and photons in visible region are emerged. In this way, balance of thermodynamics is conserved (McKeever, 1983).

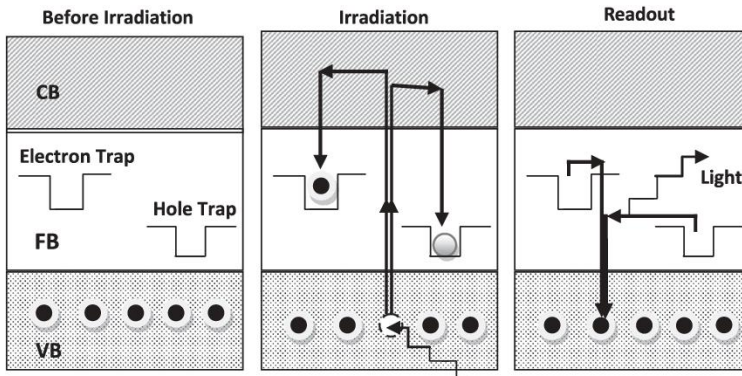


Figure 2. Thermoluminescence Mechanism (Rivera, 2012).

Ionized radiation which is incident radiation induced electrons in material and they are released. This process allows them to go from valance band to conducting band. That shows to come out electron-hole pairs is created. Holes are really close to valance band. Electrons can combine anti-charge carriers. They can be trapped by some impurities or defect such as Frenkel defect. Electrons can stay in trapped region with respect to activation energy (trap depth) and temperature. After the radiation is terminated, as long as natural solid is heated, electrons leave from trapped region and they reach conducting band. Electron goes in solid as free and then meet free charge carrier. Finally, photon is originated (Uzun,2010). According to Fermi-Dirac statistics, system in thermodynamics balance and 0 Kelvin, all energy level upper than Fermi energy level is empty. All energies are lower than Fermi level which is full. In luminescence model the most important parameters are activation energy and recombination center. Trap is higher than Fermi level and they are called as potential electron traps. Recombination center is lower than Fermi level which means center is filled by electrons. This center is called as potential hole trap. Absorption energy of radiation is higher than band gap, this results as production of free electrons in conducting band and holes in valance band. Thermoluminescence model is directly responsible of isolated electron trap and recombination center. The model which is mentioned here is to provide one trap- one recombination center (McKeever,1983). Defects in solids have an impact on to create structure for trapping of both holes and electrons during irradiation. These charge carriers will stick to defects region until heated to release process. Trap regions are defined as TL centers. Therefore, traps represent the isolated entity in crystal solids and also, they are not the part of crystal lattice. Even if incident radiation causes ionize on solids but also affect the defects in crystal (Uzun,2010). Crystal defects can decrease the domination of thermal vibration of phonons which means, phonon can be trapped by defects in material (Estreicher et al,2015; Sunta,2015). Kinetics parameters which manage the thermoluminescence process have been written as followings (Pagonis,2006):

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n * s * e^{-E/kT} \quad (12)$$

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{N} s * e^{-E/kT} \quad (13)$$

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n^b * s' * e^{-E/kT} \quad (14)$$

$$T = T_0 + \beta * t \quad (15)$$

T_0 = temperature of time t , 0 kelvin

s = constant of electron traps

N = total trap concentration m^{-3}

n = electron trap concentration in time t , m^{-3}

Triboluminescence is the different type of luminescence process and is activated as mechanical pressure and physical stress which is acted on the material. This stress can

be categorized such as breaking, rubbing, stretching and bending. Triboluminescence has been detected in quartz, alkaline halide, sugar and crystals. 50% of inorganic materials possesses triboluminescence effect (Wang and Wang, 2018) and quartz (In this study smoky quartz has been observed) has the efficiency of triboluminescence which proposed a high luminosity intensity with luminescence physics. Triboluminescence is also defined as Mechano-luminescence. Materials which demonstrate the properties of piezoelectric is effective in the triboluminescence. Spectrum of triboluminescence light is similar with the spectrum of photoluminescence and depends on crack, fraction or division of material. Notion of Triboluminescence has been proposed by Wiedemann in 1895. This word originally comes from the latin version “Tribein”. Thus, Tribo means “rub”. Plastic and elastic deformations are utterly crucial for the development of triboluminescence process. In this way new surfaces in crystal can be originated and distribution of fraction tries to stand for high temperature and pressure. Among movement of fraction in the material and crystal, charged fractions creates electrical potential. Impurities in crystal change symmetry and charge distribution. Furthermore, the gas which surrounds the material should be considered (Xie and Li, 2018).

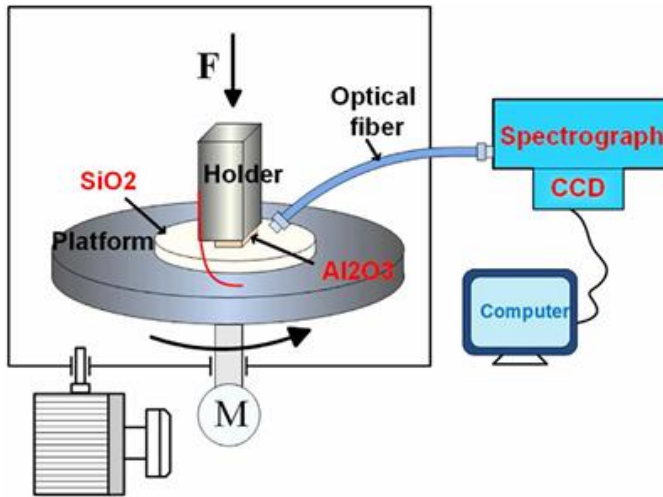


Figure 3. Experiment Model of Triboluminescence (Wang et al, 2016)

Quartz veins are extensive in fault zones unearthed from nucleation temperatures of earthquake such as 150°C-350°C. Furthermore, quartz can play a crucial role to be a mechanism of strength development among earthquakes. Exposition of quartz cementation supposes into a single inter seismic. Cracks and fractures caused by earthquakes create channels for the circulation of fluids. This prepares the environment for the deposition of quartz. Quartz cementation strengthens the rock by filling fractures along the fault. This is the healing process of the fault until the next earthquake. Hydrothermal liquids moving along fault zones dissolve silica from the rocks and precipitate as quartz when they cool. Quartz can impact the shear resistance in certain fault zones, which can influence when and how an earthquake begins (Williams and Fagereng, 2022). Triboluminescence of quartz solid in fault line can be a different method with respect to luminescence physics to collect light signals.

4. MATERIAL AND METHOD

In this study, diaspore has been provided by a mine company in Milas and smoky quartz has been taken from Dokuz Eylül University Geology Engineering Department. Diaspore samples have been broken in Ege University Nuclear Sciences Department. They have been put into test tubes and have been irradiated by industrial electron accelerator as first group of diaspore with 15kG second group diaspore with 25 kGy. Samples are approximately $0,3 \times 0,3 \text{ cm}^2$. Smoky quartz (1D,2D,No=5), has been also broken and its origin is Dalama/Aydın, smoky quartz(3D,No= 6) is from Nazilli/Aydın, smoky quartz (4D,No=4) and smoky quartz (5D,No=8) are brought by the region from Cine /Aydın, smoky quartz(6D,No=7) is from Kocarlı/Aydın. Amethyst samples are taken from the region, Dursunbey/Balıkesir.



Figure 4. First Group Diaspore



Figure 5. Second Group Diaspore



Figure 6. Smoky Quartz(1D,2D,No=5), Amethyst (1A,2A,3A,4A,5A,No=10), Smoky Quartz(3D,No= 6), Smoky Quartz (4D,No=4), Smoky Quartz (5D,No=8), Smoky Quartz(6D,No=7)

Luminosity intensity of Diaspore crystals has been detected in TL Reader Dosimeter 3500 in Luminescence Lab, Ege University, Nuclear Sciences Institute. Smoky quartz has been applied physical stress in non- dark room condition. Thermoluminescence properties of both Amethyst and smoky quartz have been also determined. They have been irradiated by Sr-90 beta source 30 minutes. After that, tl-temperature graphs have been emerged with TL dosimeter. Quartz solids have been heated until 400°C with heating rate 2 °C /s.



Figure 7. Thermoluminescence Dosimeter

The technical equipment will be sensor which is photomultiplier and Arduino basics embedded system which is utterly functional and useful by containing low-cost components such as small size computers and Arduino (Ovalles et al,2018) or that type of microcontrollers as embedded system has been used in the subject of water tank filling processes in a study (Prima et al,2017).

5. RESULTS

In consequence of high dose, electronic signal of diaspore has not been detected in thermoluminescence dosimeter. When the samples (diaspore) are heated in 250°C, they begin to break into tiny pieces. So, luminescence has not been observed. One diaspore has been put into dosimeter and then it has been heated, Result of diaspore has been demonstrated as following. In addition to, TL- Temperature result of quartz samples has been estimated.

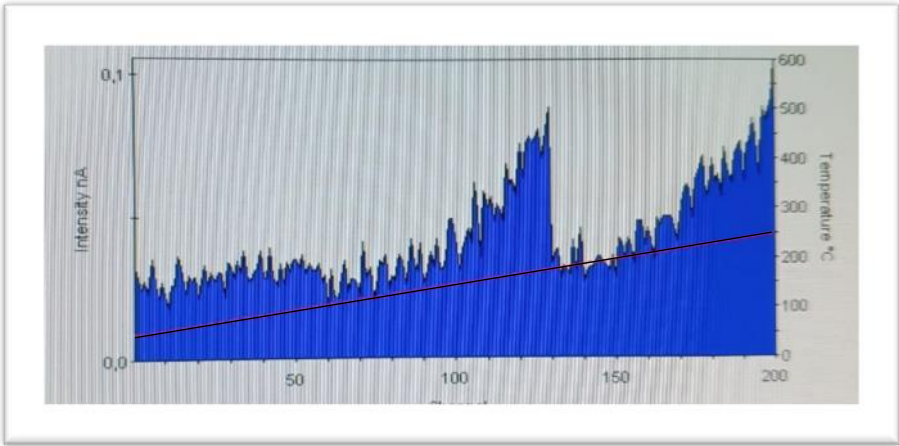


Figure 8. Luminosity-Temperature Graph. for Diaspore Solid

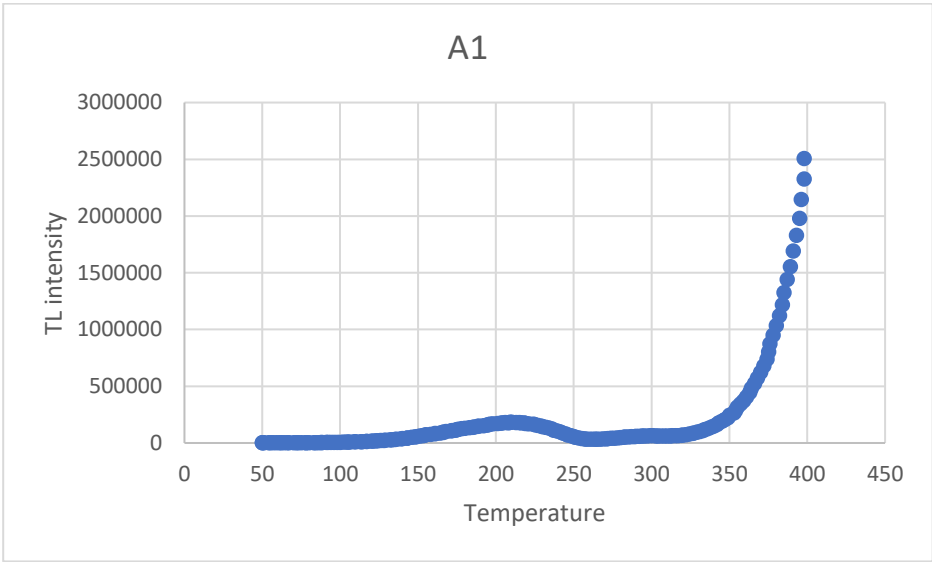


Figure 9. A-1 TL-Temperature Graph.

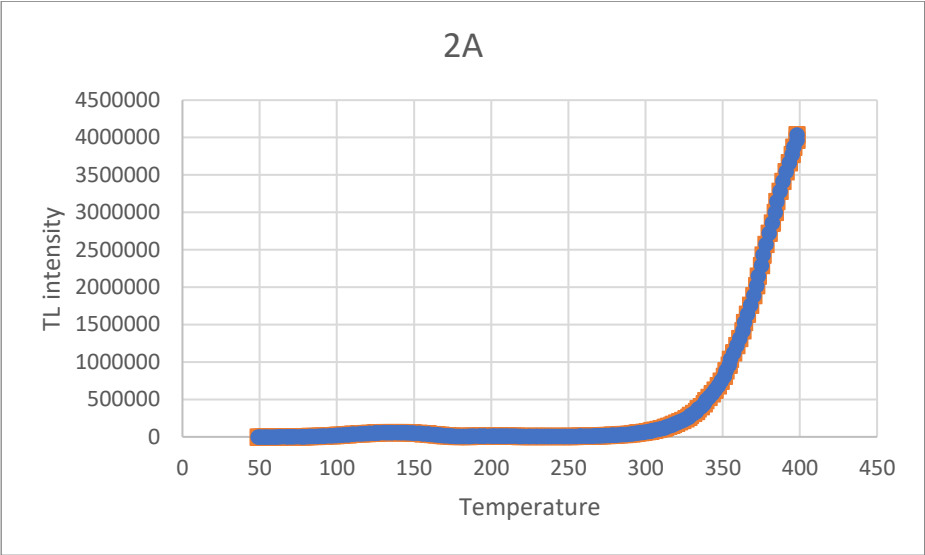


Figure 10. A-2 TL- Temperature Graph.

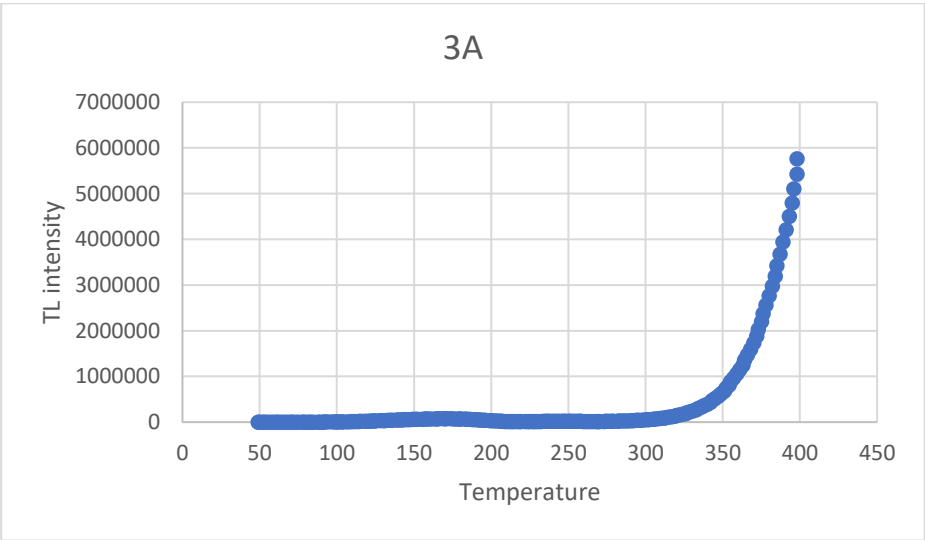


Figure 11. A-3 TL- Temperature Graph.

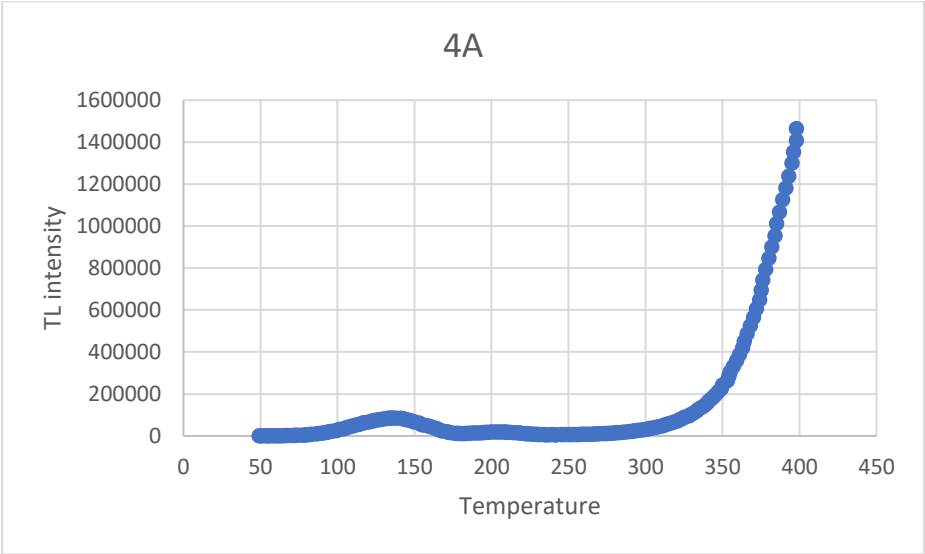


Figure 12. A-4 TL- Temperature Graph.

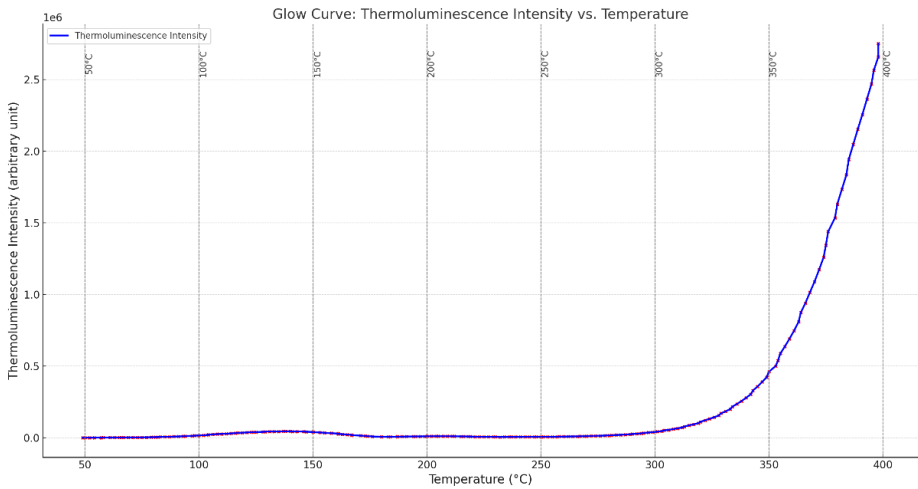


Figure 13. A-5 TL- Temperature Graph.

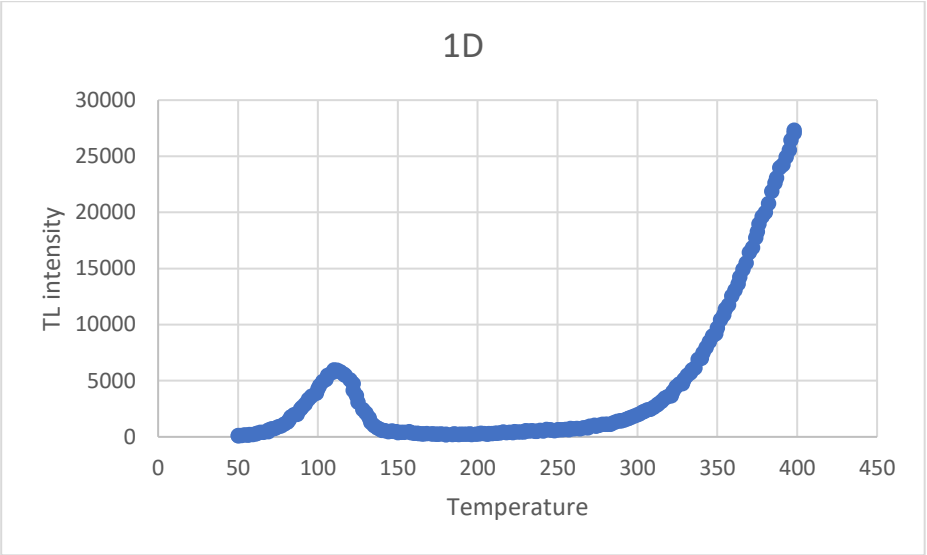


Figure 14. D-1 TL- Temperature Graph.

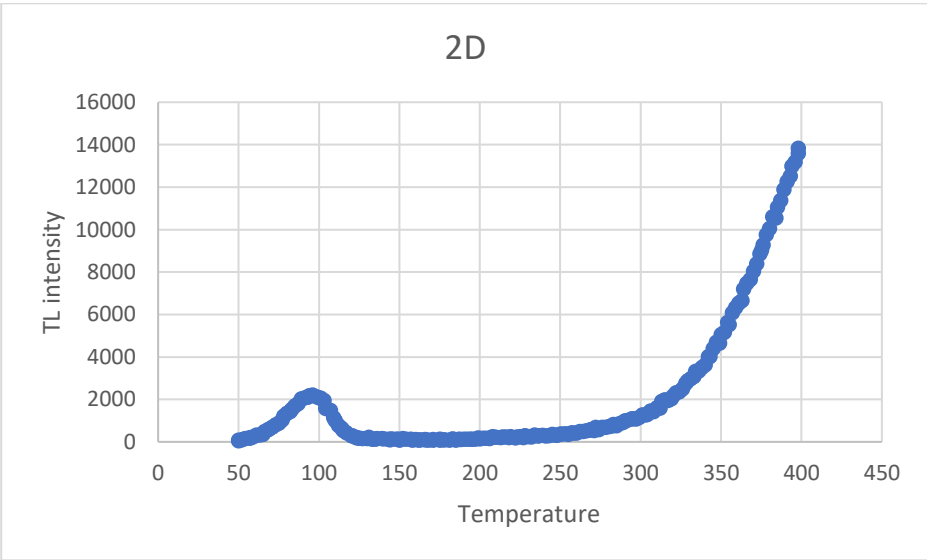


Figure 15. D-2 TL- Temperature Graph.

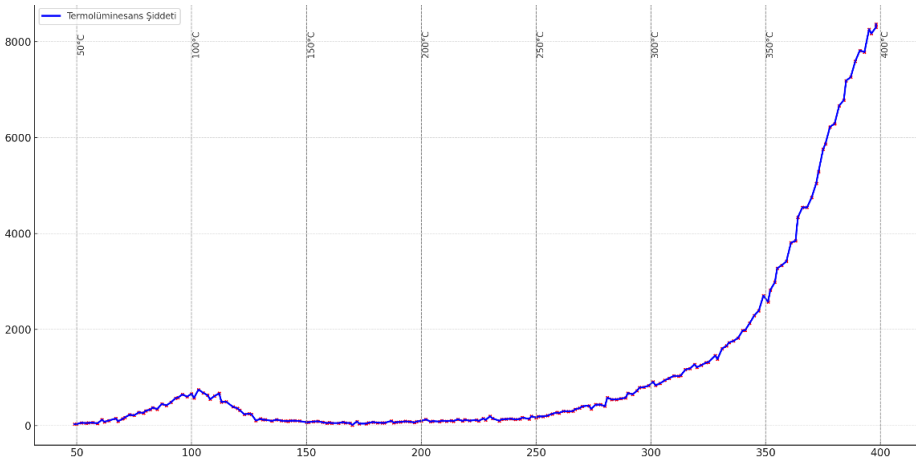


Figure 16. D-3 TL- Temperature Graph.

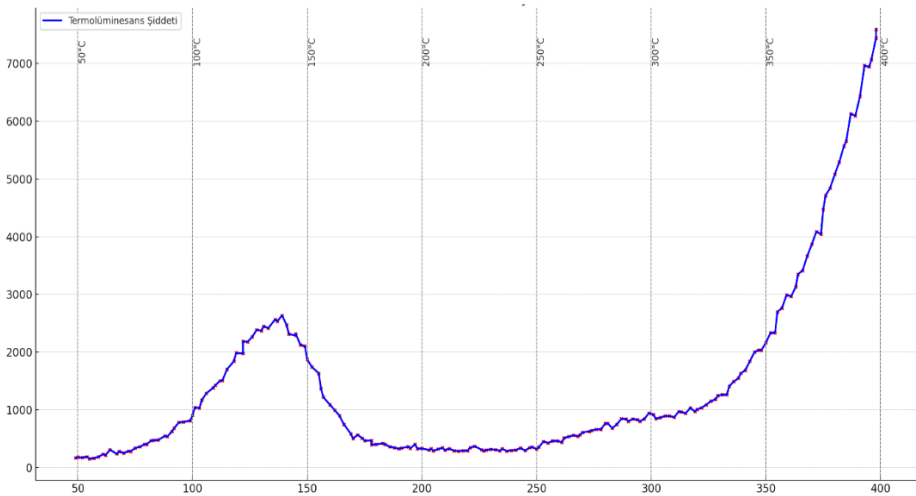


Figure 17. D-4 TL- Temperature Graph.

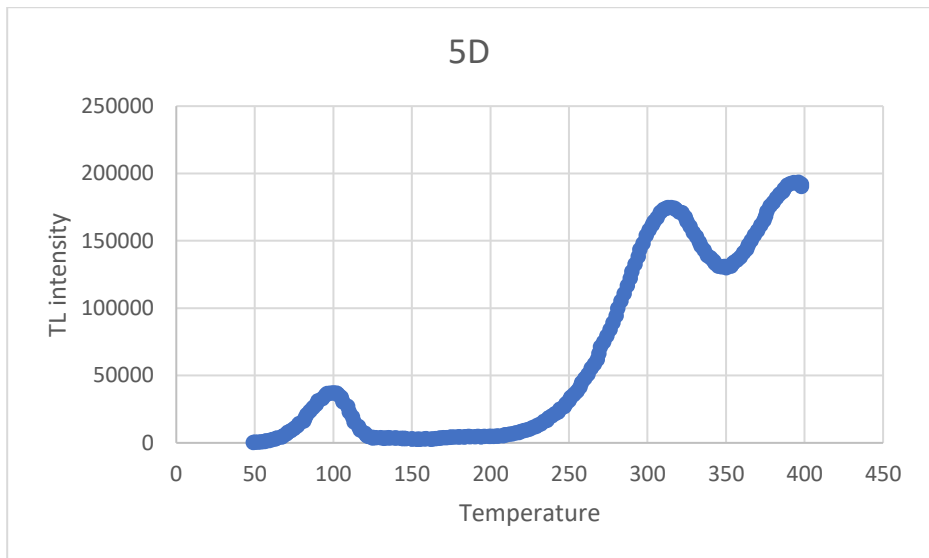


Figure 18. D-5 TL- Temperature Graph.

According to figures above, amethyst samples luminescence intensity are tend to reach higher than the smoky quartz samples. Which means, quantum efficiency of amethyst samples linked to charge carriers_ can release more photons with respect to higher temperature. A-2, A-3, A-5 do not make a progress as glow peak because of Sr-90(beta source) has low irradiation. Smoky quartz samples have lower charge carrier to produce photons than the amethyst samples even if glow peaks of smoky quartz samples have been detected. If each sample is irradiated at least 1 and 2 hours, glow peak level possibly emerges distinctly.

Intensity of diaspore sample seems not that high. Reasons can be impurities such as high temperature sensibility. After that one of diaspore minerals has been put into oven to anneal in 200°C. In this way early radiation in diaspore has been eradicated. This sample has been irradiated by X-ray source lower than first radiation doses. But electronic noise has been confirmed and sample shattered in dosimeter. Smoky quartz under mechanical press (triboluminescence) has released light in visible region in non- dark room. Intensity of light has been observed as higher luminescence property.

5.1. Connection Between Luminescence of Quartz and Pascal's Triangle Multiplication for Easing Signal Processing

Cementation of quartz can play a role of buffer zone by filling fractures along the fault. When an earthquake occurs, quartz that has been cemented may begin to break, exhibiting its triboluminescent properties. In addition to, properties of thermoluminescence should have taken into consideration in fault as temperature between 150°C-350°C which is enough for earthquake nucleation temperatures. So, this information can provide that samples above (Amethyst) are tend to go higher luminescence because of that amethyst samples should be considered in thermoluminescence instead of triboluminescence. Smoky quartz can be connected

with fiber cable and this cable can be integrated with sensor-microcontroller and WIFI. Data flow should be faster between receiver computer (scientist) and transmitter WIFI such as ESP8266 module. This module called as transceiver which can be connected with microcontroller such as Arduino. Sensors are induced by triboluminescence when fault line is activated to create an earthquake. Microcontroller scans the signals which comes from the sensors. If these signals exceed a certain threshold, data can be sent to the Wi-Fi module. Finally, this module transmits data to the receiver (the scientist's computer) about triboluminescence in relation to earthquakes, following TCP/IP protocols. Data flow can be programmed using a new algorithm called the Pascal Triangle multiplication algorithm, as it is practical and useful for small to medium-sized data sets.

Table 2. Comparison of Algorithms and Discussion

Usage Field	Algorithms	Discuss
Small- Partially Medium Data Sets	Pascal's Triangle	The most effective in small data sets but speed performance can be optimized by data compression and also it can be used for data encapsulation.
Medium Data Sets	Karatsuba	It shows powerful performance but in signal processing is not effective as much as Pascal's Triangle.
Large Data Sets	Schönhage-Strassen	More useful for scaling
Signal Processing	Pascal's Triangle	Low energy consumption

5.2. Data Compression with Huffman Coding

Huffman coding gives much advantage that symbols with high possibilities get shorter codes. In this method, codes are built by using bottom-up way, beginning with leaves of a tree and reaching to the root of this tree. Symbols are a string of leaf nodes and each node is simply frequency or probability of appearance for symbols. Huffman coding is a kind of data compression algorithm. Basically, symbol which cannot be used often assigns value /variable for long codes. Ones which can be used often assigns value /variable for short codes (Javed and Nadeem, 2000). Therefore, total code size is decreased and data is compressed. When write a text which is related with signal processing and data compression, it can be seen as followings:

"ABBCCCDDEEEEEE"

5.2.1. Frequency analysis: A = 1

B = 2

C = 3

D = 4

E = 5

Huffman Tree: Huffman Algorithm originates a tree. According to frequency of symbols, smaller two symbols are connected and sum of these two symbols create a new node and this process continues to reach one root.

5.2.2. List of Frequency Which Goes to One Root

$A(1), B(2), C(3), D(4), E(5)$ and the two smallest numbers of them are selected and connected as followings:

$A(1), B(2) = AB(3)$

$AB(3), C(3), D(4), E(5)$

$AB(3) + C(3) = ABC(6)$

$ABC(6), D(4), E(5)$

$D(4) + E(5) = DE(9)$

$ABC(6) + DE(9) = \text{ROOT} (15)$

Codes are assigned to symbols to create a tree. In this tree, symbols on the left are represented by 0, and symbols on the right by 1. For example, $A=000$, $B=001$, $C=01$, $D=10$, $E=11$.

Original text is “ABBCCDDDDDEEEEEE” and coding text is $A(000), B(001), B(001), C(01), C(01), C(01), D(10), D(10), D(10), D(10), E(11), E(11), E(11), E(11), E(11)$.

Coding text: 00000100101010110101011111111
Original text: 15* 8 bit=120 bit and compression text: 33
Compression rate: $120-33/120= \% 72,5$

In table 3, short codes assigned to higher frequencies. If implemented as in Table 4, signals with high frequency can be assigned shorter codes. This allows the microcontroller to use its memory more efficiently. For example, data compressed using Huffman codes for triangular numbers can be processed more quickly, resulting in significant energy savings in the system. Quartz light signals can be efficiently compressed and processed on the microcontroller with this approach. The Huffman algorithm excels at data compression, while the Pascal multiplication algorithm enhances processing speed. Together, they reduce the microcontroller's workload and provide a significant advantage in real-time applications.

Table 3. Triangle Numbers and Frequencies (Simulation /Scenario)

Triangle numbers	Frequency	Bit
1	5	3 bits (001)
3	9	3 bits (011)
6	12	3 bits (110)
10	15	4 bits (1010)
15	20	4 bits (1111)

$$Total\ bit = (5 * 3) + (9 * 3) + (12 * 3) + (15 * 4) + (20 * 4) = 218\ bits$$

Table 4. Huffman Approach (Simulation/Scenario)

Triangle numbers	Frequency	Huffman code	Code size
1	5	110	3 bits
3	9	111	3 bits
6	12	10	2 bits
10	15	01	2 bits
15	20	00	2 bits

$$Total\ bit = (5 * 3) + (9 * 3) + (12 * 2) + (15 * 2) + (20 * 2) = 136\ bits$$

$$Compression\ Rate = \frac{Original\ bit\ number - Huffman\ bit\ number}{Original\ bit\ number} * 100$$

$$= \frac{218 - 136}{218} * 100 = 37,6\%$$

Using Huffman coding, approximately 37,6% compression was achieved in optimization. This rate can significantly contribute to make the Pascal's triangle-based algorithm more efficient.

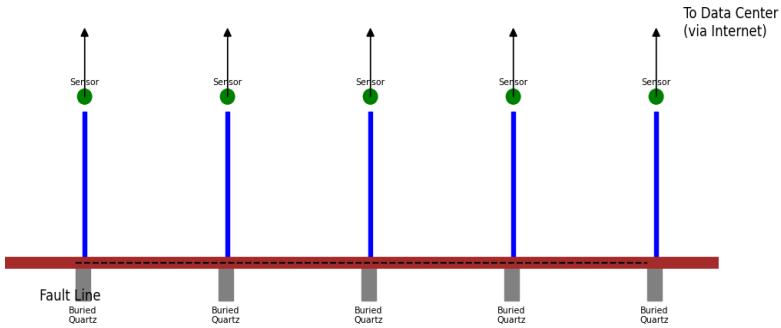


Figure 19. Smoky Quartz(Grey), Faultline (Black Line), Fiber cable (Blue), Sensor(Green)/Scenario

Figure 19 is responsible of basic demonstration about early earthquake detection. Smoky Quartz which is grey should settle in fault lines which is shown black lines. Blue lines are fiber cable system. When Quartz has been crushed by the movement or the seismic vibration which is possible earthquake, they release luminescence in visible region in gamma- ray spectrum. Light can be detected by sensor or photomultiplier. When light converts to electronic signals that can be processed in microcontroller which is connected WIFI such as ESP8266 module. In this way data can be sent receiver computer to evaluate earthquake as quickly as possible. Multiplication algorithm which is mentioned above will be useful and necessary to make easier medium or small data flow microcontroller and WIFI module. Because this algorithm can ease signal processing with fast multiplication in partially medium and

small size data sets. Light emission with highest intensity is ZnS and Xu et al., has collected data about different type of materials (Table 5). Quartz (SiO₂) is not on the list, SiC has been placed on the list but intensity of light has not seen with naked eye. When corresponding author fractured the smoky quartz sample (triboluminescence) then what he observed was that high intensity luminescence. It is possible that the high light intensity emitted partially ionizes the gases in the air, indicating the emergence of a low-energy plasma. Unfortunately, limited experimental conditions did not make this observation with visible robust data for readers. For the next paper about this subject, corresponding author will find necessary experimental sources which confirm that smoky quartz should be on list as following. To investigate this, triboluminescence measurements will be conducted on cooled quartz in different gas environments. This approach will help determine whether triboluminescence acts as a factor triggering plasma in various gas conditions.

Table 5. Triboluminescence Intensity for Different Materials. (Xu et al,1999).

Group	Sample	TL intensity (cps) ^a
Hexagonal	ZnS	60
	ZnS–Mn _{0.05}	2800
	ZnS–Cu _{0.01}	1100
	Zn ₂ SiO ₄ :Mn _{0.01}	57
	ZnO	3
	SiC	4
X ₂ O ₃ (X = Al or Y)	α-Al ₂ O ₃	10
	α-Al ₂ O ₃ :Mn _{0.01}	60
	Y ₂ O ₃	9
	Y ₂ O ₃ :Eu	20
	MgAl ₂ O ₄	31
	CaAl ₂ O ₄	14
	SrAl ₂ O ₄	36
Fluorite	ZrO ₂	8
	HfO ₂	3
	CeO ₂	3
Perovskite	YBa ₂ Cu ₄ O ₈	1
	PbZr _{0.52} Ti _{0.48} O ₃	3
	Pb _{0.93} La _{0.07} Zr _{0.60} Ti _{0.40} O ₃	3

Scientific Claim: Properties of triboluminescence of smoky quartz depend on the structure of geology which definitely affects amount of intensity of photon after mechanical impact related to seismic vibration. According to observation of corresponding author, cooled triboluminescent materials such as smoky quartz possess the piezoelectric effect can demonstrate high intensity of luminescence with respect to pressure which is acted on material. Cooling process is crucial to decrease quantum vibration which is phonon and in this way energy loss in material is conserved. After material is broken with conserved energy and charge corresponds to electric field distribution (piezoelectric) indirectly affected on triboluminescence, efficient

emission of photon can be seen in visible spectrum for human. If piezoelectric effect is lower, that changes intensity of luminescence negatively. Because change of piezoelectric with respect to pressure is tend to decrease, electron traps depth don't decrease but in consequence of positions of all atoms can a bit change, electron traps depth can change positively or negatively. Directly impact in triboluminescence seem phonon which makes possible of minimum energy loss.

Contribution of Authors

First author contributed as writing, conceptualizing, suggesting. Second author contributed as supervising and supporting.

Conflict of Interests

There is no conflict of interests between the both authors.

Statement of Research and Publication Ethics

Study complied with the Statement of Research and Publication Ethics.

Acknowledgements

We would like to express our gratitude to Elçin Ekdal Karalı from the Nuclear Sciences Institute at Ege University and Arzu Ege from the Physics Department at Manisa Celal Bayar University for sharing their valuable expertise. We also thank Osman Candan, a geology expert, for providing the quartz solids. Additionally, Emirhan Kiraz from Beyler Madencilik Mining Company greatly assisted us by sending the diasporite free of charge. Furthermore, we are thankful to Alara Çan and Lütfiye Macun, who are responsible for the luminescence laboratory.

REFERENCES

- Bernstein D.J.(2001) Multidigit multiplication for mathematicians. *Advances in Applied Mathematics*. Retrieved June 1, 2024 from <https://cr.yp.to/papers/m3.pdf>
- Dervişağaoğlu, O. (2020). Determination of Multiplication Algorithm with Basis on Pascal Triangle. *Cankaya University Journal of Science and Engineering*, 17(1), 71-79.
- Estreicher S.K., Gibbons T.M., Bebek M.B. (2015). Thermal phonons and defects in semiconductors: The physical reason why defects reduce heat flow, and how to control it, *Journal of Applied Physics* 117, 112801; doi: 10.1063/1.4913826.
- Gotze, et al. (2001) Origin, spectral characteristics and practical applications of the cathodoluminescence (CL) of quartz - a review, *Mineralogy and Petrology* 71: 225-250.
- Hatipoğlu (2010). Gem-Quality Diasporite Crystals as an Important Element of the Geoheritage of Turkey, *Geoheritage* (2010) 2:1–13.

- Javed M.Y. and Nadeem A. "Data compression through adaptive Huffman coding schemes," (2000). *TENCON Proceedings. Intelligent Systems and Technologies for the New Millennium (Cat. No.00CH37119)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2000, pp. 187-190 vol.2, doi: 10.1109/TENCON.2000.888730.
- Kibar R., Garcia-Guinea J., Çetin A., Selvi S., Karalı T., Can N. (2007). Luminescent, optical and color properties of natural rose Quartz Radiation Measurements 42, 1610 – 1617.
- Kurum S. (2022). *Magmatik Kayaçlar ve Ekonomik Önemleri, Madenler ve Değerli Taşlar Kitabı*.
- McKeever S.W.S (1983) *Thermoluminescence of Solids*, Cambridge University Press, 371.
- Meakins, Clark, Dickson (1978). Thermoluminescence studies of some natural and synthetic opals, *American Mineralogist*, Vol. 63, pages 737-743.
- Nur N. (2010). Ametistlerin Termolüminesans Yöntemiyle Dozimetrik Karakteristiğinin Analiz Edilmesi [*Yüksek Lisans Tezi*]. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Ovalles F.O. et al. (2018). Use of an embedded system with wifi technology for domotic control of conventional environments, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1126 012070.
- Pagonis V., Kitis G., Furetta C. (2006). *Numerical and Practical Exercises in Thermoluminescence*, Springer.
- Prima E C, Munifaha S S, Salam R, Aziz M H and Suryanic A T. (2017). Automatic Water Tank Filling System Controlled Using Arduino TM Based Sensor for Home Application *Procedia Engineering* 170 373 377.
- Rivera T. (2012). Thermoluminescence in medical dosimetry. *Applied radiation and isotopes: including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine*, 71 Suppl, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.04.018>
- Sheng-Hua Li, (2002). Luminescence sensitivity changes of quartz by bleaching, annealing and UV exposure, *Radiation Effects and Defects in Solids*, 157, 357–364.
- Schönhage A. Strassen V. (1971) Schnelle Multiplikation großer Zahlen, *Computing* 7.
- Sunta C., M., (2015). *Unraveling Thermoluminescence*, ISSN 0933-033X ISBN 978-81-322-1939-2 DOI 10.1007/978-81-322-1940-8 ISSN 2196-2812 (electronic) ISBN 978-81-322-1940-8 (eBook) Springer New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London.

- Topaksu et al (2012) Comparison of thermoluminescence (TL) and cathodoluminescence (ESEM-CL) properties between hydrothermal and metamorphic quartzes, *Applied Radiation and Isotopes*, 946-951.
- Topaksu et al. (2018) UV effect on the cathodo- and thermoluminescence properties of a gemquality Cr-rich diaspore (α -AlOOH) , *Applied Radiation and Isotopes*, 101-106.
- Wang, A., Haskin, L.A., Cortez, E. (1998). Prototype Raman spectroscopic sensor for in situ mineral characterization on planetary surfaces. *Appl. Spectrosc.* 52, 477–487.
- Wang, K. et al. (2016). Triboluminescence dominated by crystallographic orientation. *Sci. Rep.* 6, 26324; doi: 10.1038/srep26324.
- Wang Z. Wang F. (2018). Triboluminescence: Materials, Properties, and Applications, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81444>.
- Williams, R. T., & Fagereng, Å. (2022). The role of quartz cementation in the seismic cycle: A critical review. *Reviews of Geophysics*, 60, e2021RG000768. <https://doi.org/10.1029/2021RG00076>.
- Uzun E. (2010). Etkileşimli Çoklu Tuzak Modelinin Sayısal Olarak Çözümlemesi ve Gerçek Malzemelere Uygulanması, *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi*, 14 (2). 106-115.
- Xie Y., Li Z. (2018) Triboluminescence: Recalling Interest and New Aspects, *Chem* 4, 943–971.
- Xu, C. N., Watanabe, T., Akiyama, M., & Zheng, X. G. (1999). Preparation and characteristics of highly triboluminescent ZnS film. *Materials Research Bulletin*, 34, 1491–1500.



LINUX PLATFORMUNDA MITRE ATT&CK MATRİSİ KULLANARAK SALDIRI PLANLAMA VE UYGULAMA*

ATTACK PLANNING AND IMPLEMENTATION USING MITRE ATT&CK
MATRIX ON LINUX PLATFORM

Suat TOKSÖZ¹

Metin TURAN²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1572294>

Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
suat.toksoz@istanbulticaret.edu.tr

Geliş Tarihi
(Received)
23.10.2024

Revizyon Tarihi
(Revised)
26.12.2024

Kabul Tarihi
(Accepted)
26.12.2024

Öz

Bu makale, Linux platformunda MITRE ATT&CK matrisine dayalı saldırıların planlanması ve uygulanması süreci ele alınmaktadır. MITRE ATT&CK matrisi, siber tehditlere karşı savunma mekanizmalarının güçlendirilmesi amacıyla geliştirilmiş bir çerçeve olarak tanımlanmakta olup, saldırıların teknikleri, taktikleri ve prosedürleri sistematik bir şekilde sınıflandırılmaktadır. Çalışmada, Linux tabanlı sistemlerde bu matris kullanılarak çeşitli saldırı senaryoları oluşturulmakta ve bu senaryoların uygulanabilirliği test edilmektedir. Ayrıca, bu saldırıların tespiti ve önlenmesi için kullanılabilecek yöntemler ve araçlar tartışılmaktadır. Çalışmada, Balküğü üzerinden gelen saldırılara ait loglar toplanmakta, analiz edilmekte ve değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlar, siber güvenlik uzmanlarının Linux platformlarında karşılaşılabilecekleri tehditleri daha iyi anlamalarına ve bu tehditlere karşı etkili savunma stratejileri geliştirmelerine katkı sağlamak amacıyla sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mitre Att&ck, siber güvenlik, saldırı planlama, saldırı tespiti, savunma stratejileri.

Abstract

This paper discusses the process of planning and executing attacks based on the MITRE ATT&CK matrix on the Linux platform. The MITRE ATT&CK matrix is defined as a framework developed to strengthen defense mechanisms against cyber threats and systematically classifies attackers' techniques, tactics and procedures. In this study, various attack scenarios are created using this matrix on Linux-based systems and the applicability of these scenarios is tested. Furthermore, methods and tools that can be used to detect and prevent these attacks are discussed. The study collects, analyzes and evaluates the logs of the attacks received through Balküğü. The results are presented in order to help cybersecurity experts better understand the threats they may face on Linux platforms and develop effective defense strategies against these threats.

Keywords: Mitre Att&ck, cybersecurity, attack planning, attack detection, defense strategies.

* Bu yayın Suat Toksöz isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Siber Güvenlik Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹ İstanbul Ticaret Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Siber Güvenlik Yüksek Lisans Programı, İstanbul, Türkiye.
suat.toksoz@istanbulticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-3074-5455.

² İstanbul Ticaret Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
mturan@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-1941-6693

1. GİRİŞ

Günümüzde dijital dönüşüm ve internetin yaygın kullanımıyla birlikte, siber güvenlik kritik bir öneme sahip hale getirilmiştir. Bilgi teknolojileri altyapılarının korunması ve hassas verilerin güvenliği sağlanarak toplumların güvenliği temin edilmeye çalışılmaktadır. Özellikle Linux tabanlı sistemler, sunucular ve diğer cihazlar, yaygın bir tercih haline gelmiş olduğundan, siber saldırganlar tarafından hedef alınmaktadır.

Linux platformunda MITRE ATT&CK (Adversarial Tactics, Techniques, and Common Knowledge) matrisine yönelik saldırı planlama ve uygulama konusuyla ilgili temel sorun, Linux platformlarının karmaşıklığı ve çeşitliliği nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu platformda kullanılan farklı dağıtımlar, çekirdek versiyonları ve uygulama yelpazesi, saldırganların hedef sistemlerdeki zafiyet çeşidini ve sayısını arttırmaktadır (Liao vd. 2023). Ayrıca, linux'un açık kaynak doğası ve topluluk tarafından sürekli güncellenen yapısı, savunma ve saldırı stratejilerinin sürekli değişen bir ortamda tutulmasına neden olmaktadır.

Bu bağlamda, Linux platformunda MITRE matrisine yönelik saldırı planlama ve uygulama süreçlerindeki sorunlar, güvenlik uzmanlarının karşılaştıkları zorlukları anlamalarını ve etkili savunma tedbirlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Siber suçlular, yanlış yapılandırılmış veya kötü yönetilen sistemlerden yararlanılarak fidye yazılımı ve kripto para madenciliği saldırıları (cryptojacking) için Linux platformları giderek daha fazla hedef alınmaktadır. VMware'in siber güvenlik araştırmacıları, hibrit çalışma ortamlarında bulut hizmetlerinin benimsenmesiyle daha da kötüleşen Linux tabanlı sistemleri hedef alan sofistike kötü amaçlı yazılımlarda bir artış olduğuna vurgu yapılmaktadır. Linux sunuculara yönelik saldırılar, yaygın ağ tehlikesine, fidye taleplerine ve veri hırsızlığına yol açabileceğinden ve olay müdahale çabalarının zorlaştırılmasından dolayı bu eğilim önemli riskler oluşturmaktadır (Palmer, 2024).

Siber suçluların Linux platformlara yönelik artan tehdidi ve bu saldırıların işletmeler üzerindeki potansiyel etkileri günümüzde önemli bir problem olarak önümüze çıkmaktadır. Firmaların çoğunluğunun fidye yazılımı saldırılarına karşı savunmasız oldukları ve bu tür saldırılar sonrasında önemli miktarda fidye ödedikleri tahmin edilmektedir.

Bilgi güvenliğinden sorumlu yöneticilerin (Chief Information Security Officer) %90'ı, kurumlarının 2023 yılında en az bir yıkıcı saldırıya maruz kaldığını ve %83'ü, bir fidye yazılımı saldırısının ardından saldırganlara ödeme yapıldığını belirtmiştir. Yarıdan fazlası ise fidye olarak en az \$100.000 ödendiğini ifade etmiştir (Kovar ve Paine, 2024).

Siber saldırılara yönelik erken tespit ve erken önlem alınması, saldırıların etkisinin ve maliyetinin düşürülmesini sağlamaktadır. Tek bir kullanıcının tehdidi tanıyabilmesi durumunda, siber güvenlik olaylarının %80'inin önüne geçilebileceği ve ikinci olarak, tüm sistemlerin zamanında güncellenmesi ve uygun şekilde yapılandırılması da son derece önemli görülmektedir (Yousaf ve Zhou 2024).

T-Pot balküğü (honeypot), farklı etkileşim seviyelerine sahip geniş bir balküğü koleksiyonu sunarak, güvenlik uzmanlarının ağlara yönelik çeşitli saldırı türlerini izlemeleri ve saldırgan davranışlarını analiz etmeleri sağlanmaktadır. Düşük etkileşimli

balküpleri (MedPot, Honeyd, Dionaea gibi) temel saldırı bilgilerini toplarken, orta etkileşimli balküpleri (HoneyTrap, Snare, Glutton gibi) daha derinlemesine analiz yapılmasını sağlamakta ve yüksek etkileşimli balküpleri (Cowrie, Hellpot, Redishoneypot gibi) gerçekçi saldırı ortamları sunarak ayrıntılı veriler sağlanmaktadır. Bu çeşitlilik, T-Pot'in ağ güvenliğini güçlendirmek ve siber tehditleri etkin bir şekilde tespit etmek için güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır (Rawat 2024).

T-Pot balküpu teknolojisi ve Wazuh gibi güvenlik çözümleri, Linux platformunda MITRE ATT&CK matrisinde bulunan teknik, taktik ve prosedürlerine (Tactics, Techniques and Procedures/TTP) yönelik saldırıların simüle edilmesiyle etkili bir çözüm sağlanmaktadır. T-Pot, gerçek saldırılar taklit edilerek savunma mekanizmalarının test edilmesine olanak tanınmakta ve saldırganların dikkatleri çekilerek izlenmeleri ve tespit edilmeleri mümkün kılınmaktadır. Balküpleri, erken tehdit tespiti yapılmasını sağlamakta, saldırganların taktiklerinin anlaşılmasına olanak tanımakta, dikkatlerinin kritik sistemlerden uzaklaştırılması sağlanmakta ve ağ adli bilişimi için faydalı veriler sağlanmaktadır (Koutsikos 2024). Wazuh, log yönetimi, tehdit algılama ve log analiz özellikleriyle Linux platformlarında saldırılar için önleyici ve tespit edici bir rol üstlenmektedir. Bu çözümler, Linux platformunda MITRE ATT&CK matrisi çerçevesinde saldırıların nasıl etkin bir şekilde planlanıp uygulanabileceğini göstermek, saldırı planlama ve uygulama süreçlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamakta ve güvenlik ekiplerine gerçek dünya senaryolarında pratik deneyim kazandırmakta katkı sağlamaktadır. Ayrıca, savunma stratejilerinin geliştirilmesine de katkı sağlanmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Linux platformunda MITRE ATT&CK matrisine yönelik saldırıların planlanması ve uygulanması süreci detaylı bir şekilde incelenmektedir. Araştırmada, öncelikle siber güvenliğin önemi ve günümüzdeki tehdit manzarası üzerine çalışmalar yapılmış ve MITRE ATT&CK matrisinin yapısı ve işlevi hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra, Linux tabanlı sistemlere yönelik kullanılabilecek çeşitli saldırılar belirlenmiş ve bu saldırıların log analizleri yapılarak MITRE ATT&CK matrisine adreslenmesi sağlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, siber güvenlik uzmanlarının Linux platformlarında karşılaşılabilecekleri tehditleri daha iyi anlamalarına ve bu tehditlere karşı etkili savunma stratejileri geliştirmelerine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Bu araştırmanın literatüre ana katkısı, siber saldırılara karşı bir savunma aracı olarak kabul gören T-Pot balküpu kullanımının, diğer araçlarla entegre edildiğinde verimli bir şekilde nasıl kullanılacağına ilişkin bir çerçeve sunması ve bunun deneysel olarak uygulanmış sonuçlarını paylaşarak potansiyelini ortaya koymasıdır. Bu araştırma ile, MITRE ATT&CK matrisine uygun şekilde sınıflandırılma ve Wazuh ile entegrasyonu sayesinde güvenlik olaylarının etkin bir şekilde yönetilmesi süreçlerine ilişkin önemli bulgular elde edilmiştir. T-Pot'tan elde edilen veriler, MITRE ATT&CK matrisine entegre edilerek, saldırıların teknik aşamaları ve saldırganların kullandığı yöntemler doğru bir şekilde sınıflandırılmıştır. Bu sayede, saldırıların gelişim aşamaları daha net bir şekilde tanımlanmış ve siber güvenlik uzmanlarına savunma stratejilerini güçlendirme fırsatı sağlanmıştır. Wazuh'un, bu sürece dahil edilmesiyle birlikte, gerçek zamanlı güvenlik olaylarının izlenmesi ve analiz edilmesi sağlanmış, potansiyel tehditler hızlı bir şekilde tespit edilmiştir. Wazuh'un sağladığı tehdit istihbaratı ve alarm mekanizmaları, saldırılara karşı hızlı yanıt verilmesini mümkün kılmıştır. Bu

çerçeve ile, sadece saldırıların tespit edilmesi değil, aynı zamanda siber savunma stratejilerinin geliştirilmesi de mümkün olmuştur. Elde edilen sonuçlar, siber güvenlik alanında savunma stratejilerinin iyileştirilmesi ve saldırı tespit sistemlerinin geliştirilmesi için önemli bir referans oluşturmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

“An Adversarial Approach: Comparing Windows and Linux Security Hardness Using Mitre ATT&CK Framework for Offensive Security” isimli makale, MITRE ATT&CK çerçevesi kullanılarak gerçek dünya saldırıları simüle edilmektedir. Bu testler, gelişmiş kalıcı tehditlere (APT'ler) ve diğer saldırı vektörlerine karşı güvenlik değerlendirmesi yapılmak amacıyla Windows (7, 8, 10 ve Windows Server 2012) ve Linux (16.04, 18.04 ve 20.04) sürümlerinde gerçekleştirilmektedir (Sikandar vd. 2022).

Hobert ve arkadaşları, makalelerinde, Linux sistemlere yönelik saldırıların MITRE ATT&CK matrisi çerçevesinde etkin bir şekilde planlanmasının birkaç önemli strateji ile gerçekleştirildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, otomatik benzerlik hesaplaması ile 793 ön işlenmiş komut seti analiz edilerek sekiz farklı saldırgan grubunun belirlendiği ifade edilmiştir. Son olarak, saldırılar MITRE ATT&CK çerçevesine göre kategorize edilerek, her bir saldırının aşamaları ve kullanılan tekniklerin belirlendiği aktarılmıştır. Bu yöntemler, saldırganların davranışlarının anlaşılması ve daha etkili savunma mekanizmalarının geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Hobert, Lim, ve Budiarto 2023).

Shrivastava ve arkadaşları, makalelerinde, Linux sistemlere yönelik saldırıların etkin bir şekilde planlanabilmesi için MITRE ATT&CK matrisi çerçevesinde çeşitli adımlar ve stratejilerin uygulandığını belirtmişlerdir. Özellikle Cowrie balküğü kullanılarak saldırıların tespiti ve analizi yapılmakta, bu sayede saldırganların davranışları hakkında derinlemesine bilgiler elde edilmektedir. Saldırıları altı farklı kategoriye ayrılmaktadır: kötü niyetli yük, SSH saldırısı, XOR DDoS, casusluk, şüpheli ve temiz. Cowrie balküğü, saldırganların etkileşimlerini kaydederek veri toplamakta ve bu veriler, güvenlik duvarı ve saldırı tespit sistemleri (IDS) gibi savunma mekanizmalarının güçlendirilmesine katkı sağlanmaktadır. (Shrivastava, Bashir ve Hota 2019).

Weapon, MITRE ATT&CK matrisinden yararlanılarak fidye yazılımlarının erken aşamalarında tespit edilmesi için tasarlanmış bir araçtır. Weapon, kritik fidye yazılımı özelliklerini çıkarmak için dinamik analiz kullanılmakta ve ayrıca, anlamsal özellikleri bu temel niteliklerle eşleştirmek için Android geliştirici belgelerinden türetilen bir anlamsal veri tabanı kullanılmaktadır. Bu bilgiler, MITRE saldırı verileriyle ilişkilendirilerek fidye yazılımları ilk aşamalarında verimli bir şekilde tanımlanmaktadır. Yaklaşım, gerçek dünya senaryolarında gözlemlenen düşman taktiklerini ve tekniklerini detaylandırarak MITRE ATT&CK matrisinden elde edilen saldırı verileri kullanılarak bir model oluşturulmaktadır. Yapılan testlerde, Weapon, sırasıyla 2.794 fidye yazılımı örneğinden 2.568'ini ve 5.875 fidye yazılımı örneğinden 5.286'sını operasyonel aşamaya ulaşmadan önce başarıyla tespit etmiştir. Bu araç, fidye yazılımı tespitinde %99,21 gibi etkileyici bir doğruluk oranına ulaşmaktadır. Genel olarak, Weapon, gelişmiş özellik çıkarma teknikleri kullanılarak ve MITRE

ATT&CK matrisindeki kapsamlı saldırı verilerinden yararlanarak erken aşama fidye yazılımı tespiti için etkili bir yöntemi temsil etmektedir (Singh ve Tripathy 2024).

Araştırmacılar, balküğü modeli kullanılarak, saldırganların sistemle daha derinlemesine etkileşimde bulunması sağlanmış ve siber güvenlik araştırmaları ile tehdit tespiti açısından daha zengin veriler elde edilmiştir. Yüksek etkileşimli bir balküğü kullanılarak, saldırganların gerçek sistemlerde gerçekleştirdiği hareketler ve komutlar daha ayrıntılı bir şekilde izlenebilmiştir. MITRE ATT&CK matrisi kullanılarak, balküğüleri tasarlanmış ve denetlenmiştir. Bu taksonomi, siber saldırılar belirli teknikler ve taktikler çerçevesinde sınıflandırılarak, tehdit analizinin daha sistematik hale getirilmesine yardımcı olmuştur. Araştırmacılar, balküğü uygulanması sırasında, on yedi günlük süre boyunca çeşitli saldırgan profilleri ve saldırı yöntemlerini gözlemlemişlerdir. Toplanan veriler, daha önce belgelenmemiş Tehdit Göstergeleri içermekte olup, bu da siber güvenlik topluluğuna yeni bilgiler sağlanmasını olanaklı kılmıştır. Yeni bir balküğü modelinin ve tasarımının etkinliği gösterilmiş, saldırganların davranışlarını daha iyi anlamak ve yeni tehdit göstergeleri keşfetmek için yüksek etkileşimli balküğülerinin potansiyeli ortaya konmuştur. Bu çalışma, siber güvenlik uzmanlarına saldırıları tespit etme ve önleme konusunda daha etkili stratejiler geliştirmeleri için değerli bilgiler sunmaktadır (Abbas-Escribano ve Debar 2023).

Saldırganlar balküğü ile etkileşime girdikçe, balküğü yazılımı tarafından komutlar ve aktiviteler dikkatlice kaydedilmekte, bu da saldırganların davranışları ve taktikleri hakkında değerli bilgiler sağlanmaktadır. Bir sonraki adımda, bu kaydedilen komutlar toplanarak analiz edilmekte ve saldırganlar tarafından kullanılan desenler, eğilimler ve yaygın teknikler belirlenmektedir. Bu veriler, Linux komutlarının MITRE ATT&CK taktik ve teknikleri ile eşleştirilmesi için temel oluşturmaktadır. Eşleştirilen sonuçların doğruluğu ve etkinliği, bazı metrikler kullanılarak değerlendirilmekte ve modelin performansı bu şekilde ölçülmektedir. Bu değerlendirme, sürecin Linux komutlarını MITRE ATT&CK taktik ve teknikleri ile ne kadar iyi ilişkilendirdiğini belirlemeye yardımcı olmaktadır. Elde edilen içgörüler, siber güvenlik uzmanlarına saldırganların Linux platformları ile etkileşime geçerken kullandıkları taktik ve teknikler hakkında daha derin bir anlayış sağlamaktadır. Balküğü kullanılarak saldırgan davranışları yakalanmakta ve analiz edilmekte, NLP teknikleri uygulanarak Linux komutları MITRE ATT&CK ile eşleştirilmektedir. Bu sayede, siber güvenlik uzmanları tehdit tespiti, olay müdahalesi ve genel siber güvenlik savunmalarını önemli ölçüde iyileştirebilmektedirler (Andrew, Lim, ve Budiarto 2022).

Yang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ağ tehditlerinin yönetilmesi için son derece etkileşimli bir balküğü tabanlı yaklaşımın nasıl kullanılabileceği incelenmektedir. Balküğü, saldırganları çekmek amacıyla tasarlanmış simüle edilmiş sistemler olup, güvenlik ekiplerinin saldırıların faaliyetlerini izlemesine ve analiz etmesine olanak tanınmaktadır. Bu yeni yaklaşım, geleneksel bal peteği işlevselliği geliştirilerek sistemlerin daha tepkisel ve etkileşimli hale getirilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede, potansiyel tehditler hakkında daha detaylı bilgi toplanabilmektedir. Yazarlar, bu yaklaşımın ağ güvenliğini iyileştirme konusundaki faydalarını tartışmakta ve siber tehditlerin tanımlanması ve azaltılmasında etkin bir rol oynandığı vurgulanmaktadır (Yang vd. 2023).

Bu kapsamda, siber saldırılara karşı etkili bir savunma stratejisi geliştirmek için doğru araçlara ve yöntemlere sahip olunması hayati önem taşımaktadır. Bu noktada, MITRE ATT&CK matrisi, siber tehditlerin daha iyi anlaşılması ve savunma mekanizmalarının güçlendirilmesi için önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. MITRE ATT&CK matrisi, saldırganların kullandığı TTP'ler kapsamlı bir şekilde belgelenerek, savunma mekanizmalarını güçlendirmek isteyen kuruluşlara rehberlik edilmektedir.

Xiong ve arkadaşları, kurumsal sistemler için Meta Saldırı Dili (MAL) çerçevesine dayanan ve MITRE Enterprise ATT&CK Matrisi ile entegre olan enterpriseLang adlı bir tehdit modelleme dili kapsamında bir çalışma yapmışlardır. Bu dil, kurumsal sistemlerin siber saldırılara karşı dayanıklılığını değerlendirmek için sistem varlıklarının, saldırı adımlarının, savunmaların ve varlık ilişkilerinin tanımlanmasına olanak tanımaktadır. Paydaşlar, enterpriseLang kullanarak bilinen saldırı teknikleriyle ilgili zayıflıkları analiz edebilir, sistem modelleri üzerinde siber saldırılar simüle edebilir ve güvenliği artırmak için hafifletme önerileri alabilmektedir. Bu dil, kurumsal sistemlerde tehdit modellemesi için yapılandırılmış bir yaklaşım sunarak paydaşların güvenlik sorunlarını proaktif bir şekilde ele almalarını ve sistemlerinin güvenlik duruşunu güçlendirmek için bilinçli kararlar vermelerini sağlamaktadır. Makale, genel olarak kapsamlı tehdit analizi ve azaltma stratejileri için MITRE ATT&CK matrisi tarafından sağlanan bilgi tabanından yararlanarak siber tehditlerin etkili bir şekilde modellenmesi ve simüle edilmesi için enterpriseLang gibi alana özgü bir dil kullanmanın önemini vurgulamaktadır (Xiong vd. 2022).

Wazuh, IIoT (Industrial Internet of Things) ortamlarının güvenliğini sağlamak için sağlam bir mimari sunulmaktadır. Bu mimarinin merkezinde, izlenen cihazlara yerleştirilen, güvenlik verilerini toplayan ve bunları merkezi bir Wazuh sunucusuna ileten araçlar bulunmaktadır. Bu sunucu, verileri önceden tanımlanmış kurallara göre analiz etmekte, şüpheli faaliyetler için uyarıları tetiklemekte ve uzak araçlar ağı yönetilmektedir. Güvenlik duvarları ve yönlendiriciler gibi aracısız cihazlar, syslog, SSH veya uygulama programlama arayüzleri (API'ler) aracılığıyla veri göndererek katılabilmektedir. Bu esneklik, Wazuh'un çeşitli veri formatlarını işleme becerisiyle birleştğinde, onu kapsamlı IIoT güvenlik izleme ve analizi için değerli bir araç olarak konumlandırmaktadır (Afenu, Asiri, ve Saxena 2024).

Andrew ve arkadaşlarının çalışmalarında, Linux komutlarının MITRE ATT&CK teknikleri ve alt tekniklerine, ayrıca ATT&CK taktiklerine eşleştirilmesi için Doğal Dil İşleme (NLP) teknikleri kullanılmıştır. Kullanılan yöntemler arasında Bag of Words (BoW), Term Frekansı-Ters Doküman Frekansı (TF-IDF) ve önceden eğitilmiş Kelime Gömmeleri (Word Embeddings) bulunmaktadır. Benzerlik skoru hesaplamak için kosinüs benzerliği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, MITRE ATT&CK teknikleri ve alt teknikleri için en yüksek recall-10 skoru: Unigram ve Bigram ile TF-IDF ve Snowball Stemmer kullanılarak 0,45575 olarak elde edilmiştir. MITRE ATT&CK taktikleri için en yüksek recall-10 skoru: Unigram ve Bigram ile TF-IDF ve Snowball Stemmer kullanılarak 0,75397 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, önceden eğitilmiş Kelime Gömme modellerinin performansı, TF-IDF ve BoW modellerine kıyasla daha düşük bulunmuş ve bunun metinlerin bağlamlarının farklı olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Çalışma, gelecekte siber güvenlik bağlamına özgü bir kelime gömme modeli oluşturulması ve farklı vektörizasyon ve tokenizasyon tekniklerinin denenmesi planlanmaktadır (Andrew, Lim, ve Budiarto 2022).

“Performance Analysis of Network Intrusion Detection Using T-Pot Honeypots” isimli makalede, T-Pot’un gerçek sistemleri taklit ederek saldırganları cezbettığı, etkileşimlerin kaydedildiği ve bu verilerin analiz edildiği belirtilmiştir. Ağ saldırıları, brute force denemeleri ve DDoS saldırıları gibi tehditler tespit edilmiştir. Ayrıca, Elasticsearch, Kibana ve Debian Linux gibi araçların, saldırı desenlerini anlamak, erken tespit yapmak ve tehdit istihbaratı sağlamak amacıyla kullanıldığı vurgulanmıştır. Yapılan araştırmalar, T-Pot’un bu saldırıları başarılı bir şekilde tespit ettiği, ancak daha karmaşık saldırıları işleyebilme kapasitesinin geliştirilmesi gerektiği ve veri işleme gücüne dayalı sınırlamaların bulunduğu ortaya konmuştur (Mohd Fuzi vd. 2024).

“Honeypot in a box: A distributed cluster network for honeypot deployment” isimli makalede, Kubernetes (K3s dağıtımı) ve WireGuard VPN kullanılarak dağıtık bir balküpe sistemi geliştirilmesi ve uygulanmasına odaklanılmaktadır. Artan internet bağlantısı ve sofistike siber saldırılarla birlikte siber güvenliğin öneminin giderek arttığı vurgulanmıştır. Geleneksel balküplerinin sınırlı olmasına rağmen, farklı coğrafi konumlarda saldırı desenlerini tespit etme yeteneklerinin yetersiz olduğu belirtilmiş ve bu sınırlamanın aşılması amacıyla farklı bölgelerde balküplerinin dağıtılarak daha kapsamlı bir saldırı analizi yapılabileceği savunulmuştur. Kubernetes’in ölçeklenebilirliği ve bulut sağlayıcılarıyla entegrasyon kolaylığı nedeniyle Docker Compose ve Docker Swarm yerine tercih edilmiştir; K3s’in ise düşük kaynak gereksinimleri ve kolay dağıtım özelliği nedeniyle seçildiği ifade edilmiştir. Güvenli iletişim için WireGuard VPN kullanılmış ve ağ gecikmesi ile bant genişliği performansının üstün olduğu belirtilmiştir. Yapılan performans testleri, sistemin balküpleri’nin dağıtırken kabul edilebilir performans seviyelerinin korunduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, tezdeki hedeflerin başarıyla elde edildiği ve gelecekte daha fazla balküpe görüntüsünün eklenmesi, kümeler arasındaki güvenli bağlantıların sağlanması ve veri sınıflandırma gibi ek çalışmalara yer verileceği ifade edilmiştir (Candidate ve Ayala 2024).

“Enhancing Cybersecurity Resilience: Integrating IDS with Advanced Honeypot Environments for Proactive Threat Detection” isimli araştırma makalesinde, T-Pot’un bir ağ izinsiz giriş tespit sistemi olarak, ağlara yönelik çeşitli saldırı stratejilerini tanımlama etkinliğine odaklanılmaktadır. T-Pot’un kaba kuvvet (brute force), hizmet reddi (DoS) ve ağ haritalama saldırıları gibi çeşitli saldırı türlerine karşı performansı değerlendirilmiştir. Makalede, T-Pot’un siber saldırıları tespit etme ve engelleme konusundaki avantajları incelenmiş ve bu balküpünün potansiyel güvenlik tehditlerini nasıl etkili bir şekilde hafifletebileceği tartışılmıştır. Araştırma, T-Pot üzerinde gerçekleştirilen çeşitli deneylerden toplanan verileri analiz ederek, ağ izinsiz giriş tehditlerini tanımlama ve hafifletme konusundaki yetenekleri keşfetmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, T-Pot’un ağ güvenliğini artırmada ve siber saldırılara karşı koruma sağlamada sağlam ve güvenilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir (Raghu vd. 2024).

“Enhancing False Positive Detection in IDS/IPS Using Honeypots: A Case Study with CSE-CIC-2018 Dataset” araştırma makalesinde, T-Pot’un bir ağ izinsiz giriş tespit sistemi olarak, ağlara yönelik çeşitli saldırı stratejilerini tanımlamadaki etkinliğine odaklanılmaktadır. Bu balküpünün kaba kuvvet (brute force), hizmet reddi (DoS) ve ağ haritalama gibi çeşitli saldırı türlerine karşı performansı değerlendirilmiştir. Makale

ayrıca, T-Pot'un siber saldırıları tespit etme ve engelleme konusundaki avantajları incelenmiş ve bu balküpünün potansiyel güvenlik tehditlerini etkili bir şekilde nasıl hafifletebileceği tartışılmıştır. Araştırma, T-Pot üzerinde gerçekleştirilen çeşitli deneylerden toplanan verileri analiz ederek, ağ izinsiz giriş tehditlerini tanımlama ve hafifletme yetenekleri keşfedilmiştir. Çalışmanın sonuçları, T-Pot'un ağ güvenliğini artırma ve siber saldırılara karşı koruma sağlama konusunda güçlü ve güvenilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir (Rawat 2024).

“Faking smart industry: exploring cyber-threat landscape deploying cloud-based honeypot” makalesinde, akıllı sanayilerdeki siber tehdit manzarasını anlamak amacıyla balküplerinin, özellikle de T-Pot balküpünün kullanımına odaklanılmaktadır. T-Pot, Amazon Elastic Compute Cloud (AWS EC2) üzerinde altı farklı bölgede, endüstriyel kontrol sistemlerini (ICS) simüle eden çeşitli cihaz ve protokollerle dağıtılarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, T-Pot'un geniş hizmet yelpazesi, kolay kurulum ve kullanım özellikleri ile kullanıcı dostu analiz panosundan dolayı tercih edilmiştir. Çalışma, sanayilerdeki siber saldırıların hızla arttığı ve Endüstri 4.0'ın sanayi ile bilgi ve iletişim teknolojilerinin entegrasyonunu hızlandırarak kritik sistemlerin saldırı yüzeyini genişlettiği bir dönemde yapılmıştır. Balküplerinden toplanan veriler, saldırı kaynakları, kullanılan teknikler ve hedeflenen cihazlar hakkında değerli bilgiler sunmuş, saldırıların çoğunlukla bulut hizmetlerinden geldiği ve IPMI cihazları, Siemens PLC'leri ve akıllı sayaçlar gibi cihazları hedef aldığı gözlemlenmiştir. Yaygın saldırı yöntemleri arasında kaba kuvvet (brute force) kimlik doğrulama, bilinen güvenlik açıklarının istismarı ve veri sızdırma gibi sonrasındaki eylemler yer almakta, zararlı yazılım örneklerinde ise fidye yazılımları ve Truva atı (Trojan) yaygın olarak gözlemlenmiştir. Bulgular, ICS güvenliği için yamanmamış güvenlik açıklarının ve eski hizmetlerin ciddi riskler oluşturduğunu, internet üzerinden erişilebilen ICS cihazlarının aktif bir şekilde hedef alındığını ve bu verilerin, saldırı tespit sistemlerini geliştirmek, tehdit istihbaratını güçlendirmek ve akıllı sanayiler için siber güvenlik savunmalarını güçlendirmek amacıyla kullanılabileceğini vurgulamaktadır. Makale, akıllı sanayilerde uygun güvenlik önlemlerinin uygulanmasının önemine dikkat çekmekte ve balküpu dağıtımlarından elde edilen bilgilerin, gelişen tehdit manzarasını anlamak ve sağlam bir siber savunma sistemi kurmak için kritik bir rol oynayabileceğini belirtmektedir (Rashid vd. 2024).

“Learning Models to Detect Personality Traits of Cyber Attackers: A Combined Approach Using Honeypot and Surveys” isimli araştırmada, gerçek dünyadaki siber saldırıları çekmek ve analiz etmek amacıyla kurulan bir balküpu sisteminin nasıl kullanıldığı detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Araştırma, toplanan verilerle saldırı tespiti ve önlenmesi için makine öğrenmesi modellerinin eğitilmesi hedeflenmiş, aynı zamanda saldırganların kişilik özelliklerinin incelenmesi, motivasyonlarının ve davranışlarının anlaşılmasına çalışıldığı belirtilmiştir. T-Pot balküpü, ESPOCH (Escuela Superior Politécnica del Chimborazo) altyapısında, çeşitli hizmetleri ve işletim sistemlerini taklit eden çok yönlü bir sistem olarak kurulmuştur. Saldırganları çekmek için balküpü'nün IP adresi hacker forumlarında yayımlanmış ve sunucu, yaygın güvenlik açıklarıyla yapılandırılarak saldırganları cezbetmek amacıyla standart portlarda hizmet vermeye başlamıştır (José ve Santander 2024).

Bu yaklaşım, saldırganların davranışlarını anlamak için çok yönlü bir veri toplama sürecini başlatmakta, aynı zamanda bu veriler kullanılarak makine öğrenmesi

algoritmaları aracılığıyla saldırganların kişilik özellikleri ve motivasyonlarına dair çıkarımlar yapılmaktadır. Araştırmada, saldırıların detayları ve saldırganların kullandığı teknikler, MITRE ATT&CK matrisine yerleştirilerek daha sistematik bir analiz yapılmaktadır. Bu yaklaşım, saldırganların kullandığı taktik ve tekniklerin etkili bir şekilde izlenmesini ve anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu tür çalışmalar, yalnızca saldırı tespiti ve savunma stratejileri geliştirme açısından önemli katkılar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda saldırganların davranışlarını daha derinlemesine anlamaya yardımcı olarak, onları etkili bir şekilde tahmin etme ve önleme kapasitesini de artırmaktadır. Altı ay süresince toplanan veriler, DoS (Denial of Service) saldırılarının en yaygın saldırı türü olduğunu, bunları SQL enjeksiyonu ve siteler arası komut dosyası çalıştırma (XSS) saldırılarının izlediğini ortaya koymuştur. Bu tür veriler, saldırı desenlerinin analizine yardımcı olarak savunma sistemlerini güçlendirebilmektedir. Ayrıca, bu veriler, makine öğrenmesi algoritmalarıyla birleştirilerek, saldırı türlerini sınıflandırmak ve evrilen saldırı desenlerine karşı daha akıllı güvenlik sistemleri geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi, saldırıları otomatik olarak tespit etme ve sınıflandırma konusunda büyük bir avantaj sağlamaktadır (José ve Santander 2024).

“Investigating Threats to ICS and SCADA Systems Via Honeypot Data Analysis and SIEM” başlıklı makale, SCADA (Denetim ve Veri Toplama) ve ICS (Endüstriyel Kontrol Sistemleri) sistemlerine yönelik tehditlerin incelenmesi amacıyla balküpu verisi analizi ve SIEM (Güvenlik Bilgisi ve Olay Yönetimi) sistemlerinin kullanımı ele alınmaktadır. Araştırma, Conpot adlı açık kaynaklı bir balküpu aracı kullanılarak SCADA sistemlerinin simüle edilmesi sağlanmış ve bu sistem, bulut ortamında bir konteyner içinde internete açılarak gerçek dünya tehdit verisi toplanmıştır. Bu veriler, ICS ve SCADA sistemlerinin savunmasını güçlendirebilecek önemli bilgileri içermektedir. Toplanan balküpu günlükleri, Wazuh adlı açık kaynaklı bir SIEM çözümüne entegre edilmiştir. Wazuh, tehditlerin zamanında analiz edilmesini sağlayarak saldırı tespiti ve yanıt süreçlerini optimize etmiştir. Wazuh tarafından üretilen uyarılar, TheHive adlı bir güvenlik orkestrasyonu, otomasyon ve yanıt (SOAR) platformuna yönlendirilmiş ve otomatik yanıt eylemleri için çalışma kitapları oluşturulmuştur. Örneğin, bu yanıt eylemleri arasında kötü amaçlı IP adreslerinin engellenmesi yer almaktadır. Bu tür otomatik yanıt süreçleri, siber tehditlere karşı daha hızlı ve etkili bir savunma sağlamaktadır. Araştırma, kaba kuvvet giriş denemeleri, keşif ve zafiyet taramaları, kimlik doğrulama limitlerini aşmaya yönelik saldırılar gibi çeşitli saldırı türlerinin tespit edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, bu saldırıların çoğunun ABD, ardından Çin, Birleşik Krallık ve diğer ülkelerden geldiği tespit edilmiştir. Saldırıların çoğunun HTTP protokolünü hedef aldığı ve özellikle web tabanlı zafiyetler nedeniyle bu protokolün saldırganlar için daha cazip olduğu belirtilmiştir. Bu bulgular, SCADA ve ICS sistemlerinin internet üzerinden erişilebilirliğinin, saldırganlar için geniş bir saldırı yüzeyi sunduğunu göstermektedir (Muhammad ve Hafee y.y.).

“Developing Proactive Cyber Threat Defense Systems on Server Computers Using Honeypot Techniques” isimli makale, sunucu bilgisayarlarında siber tehditlere karşı proaktif bir savunma stratejisinin geliştirilmesine odaklanılmaktadır. Araştırmacılar, Brute Force saldırılarını engellemek için, sahte bir sunucu ortamı kullanarak kötü niyetli erişim girişimlerinin tespit edilmesi amacıyla bir balküpu sistemi kurulmuştur. AWS Cloud Services üzerinde kurulan balküpu, kamuya açık ağlardan erişilebilir hale getirilmiş ve sistem günlük verilerini toplamak için bir ajan yerleştirilmiştir. 16 Mart

2024 ile 15 Nisan 2024 tarihleri arasında toplanan 35.968 günlük veri analiz edilmiştir ve bu verilerin çoğu, “Root” kullanıcı adıyla yapılan SSH erişim girişimlerinden oluşan kaba kuvvet (Brute Force) saldırılarını göstermektedir. Veriler, Wazuh adlı açık kaynaklı bir SIEM (Güvenlik Bilgisi ve Olay Yönetimi) sistemi ile analiz edilmiştir ve MITRE ATT&CK çerçevesine dayalı yeni bir kural oluşturulmuştur. Bu yeni kural, belirli olayların 10 dakika içinde dört kez gerçekleşmesi durumunda tetiklenmiştir. Araştırma, sistemin gerçek dünyada nasıl çalıştığının test edilmesi için Nmap aracı kullanılarak yapılan simülasyonlarla başarıyla doğrulanmıştır. Yeni kural, kaba kuvvet saldırısı tespit edildiğinde, saldırganın IP adresini 30 dakika süreyle engellemiş ve bu süreç SIEM tarafından kaydedilmiştir. Araştırma, balküplerinin potansiyel saldırganlar ve teknikleri hakkında bilgi toplamada ne kadar etkili olduğu, ayrıca SIEM sistemlerinin bu verileri analiz etme ve otomatik önlemler alma konusundaki önemi vurgulanmıştır. Bu çalışma, siber saldırılara karşı proaktif bir savunma stratejisinin geliştirilmesinde balküpleri ve SIEM sistemlerinin entegrasyonunun büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Mungsing ve Sringendee y.y.).

3. MITRE ATT&CK MATRİSİNİN YAPISI VE İŞLEVİ

MITRE ATT&CK matrisi, siber tehditlerin anlaşılmasını ve savunma stratejilerinin geliştirilmesini desteklemek amacıyla tasarlanmış bir çerçeve olarak kullanılmaktadır. Bu matris, saldırganların kullanabileceği çeşitli taktikleri, teknikleri ve prosedürleri kapsamaktadır.

Siber güvenlik alanında tehditlerin modellenmesi ve tehditlere yönelik savunma stratejilerinin belirlenmesi kapsamında MITRE ATT&CK matrisi önemli bir rol oynamaktadır. Gerçek dünya gözlemlerine dayanan kapsamlı bir TTP (Taktikler, Teknikler ve Prosedürler) deposu sunulmaktadır. MITRE ATT&CK matrisi, düşman davranış kalıplarının ve saldırı metodolojilerinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu bilgi, potansiyel siber tehditleri öngörebilen ve bunlara karşı koyabilen etkili tehdit modellerinin oluşturulması için gereklidir (Al-Sada, Sadighian, ve Oligeri 2024).

MITRE ATT&CK matrisi, platform geliştirme ve güvenlik operasyonlarını bilgilendirebilecek değerli bilgiler sunmaktadır. Platform geliştiricileri, düşmanlar tarafından kullanılan taktik ve teknikler anlaşılma, özellikle bu saldırı yöntemlerini hedef alan araçlar geliştirilebilmektedir. Ayrıca, güvenlik platformları, tehditleri önceliklendirmek için MITRE ATT&CK çerçevesinden yararlanılabilmektedir. Platform uyarıları, ATT&CK teknikleriyle uyumlu hale getirilerek, güvenlik ekiplerinin kuruluşlarının risk profiline dayalı olarak en kritik tehditlere odaklanmasına olanak tanımaktadır. Bunun yanı sıra, MITRE ATT&CK matrisi verileri, platformlardaki güvenlik farkındalığı eğitim modüllerine entegre edilebilmektedir. Kullanıcılar, gerçek dünya saldırı tekniklerine maruz bırakılmakta, şüpheli faaliyetleri belirleme ve kaldırma yetenekleri geliştirilmekte ve böylece kuruluşların siber güvenlik duruşu güçlendirilmektedir (Georgiadou, Mouzakitis, ve Askounis 2021).

Bilinen saldırı modelleri analiz edilerek ve bunlar toplanan verilerle ilişkilendirilerek, kuruluşların savunma stratejileri güçlendirilebilmektedir. MITRE ATT&CK, güvenlik açıklarının ve potansiyel saldırı vektörlerinin belirlenmesine yardımcı olarak, proaktif

savunma önlemlerinin alınmasını sağlamaktadır. Bu bilgi tabanı, saldırı olasılıkları ve başarı oranları hesaplanarak risk değerlendirme metodolojilerinde kullanılabilmektedir. MITRE ATT&CK ile saldırı grafiklerinin birleştirilerek, kuruluşların siber güvenlik duruşları değerlendirilebilmekte ve saldırıları azaltma çabalarına öncelik verilebilmektedir. Ayrıca, MITRE ATT&CK matrisi, siber saldırıların tespit edilmesine, tahmin edilmesine, önlenmesine ve azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Mobil kötü amaçlı yazılımlar sınıflandırılarak ve MITRE ATT&CK matrislerine dayalı benzerlikler hesaplanarak, kuruluşların yanlış pozitifleri (false positive) azaltılmakta ve güvenlik uyarılarının doğruluğu artırılabilir (Al-Sada, Sadighian, ve Oligeri 2024).

3.1. Mitre Att&Ck Matrisinin Genel Yapısı

MITRE ATT&CK matrisi, birçok farklı siber saldırı tekniğini kapsayan bir dizi taktik ve teknikten oluşmaktadır. Matris, taktikleri geniş bir kategori altında gruplandırmakta ve her taktik altında çeşitli saldırı teknikleri listelenmektedir. Her teknik, belirli bir saldırı yöntemini veya aşamayı temsil etmekte olup, bu teknikler, saldırganların ağları ele geçirme, gizlenme, hareket etme ve hasar verme gibi amaçlarına ulaşmak için kullandıkları araçlar olarak belirlenmektedir.

Çalışma kapsamında, balküpleri üzerinden gelen saldırılar MITRE ATT&CK Linux platformunda tespit edilenler ile ilişkilendirilmiş ve aşağıdaki Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Tespit Edilen MITRE ATT&CK Saldırıları

Saldırı Türü (Attack Type)
Kalıcılık (Persistence)
Savunma Kaçırma (Defense Evasion)
Ayrıcalık Yükseltme (Privilege Escalation)
İlk Erişim (Initial Access)
Keşif (Discovery)
Sızma (Exfiltration)
Komuta ve Kontrol (Command and Control)
Koleksiyon (Collection)
Etki (Impact)
Yürütme (Execution)
Kimlik Bilgileri Erişimi (Credential Access)
Yanal Hareket (Lateral Movement)

Kalıcılık (Persistence), saldırganların sisteme uzun süreli erişim elde etmelerini sağlamak için kullanılan teknikleri kapsar. Bu teknikler, bir defa giriş sağlandıktan sonra, saldırganların sistemden çıkarılmadan veya fark edilmeden bir süre boyunca erişimlerini sürdürebilmelerini mümkün kılar. Çoğunlukla, kötü amaçlı yazılımlar veya sistemde yapılan değişiklikler aracılığıyla sağlanır.

Savunma Kaçırma (Defense Evasion), saldırganların savunma mekanizmalarından (antivirüs yazılımları, güvenlik duvarları vb.) kaçmak için kullandıkları yöntemleri ifade eder. Bu teknikler, tespit edilmeden sistemi manipüle etmek veya kontrol altına almak amacıyla tercih edilir.

Ayrıcalık Yükseltme (Privilege Escalation), saldırganların sahip oldukları erişim seviyesini artırmalarına olanak tanır. Kullanıcı seviyesindeki izinlerle sınırlı kalmak yerine, daha yüksek yönetici (admin) seviyelerine çıkarak sistem üzerinde tam kontrol elde edilir. Bu genellikle sistemin zayıflıklarından yararlanılarak yapılır.

İlk Erişim (Initial Access), saldırganların hedef sisteme ilk defa girmelerini sağlayan yöntemleri kapsar. Genellikle kimlik avı, zararlı yazılım yükleme veya ağ zafiyetlerinden yararlanılarak gerçekleştirilir. Saldırgan, sistemin güvenlik önlemlerini aşarak ilk adımda erişim sağlar.

Keşif (Discovery), saldırganların sistemde bilgi toplamak amacıyla kullandığı teknikleri ifade eder. Bu süreçte, saldırganlar ağdaki cihazları, kullanıcıları ve diğer sistem bileşenlerini belirlemek için çeşitli araçlar kullanır. Keşif, sonraki adımlar için yol gösterici olur.

Sızma (Exfiltration), hassas verilerin sistemden dışarıya çıkarılması sürecidir. Bu, saldırganın hedefe dair önemli verileri ele geçirmesinin ardından yapılır. Veriler çoğunlukla şifrelenir ve güvenli yollarla dışarıya aktarılır.

Komuta ve Kontrol (Command and Control), saldırganların hedef sistem üzerinde kontrol sağlamak ve eylemlerini yönlendirmek için kullandıkları tekniklerdir. Genellikle dışarıdan bağlanan bir sunucu aracılığıyla, saldırganlar sisteme emirler gönderir ve veri alırlar. Bu iletişim, çoğu zaman şifrelenmiş olur.

Koleksiyon (Collection), saldırganların hedef sistemdeki önemli bilgileri toplama sürecidir. Bu bilgiler, kullanıcı verileri, sistem yapılandırmaları veya ağ trafiği gibi unsurları içerebilir. Bu teknik, genellikle keşif ve sızma aşamalarından sonra yapılır.

Etki (Impact), saldırganların hedef sisteme zarar vermek amacıyla uyguladıkları teknikleri ifade eder. Bu, verilerin silinmesi, sistemin çalışamaz hale getirilmesi veya kritik hizmetlerin engellenmesi gibi durumları kapsar. Amaç, hedefin işleyişini bozmak veya kullanılmaz hale getirmektir.

Yürütme (Execution), saldırganların kötü amaçlı kodlarını veya komutlarını hedef sistemde çalıştırdıkları aşamadır. Bu teknik, zararlı yazılımların, komut dosyalarının veya araçların hedefte çalıştırılmasını içerir. Yürütme, genellikle saldırganın sistemi kontrol etmek için gerçekleştirdiği ilk eylem olabilir.

Kimlik Bilgileri Erişimi (Credential Access), saldırganların sistemdeki kullanıcı adı ve şifre gibi kimlik bilgilerine ulaşmalarını sağlayan teknikleri kapsar. Bu teknik, genellikle kimlik avı saldırıları veya zayıf parola kullanımından yararlanarak gerçekleştirilir.

Yanal Hareket (Lateral Movement), saldırganların ağdaki diğer sistemlere geçiş yaparak erişim sağladıkları süreçtir. Bu, genellikle bir ağda daha fazla yetki elde etmek veya daha fazla hedefe ulaşmak için yapılır. Saldırgan, bir bilgisayarın kontrolünü ele geçirdikten sonra, ağdaki diğer makinelerde de erişim sağlamayı hedefler.

3.2. Taktikler, Teknikler ve Prosedürler (TTP'ler)

MITRE ATT&CK matris veri tabanı, siber güvenlik alanında tehdit tanımlama, risk değerlendirmesi, savunma stratejileri geliştirme, tespit ve önleme yeteneklerini artırma ve bilgi paylaşımı gibi konularda önemli bir kaynak sunulmaktadır. Gerçek dünya saldırılarına dayalı olarak düşman taktiklerini, tekniklerini ve prosedürlerini kapsayan kapsamlı bir bilgi tabanı sağlanarak, siber saldırganların kullandığı yöntemleri tanımlamaya ve anlamaya yardımcı olunmaktadır. Araştırmacılar ve uzmanlar, bu çerçeveden yararlanarak çeşitli siber tehditlerle ilişkili riskleri değerlendirebilir, potansiyel saldırı vektörlerini yapılandırılmış bir analizle inceleyebilir ve savunma önlemlerini önceliklendirebilirler (Al-Sada, Sadighian, ve Oligeri 2024).

Tablo 2'de MITRE ATT&CK Linux matrisi, Linux işletim sistemi hedef alınarak gerçekleştirilen siber saldırılarda kullanılan taktikler ve teknikler sistematik bir şekilde sınıflandırılmaktadır. Her bir taktik, saldırı sırasında gerçekleştirilmesi amaçlanan belirli bir adımı temsil etmektedir, örneğin başlangıç erişimi sağlanması, yetki artırılması ya da savunmanın kaçırılması gibi. Her taktiğe karşılık gelen teknikler, bu hedeflere ulaşmak için kullanılan özel yöntemleri içermektedir. Örneğin, başlangıç erişimi sağlamak için SSH kaba kuvvet saldırıları ya da bir yetki artırma tekniği olarak sudo caching kullanılması gibi. Bu matris kullanılarak, güvenlik uzmanları ve ağ yöneticileri, Linux tabanlı sistemlerin daha etkili bir şekilde korunması ve saldırıların erken tespit edilmesi sağlanabilir (Mitre Att&Ck 2023).

Tablo 2. MITRE ATT&CK Taktik ve Teknikler

Taktikler	Teknikler
Başlangıç Erişimi (Initial Access)	Kimlik Bilgisi Phishing (Spearphishing), Web Shell, Saldırgan Tarafından Yönlendirilen Zararlı Web Sitesi (Drive-by Compromise)
Çalıştırma (Execution)	Komut ve Betik Yorumlayıcı, PowerShell, Planlanmış Görevler/İşler (Scheduled Task/Job)
Kalıcılık (Persistence)	Başlangıç veya Oturum Açılış Otomatik Başlatmaları (Boot or Logon Autostart), Kayıt Defteri Çalıştırma Anahtarları/ Başlangıç Klasörleri (Registry Run Keys/Startup Folder), Planlanmış Görevler/İşler (Scheduled Task/Job)
Yetki Artırma (Privilege Escalation)	Açıklar Aracılığıyla Sömürme (Exploitation of Vulnerability), Sudo Önbellekleme (Sudo Caching), Erişim Tokeni Manipülasyonu (Access Token Manipulation)

Savunma Kaçırma (Defense Evasion)	Şifreli Dosyalar veya Bilgiler (Obfuscated Files or Information), Zaman Damgası Manipülasyonu (Timestamp), Dosya ve Dizin İzinlerinin Değiştirilmesi (File and Directory Permissions Modification)
Kimlik Bilgisi Erişimi (Credential Access)	Kaba Kuvvet Saldırısı (Brute Force), Kimlik Bilgisi Dökümü (Credential Dumping), Girdi Yakalama (Input Capture)
Keşif (Discovery)	Sistem Bilgisi Keşfi (System Information Discovery), Ağ Paylaşımı Keşfi (Network Share Discovery), Uzak Sistem Keşfi (Remote System Discovery)
Yatay Hareket (Lateral Movement)	Uzak Masaüstü Protokolü (Remote Desktop Protocol), SMB/Windows Yönetici Paylaşımları (Windows Admin Shares), Windows Uzak Yönetimi (Windows Remote Management)
Toplama (Collection)	Yerel Sistemden Veri Toplama (Data from Local System), Ekran Görüntüsü Yakalama (Screen Capture), Pano Verisi (Clipboard Data)
Veri Sızdırma (Exfiltration)	Komut ve Kontrol Kanalı Üzerinden Veri Sızdırma (Exfiltration Over Command and Control Channel), Web Servisi Üzerinden Veri Sızdırma (Exfiltration Over Web Service), Diğer Ağ Ortamları Üzerinden Veri Sızdırma (Exfiltration Over Other Network Medium)
Etkileşim (Impact)	Veri Yok Etme (Data Destruction), Servis Durdurma (Service Stop), Kaynak Kaçırma (Resource Hijacking)

MITRE ATT&CK her TTP için koruma stratejileri sunarak, kritik altyapıları korumaya yönelik çözümler sağlanmaktadır. Taktik ve teknikleri inceleyen siber güvenlik uzmanları, etkili savunma stratejileri geliştirerek, siber tehditleri önlemek ve hafifletmek için harekete geçebilirler. Belgelenen saldırı teknikleri anlaşılmakta ve organizasyonlar, tespit ve önleme yeteneklerini artırarak, bilinen saldırı kalıplarına uyumlu savunma önlemleri olarak potansiyel tehditlere karşı proaktif bir şekilde savunma sağlamaktadırlar. MITRE ATT&CK ayrıca tehdit istihbaratı verilerini ve bilgilerini paylaşma platformu olarak hizmet verilmekte olup, siber güvenlik profesyonellerinin yeni bilgileri bilgi tabanına entegre etmelerine olanak tanınmakta ve tehdit profilleri, taktikler ve tekniklerle güncellenmektedir (Al-Sada, Sadighian, ve Oligeri 2024).

Sonuç olarak, MITRE ATT&CK matrisi, siber güvenlikte tehdit modelleme ve savunma stratejileri için değerli bir kaynak olarak sunulmakta olup, siber tehditlerin anlaşılması, analiz edilmesi ve hafifletilmesi konularında yapılandırılmış bir çerçeve sağlanmaktadır.

3.3. Matrisin Siber Güvenlikteki Önemi

MITRE ATT&CK matrisi, siber güvenlik alanında çok önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. MITRE tarafından geliştirilen bu matris, saldırganların kullanabileceği taktik ve teknikleri sistemlerin savunmasını güçlendirmek amacıyla tanımlar. Bu

matris, savunma ekiplerine saldırıların nasıl gerçekleşebileceği konusunda kapsamlı bir rehber sunmakta ve bu sayede savunma stratejilerinin oluşturulması ve güçlendirilmesinde yardımcı olmaktadır.

MITRE ATT&CK matrisi, saldırganların kullanabileceği taktikleri ve bu taktiklerin gerçekleştirilmesi için kullanılabilecek teknikleri detaylı olarak listelemektedir. Bu, güvenlik ekiplerine saldırıların nasıl ilerleyebileceği konusunda bir anlayış kazandırmakta ve bu taktik ve tekniklerin izlerini sürmelerine yardımcı olmaktadır. MITRE ATT&CK matrisi aynı zamanda, güvenlik olaylarını inceleme ve analiz etme sürecinde de önemli bir kılavuz olarak hizmet etmektedir. Saldırıların izleri sürülerek, saldırıların detayları anlaşılmakta ve sistemdeki zayıf noktalar tespit edilmektedir. Bu sayede, olaylara hızlı bir şekilde yanıt verilmesi ve sistemin daha güvenli hale getirilmesi sağlanmaktadır.

MITRE ATT&CK matrisi, siber güvenlik alanında kritik bir araç olarak kabul edilmektedir çünkü savunma stratejilerinin oluşturulması, güçlendirilmesi ve güvenlik olaylarının analiz edilmesi süreçlerinde güvenlik ekiplerine büyük ölçüde yardımcı olmaktadır. Bu matris, güvenlik uzmanlarına saldırıların anlaşılması ve etkili bir şekilde savunulması için gerekli olan bilgileri ve yönergeleri sunmaktadır.

4. KULLANILAN ARAÇLAR VE TEKNOLOJİLER

Linux tabanlı sistemlerin güvenliği için bir dizi araç kullanılmaktadır. Bu araçlar, güvenlik izleme, saldırgan davranışlarının analizi, güvenlik denetimi, olay izleme ve saldırı simülasyonları gibi çeşitli amaçlarla tercih edilmektedir. Bu bölümde, Wazuh, T-Pot Balküğü, Auditd (The Linux Audit Daemon) ve Atomic Red Team gibi Linux platformunda kullanılan bazı güvenlik araçları incelenmektedir.

Bu makalede, Linux platformlarına yönelik yapılan siber saldırılar, balküğü sistemleri aracılığıyla toplanmış ve bu saldırılar, MITRE ATT&CK matrisine dayalı olarak analiz edilmiştir. Saldırlara ait log verileri, Wazuh platformunda işlenmiş ve bu verilerle saldırılara yönelik kod çözücüler ve kurallar oluşturulmuştur. Literatürde, Linux tabanlı sistemler üzerinde balküğü kullanılarak yapılan saldırıların bu şekilde MITRE ATT&CK çerçevesi ile adreslenmesi ve Wazuh platformunda analiz edilmesi konusunda daha önce benzer bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle, yapılan bu çalışma, Linux tabanlı balküğüleri ve Wazuh platformu ile saldırıların tespiti ve analiz edilmesi bakımından özgün bir katkı sunmaktadır.

Wazuh ve T-Pot gibi araçlar, bu çalışmada stratejik olarak seçilmiştir. Wazuh, açık kaynaklı bir SIEM (Güvenlik Bilgisi ve Olay Yönetimi) çözümü olarak, log verilerinin toplanması, saldırı tespiti ve güvenlik yönetimi konularında güçlü özellikler sunmaktadır. Linux platformları üzerinde gerçekleştirilen saldırıların etkin bir şekilde tespit edilmesi ve analiz edilmesi için Wazuh tercih edilmiştir. T-Pot ise, balküğü teknolojisinin geniş bir yelpazede saldırıları simüle etmesi ve çok sayıda saldırı tipi ile etkileşimde bulunabilmesi nedeniyle kullanılmıştır. T-Pot, Elasticsearch ve Kibana gibi araçlarla güçlü bir entegrasyon sağlayarak, saldırılara dair derinlemesine veriler elde edilmesini sağlamaktadır. Bu araçların, Linux tabanlı sistemlerdeki siber tehditlere dair

analizler yapılırken bir arada kullanılması, literatürde bu tür bir kombinasyonun daha önce denenmemiş olması açısından önemli bir yenilik taşımaktadır.

Wazuh, açık kaynaklı bir güvenlik izleme ve yönetim platformu olarak kullanılmaktadır. Sistemlerin güvenliği sağlanmak amacıyla log toplama, anomali tespiti, dosya bütünlüğü denetimi, zararlı yazılım analizi ve güvenlik yapılandırması denetimi gibi özellikler sunulmaktadır. Wazuh, aynı zamanda gerçek zamanlı saldırı tespiti sağlanarak saldırıların kaydı tutulmakta ve olaylar merkezi bir sunucuda toplanmaktadır.

T-Pot balküğü, hazır paket çözüm sunması, çok protokollü destek, merkezi izleme ve analiz imkanı, ve gerçek zamanlı saldırı tespiti gibi avantajlarla geleneksel balküplerine kıyasla daha kapsamlı ve etkili bir yaklaşım sağlamaktadır (Mohd Fuzi vd. 2024). T-Pot, birden fazla balküğü içeren bir Linux güvenlik aracı olarak kullanılmaktadır. Balküpleri, saldırganların davranışlarını izlemek ve analiz etmek amacıyla kullanılmaktadır. T-Pot, siber saldırganların ağ üzerinde gerçekleştirdiği faaliyetleri izlemek ve bu verilerle güvenlik açıklarını belirlemek için kullanılmıştır. Balküğü, saldırı türlerinin çeşitliliği ve saldırganların yöntemleri hakkında detaylı bilgiler elde edilmesini sağlamaktadır.

Balküpleri, siber güvenlikte hem erken tehdit tespiti sağlayarak gerçek sistemlere yönelik saldırıların engellenmesine yardımcı olunur, hem de saldırganların davranışları izlenerek güvenlik uzmanlarının onların kullandığı yöntemler ve stratejiler daha iyi anlaşılmaktadır. Bu sayede sıfırcı gün saldırıları gibi karmaşık tehditler düşük yanlış alarm oranlarıyla tespit edilebilir ve aynı zamanda araştırmacılara, yeni güvenlik araçlarının geliştirilmesi için değerli veriler sunulurken genel güvenlik durumu güçlendirilmektedir (Javadpour vd. 2024).

Auditd, Linux sistemlerinde güvenlik olaylarını izlemek ve kaydetmek için kullanılan bir araç olarak kullanılmaktadır. Sistem üzerinde gerçekleşen tüm önemli olaylar, örneğin kullanıcı işlemleri, dosya erişimleri ve ağ bağlantıları kaydedilmektedir. Bu veriler, saldırı tespitinde ve sistemdeki olağan dışı aktivitelerin belirlenmesinde faydalı olmaktadır. Ayrıca, sistem yöneticilerine yasal uyumluluk ve denetim amaçları için gerekli veriler sağlanmaktadır.

Atomic Red Team, güvenlik testi ve saldırı simülasyonu yapmak için kullanılan açık kaynaklı bir araç olarak kullanılmaktadır. Linux sistemlerinde saldırganların yöntemlerini simüle etmek ve sistemin savunma yeteneklerini test etmek amacıyla kullanılmaktadır. Atomic Red Team, önceden tanımlanmış saldırı tekniklerine dayalı testler sağlamakta, sistemdeki zayıf noktaların tespit edilmesini ve savunmaların güçlendirilmesini sağlamaktadır.

Bu araçlar, Linux tabanlı sistemlerin güvenliğinin sağlanması, saldırıların tespit edilmesi ve önlenmesi için kritik öneme sahiptir. Her biri, farklı güvenlik seviyelerinde ve ihtiyaçlarda çeşitli özellikler sunarak Linux tabanlı altyapıların savunmalarını güçlendirmeye yardımcı olmaktadır.

4.1. Wazuh: Güvenlik İzleme ve Log Yönetimi

Wazuh, günlük veri analizi, bir BT altyapısındaki varlıkların faaliyetleri hakkında bilgi edinmek için farklı kaynaklardan oluşturulan günlüklerin incelenmesini içermektedir. Wazuh, açık kaynak kodlu bir SIEM (Security Information and Event Management) çözümü olarak kullanılmaktadır ve mimarisi çoğunlukla izlenen ana makinalarda çalışan ajanlara dayanır; bu ajanlar, güvenlik bilgilerini merkezi SIEM sunucusuna gönderir (Zahid vd. 2023). SIEM sunucusu, ayrı işlevleri tek bir ajan ve platform mimarisi içinde birleştirerek uç nokta güvenliği, tehdit istihbaratı, detaylı güvenlik operasyonları ve bulut güvenliği sağlamaktadır.

Tehdit tespiti ve müdahalesi, düzenlemelere uygunluğun sağlanması ve sistem performansı sorunlarının belirlenmesi için izlenen varlıklardan günlüklerin gerçek zamanlı olarak toplanması ve işlenmesi sağlanmıştır. Wazuh, bulut, şirket içi, sanallaştırılmış ve konteynerli ortamlardaki güvenlik tehditlerine karşı koruma sağlamaktadır.

Wazuh, kendisine ajanları üzerinden ve syslog olarak gönderilen günlükleri analiz etmek için önceden tanımlanmış kod çözücülere (decoder) ve kurallara (rules) sahiptir. Bu kod çözücüler ve kurallar, farklı tehdit modellerini işlemek ve tespit etmek için PCRE (Perl Compatible Regular Expressions) desteği ile düzenli ifadeler kullanmaktadır. Wazuh, toplanan günlüklerden ilgili alanları çıkarmak için kod çözücülerini kullanmaktadır. Bu alanlar, IP adresleri, bilgisayar adları, zaman damgaları, kullanıcı adları, bağlantı noktaları, MAC adresleri ve diğer ilgili veri alanlarını içermektedir. Wazuh, toplanan günlüklerin kodunu çözdükten sonra, bunları kullanıma hazır kurallarıyla karşılaştırmaktadır. Bir kural, kod çözülmüş bir günlükle eşleştiğinde, Wazuh kontrol panelinde uyarılar tetiklenmektedir. Bu araştırma kapsamında, balküpleri üzerinden gelen günlükler için özel kod çözücü ve kurallar tanımlanmıştır.

Wazuh araçları, sistem günlükleri, uygulama günlükleri ve ağ günlükleri gibi çeşitli kaynaklardan günlük verilerini toplamak amacıyla sunucular, iş istasyonları ve IoT cihazları gibi uç noktalara dağıtılmaktadır. Toplanan günlük verileri, SIEM sistemiyle tutarlılığını ve uyumluluğunu sağlamak için Wazuh araçları tarafından normalleştirilmektedir. Bu süreç, daha kolay analiz için günlük formatlarının standartlaştırılmasını içermektedir (Hussein ve Hamza 2022).

Wazuh, günlük toplama ve analiz yeteneklerinin geliştirilmesi için SIEM çözümleriyle entegre edilebilen açık kaynaklı bir güvenlik izleme platformu olarak kullanılmaktadır. Toplanan günlük verileri, SIEM sistemiyle tutarlılık ve uyumluluk sağlanması için Wazuh araçları tarafından normalleştirilmektedir. Bu süreç, daha kolay analiz için günlük formatlarının standartlaştırılmasını içermektedir. Normalleştirilen günlük verileri, daha sonra ağdaki birden fazla araçtan günlüklerin toplanması ve işlenmesi için merkezi bir sunucu görevi gören Wazuh yöneticisine iletilmektedir. Wazuh yöneticisi, güvenlik olaylarının, anormalliklerin ve potansiyel tehditlerin belirlenmesi için önceden tanımlanmış kurallar ve korelasyon mekanizmaları kullanılarak günlük verilerini gerçek zamanlı olarak analiz etmektedir. Bir güvenlik olayı tespit edildiğinde, Wazuh, güvenlik ekiplerine veya yöneticilere potansiyel güvenlik sorunu hakkında uyarlamak için uyarılar ve bildirimler oluşturmaktadır. Wazuh, kapsamlı bir güvenlik

izleme ve olay müdahale yeteneği sağlanması için ELK Stack (Elasticsearch, Logstash, Kibana) gibi popüler SIEM çözümleriyle veya diğer ticari SIEM ürünleriyle entegre edilebilmektedir (Hussein ve Hamza 2022).

4.2. T-pot Balküğü: Saldırgan Davranışlarının Analizi

Güvenlik uzmanları, balküğü etkileşimlerinden toplanan verilerin günlük kaydedilmesi ve analiz edilmesiyle, saldırganların taktikleri ve stratejileri hakkında değerli bilgiler edinilebilmektedir. Bu etkileşimler, yeni saldırı eğilimleri, güvenlik açıkları ve kötü amaçlı yazılım örnekleri gibi tehdit istihbaratını toplamak için önemli bir kaynak teşkil etmektedir. Elde edilen bilgiler, kuruluşların güvenlik duruşlarını iyileştirmelerine ve ortaya çıkan tehditlere karşı etkili karşı önlemler geliştirmelerine yardımcı olabilmektedir. Araştırmacılar, balküğü sistemlerinin kullanılmasıyla parmak izi alma ve tanımlama tekniklerini incelemek ve geliştirmektedirler. Bu sayede, güvenlik uzmanları, saldırganların balküpleri nasıl tespit etmeye çalıştıklarını anlayarak, aldatma tekniklerini geliştirebilmekte ve balküğü dağıtımlarının etkinliği artırılabilir. Balküpleri, düşmanların nasıl çalıştığı ve düşündüğü hakkında değerli bilgiler sağlamakta hizmet etmektedir. Ayrıca, güvenlik uzmanları bu etkileşimler kullanılarak, saldırgan davranışları incelenebilmekte, güvenlik savunmaları test edilebilmekte ve siber güvenlik tehditleri ile savunmalar üzerine araştırmalar yapılabilmektedir (Srinivasa, Pedersen, ve Vasilomanolakis 2023).

T-Pot balküğü, çeşitli balküğü teknolojilerinin tek bir platformda birleştirilmesiyle saldırgan davranışlarının analiz edilmesine olanak tanınmaktadır. Balküpleri, saldırganları çekmek ve davranışlarını gözlemlemek için oluşturulmuş sunucu veya sistemler olarak kullanılmaktadır. T-Pot, Linux platformlarına yapılan saldırıların tespit edilmesi ve analiz edilmesi için tasarlanmış açık kaynaklı bir balküğü platformu olarak tanımlanmaktadır. Güvenlik araştırmacıları, sızma test uzmanları ve olaya müdahale edenler, saldırganlar tarafından kullanılan TTP (Taktikler, Teknikler ve Prosedürler) yöntemlerini anlamak için bu platformu güçlü bir araç olarak kullanmaktadır. Balküğü, yetkisiz erişimi veya kötü niyetli etkinlikleri çekmek ve tespit etmek amacıyla kasıtlı olarak savunmasız bırakılan bir yem sistemi veya ağ kaynağı olarak tasarlanmaktadır. Bu sistemler, saldırganlar, yöntemleri ve motivasyonları hakkında bilgi toplamak için kullanılmaktadır.

T-Pot, çok sayıda protokole ve saldırı türüne karşı hassasiyet göstermekte ve ağ güvenliği ekiplerinin saldırganların taktiklerini daha iyi anlamalarına ve savunma stratejilerini geliştirmelerine yardımcı olmaktadır. Saldırganların kullandığı tekniklerin tespit edilmesi ve analiz edilmesi, savunmaların güçlendirilmesine olanak tanımakta ve güvenlik uzmanlarına değerli bilgiler sunmaktadır. T-Pot gibi balküğü platformları, saldırganların davranışlarını gözlemlemek, yeni saldırı tekniklerini keşfetmek ve güvenlik açıklarını belirlemek için önemli bir kaynak oluşturmaktadır.

4.3. Auditd: Güvenlik Denetimi ve Olay İzleme

Auditd, Linux platformlarında güvenlik denetimi ve olay izleme amacıyla kullanılan önemli bir araç olarak tanımlanmaktadır. Auditd, sistem çağrılarını izleyerek şüpheli etkinlikleri tespit etmekte ve bu etkinlikleri günlük dosyalarına kaydetmektedir. Bu sayede, sistem yöneticileri ve güvenlik uzmanları, potansiyel saldırı girişimlerini hızlı

bir şekilde tespit edebilmekte ve bu verileri analiz ederek gerekli önlemleri alabilmektedirler. Auditd aracılığıyla, sistem üzerinde gerçekleşen tüm kritik olaylar, örneğin kullanıcı işlemleri, dosya erişimleri, ağ bağlantıları ve diğer güvenlik açısından önemli aktiviteler kaydedilmektedir. Bu günlükler, sistemdeki olağan dışı hareketleri belirlemek, izinsiz erişimi engellemek ve genel güvenlik durumunu iyileştirmek için kullanılabilir. Auditd, aynı zamanda yasal uyumluluk ve denetim amaçları için de önemli bir kaynak sağlamakta, böylece kuruluşlar düzenlemelere uygunluklarını denetleyebilmektedirler.

4.4. Atomic Red Team: Saldırı Simülasyonları

Atomic Red Team, MITRE ATT&CK matrisine dayalı olarak gerçek dünya saldırılarını simüle etmek için kullanılan bir test çerçevesi olarak tanımlanmaktadır. Bu araç, saldırganların TTP'lerini (Taktikler, Teknikler ve Prosedürler) taklit ederek, savunma mekanizmalarının etkinliğini test etmeye yardımcı olmaktadır. Atomic Red Team, savunma ekiplerinin mevcut güvenlik önlemlerinin zayıf noktalarını belirlemelerine ve bu önlemleri güçlendirmelerine olanak tanımaktadır. Saldırı simülasyonları, ekiplerin gerçek dünyada karşılaşılabilecekleri tehditlere karşı daha hazırlıklı olmalarını sağlamakta ve savunma stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu sayede, savunma ekipleri, daha etkili müdahale planları oluşturabilmekte ve güvenlik altyapılarını iyileştirerek olası saldırılara karşı daha dirençli hale gelebilmektedirler.

5. SALDIRI PLANLAMA

5.1. Test Ortamının Hazırlanması

Bu çalışmada, T-Pot Balküğü platformu kullanılarak, siber saldırı senaryoları simüle edilmiştir ve bu saldırılar, Wazuh SIEM sistemiyle izlenip analiz edilmiştir. T-Pot, çeşitli balküğü uygulamalarını bir araya getirerek merkezi bir yönetim konsolunda izleme olanağı sunan entegre bir çözüm olarak tanımlanmıştır. T-Pot, sanal bir makine üzerine yüklenmiş ve gerekli bağımlılıklar ile yapılandırma işlemleri tamamlanmıştır. Balküğü sisteminin güvenlik etkinliklerinin izlenmesi amacıyla, T-Pot üzerine Wazuh ajanı kurulumu yapılmıştır. Bu ajan, balküğülerinde bulunan tüm aktiviteleri toplayarak merkezi Wazuh sunucusuna iletmiştir. Wazuh, bu logları merkezi sunucusunda çözümleyerek anlamlı hale getirmiş ve saldırıların detaylı analizi için özel olarak oluşturulmuş kurallar kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, MITRE ATT&CK matrisine göre kategorize edilerek hangi saldırı tekniklerinin ve taktiklerinin kullanıldığı belirlenmiş ve raporlanmıştır.

Saldırı senaryolarının kapsamı genişletilmek amacıyla, iki adet son kullanıcı Linux makinesi üzerinde izleme ve saldırı simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu makineler, kullanıcı aktivitelerini ve simüle edilen saldırıları izlemek üzere yapılandırılmıştır. Çalışmada, her iki makineye de Wazuh ajan kurulumu yapılmış ve ajan, makinelerdeki tüm etkinlikleri ve güvenlik olaylarını merkezi Wazuh sunucusuna iletmiştir. Kullanıcı aktiviteleri, dosya erişimleri, komut çalıştırmaları ve ağ bağlantıları gibi kritik işlemler sürekli olarak izlenmiş ve kaydedilmiştir.

Atomic Red Team araçları kullanılarak, MITRE ATT&CK matrisine dayanan çeşitli saldırı teknikleri simüle edilmiştir. Bu simülasyonlar, gerçek saldırı senaryolarını taklit ederek güvenlik önlemlerinin etkinliğini test etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sırasında üretilen loglar, Wazuh ajanı tarafından toplanmış ve merkezi Wazuh sunucusuna iletilmiştir. Bu loglar, Wazuh sunucusunda çözümlenmiş ve anlamlı hale getirilmiştir. Çözümlenen loglar, MITRE ATT&CK matrisine göre haritalanarak kullanılan saldırı teknikleri ve bu tekniklerin nasıl tespit edildiği belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, detaylı raporlar halinde güvenlik ekiplerine iletilmiş ve siber güvenlik duruşu değerlendirilmiştir. Bu süreç, balküpu ve son kullanıcı makineleri üzerinde gerçekleştirilen saldırı simülasyonlarının etkin bir şekilde izlenmesini ve analiz edilmesini sağlamış, böylece kuruluşun savunma yetenekleri güçlendirilmiş ve siber güvenlik stratejilerinin etkinliği artırılmıştır.

5.2. Senaryo Belirleme ve Hedefleme

MITRE ATT&CK, siber saldırganların ağlar üzerinde hedeflerine ulaşmak için kullandıkları taktik ve tekniklerin ayrıntılı bir şekilde tanımlandığı kapsamlı bir bilgi tabanı olarak kullanılmaktadır. Bu matris, her bir taktiğin ve bu taktiğe yönelik saldırı tekniklerinin sistematik bir şekilde sınıflandırılması sağlanmakta, böylece güvenlik uzmanlarının, belirli bir saldırı türünün nasıl gerçekleştirildiği ve bu saldırının nasıl tespit edilebileceği anlaşılabilir.

Balküpleri, saldırganların ağlara sızma girişimlerinin simüle edilmesi için kullanılan özel sistemler olarak tanımlanmaktadır. Balküpleri, saldırganların cezbedilmesi ve onların saldırı yöntemlerinin gözlemlenmesi için kasıtlı olarak savunmasız bırakılmış sistemler olarak yerleştirilmektedir. Bu tür sistemler, saldırganların faaliyetlerinin izlenmesi ve analiz edilmesi için önemli bir araç olarak kullanılmaktadır.

Balküpu üzerinden alınan saldırgan aktiviteleri, MITRE ATT&CK matrisine dayalı olarak sınıflandırılabilir. Örneğin, bir saldırgan, bir balküpüne erişmeye çalışırken belirli araçlar veya teknikler kullanabilir. Bu teknikler, MITRE ATT&CK matrisindeki belirli saldırı teknikleriyle eşleştirilebilir. Böylece, balküpu üzerindeki aktiviteler, kullanılan saldırı taktikleri ve teknikleri ile bağlantılı olarak izlenebilir ve analiz edilebilir.

Örneğin, bir saldırgan, “Initial Access” taktiği altında, bir balküpüne sızmaya çalışırken kimlik avı veya kamusal yüzeydeki uygulama zafiyetlerinin kullanılması gibi teknikler kullanabilir. Bu aktiviteler, MITRE ATT&CK matrisinde belirtilen teknikler ile ilişkilendirilerek daha derinlemesine analiz edilebilir. Balküpu üzerinden elde edilen bu tür veriler, güvenlik uzmanlarının saldırganların ağlara yönelik niyetlerini ve yeteneklerini anlamalarına yardımcı olmakta ve bu sayede savunma stratejilerinin güçlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak, balküpu üzerinden toplanan veriler, MITRE ATT&CK matrisine dayalı olarak sınıflandırıldığında, saldırıların tespiti ve analizi daha etkin hale getirilmektedir. Bu, saldırganların ağlara yönelik davranışlarının daha iyi anlaşılmasını sağlamak ve bunlara karşı savunma önlemlerinin geliştirilmesi için önemli bir kaynak sunmaktadır.

5.3. Saldırı Tekniklerinin Seçimi

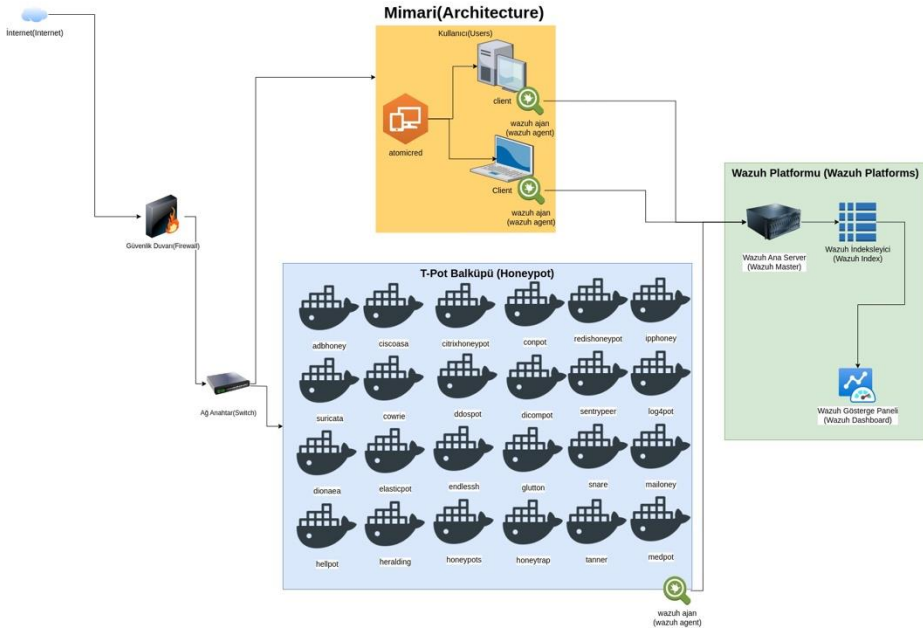
MITRE ATT&CK matrisi, siber güvenlikte saldırganların ağlar üzerindeki hedeflerine ulaşmak için başvurdukları taktik ve tekniklerin ayrıntılı bir şekilde tanımlandığı kapsamlı bir bilgi tabanı olarak kullanılmaktadır. Bu matris, saldırganların ağlara sızma girişimlerinin ve kullandıkları yöntemlerin anlaşılmasına yardımcı olacak önemli bir kaynak sağlamakta, aynı zamanda bu tür aktivitelerin belirli taktikler ve tekniklerle ilişkilendirilebilmesini sağlamaktadır. Örneğin, bir saldırganın bir balküpte erişim sağlamaya çalışırken kullandığı belirli araçlar veya taktikler, MITRE ATT&CK matrisinde tanımlanan saldırı teknikleriyle eşleştirilebilmektedir. Bu sayede, balküpü üzerinden yapılan saldırılar tespit edilip analiz edilerek, saldırganların ağlara yönelik niyetleri ve yetenekleri daha iyi anlaşılabilir.

Siber saldırı süreci, genellikle bir dizi aşamadan oluşmakta olup, her bir aşama, saldırganın hedeflerine ulaşmak için izlediği belirli bir stratejiyi temsil etmektedir. İlk Erişim aşamasında, hedef sisteme ilk kez sızılmakta, Çalıştırma aşamasında ise hedef sistem üzerinde zararlı yazılım veya komutlar çalıştırılmakta, Süreklilik aşamasında, saldırganlar sistemde kalıcı olabilmek için gerekli önlemleri almaktadır. Yetki Yükseltme aşaması, saldırganların daha yüksek erişim hakları elde etmek amacıyla gerçekleştirdiği faaliyetleri kapsamaktadır. Savunmadan Kaçınma aşamasında, güvenlik önlemleri atlatılmakta, Kimlik Bilgisi Erişimi aşamasında, saldırganlar sistemdeki kullanıcı bilgilerini ele geçirmeye hedeflemekte, Keşif aşamasında ise sistem ve ağ hakkında bilgi toplama faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Yanal Hareket aşamasında, ağda yayılma işlemleri başlatılmakta, Toplama aşamasında, hedef sistemdeki hassas veriler toplanmaktadır. Komanda ve Kontrol aşamasında, uzaktan erişim sağlanarak sistem kontrol altına alınmakta, Veri Sızdırma aşamasında ise elde edilen veriler dışarıya çıkarılmaktadır. Son olarak, Etkileme aşamasında, hedef sistem üzerinde zarar verici eylemler gerçekleştirilmektedir.

Bu taktikler, siber güvenlik uzmanlarının saldırıların aşamalarını daha iyi anlamalarını sağlamakta ve etkili savunma stratejilerinin geliştirilmesi kolaylaştırılmaktadır. MITRE ATT&CK matrisine dayalı olarak yapılan analizler, saldırganların hangi teknikleri kullandığının belirlenmesini sağlamakta ve bu tekniklerin nasıl tespit edilebileceği konusunda yol gösterici olmaktadır. Bu sayede, savunma ekipleri, ağlarını daha güvenli hale getirebilmek için her aşama için uygun tespit ve önleme yöntemlerinin belirlenmesine olanak tanımakta ve saldırılara karşı etkin bir savunma stratejisi geliştirilmesi sağlanmaktadır (Mitre Att&Ck 2023).

6. SALDIRI UYGULANMASI

Saldırı senaryolarının planlanması aşamasından sonra, bu bölümde belirlenen senaryoların gerçekleştirilmesi ve saldırıların uygulanması adımlarının ele alınacağı belirtilmiştir. Bu süreçte, Wazuh, T-pot Balküpü, Auditd ve Atomic Red Team gibi çeşitli araçların kullanılması ifade edilmiştir. Çalışma için oluşturulan simülasyon mimarisinin Şekil 1’de görüleceği belirtilmiştir.



Şekil 1. Çalışma için Oluşturulan Simülasyon Mimarisi

6.1. Wazuh ile İzleme ve Tespit

Wazuh, güvenlik izleme ve log yönetimi için kullanılan bir platform olarak tanıtılmaktadır. Bu bölümde, Wazuh'un nasıl kurulacağı ve yapılandırılacağı incelenmiş olacak, ardından saldırıların izlenmesi ve tespit edilmesi süreci detaylı olarak ele alınacaktır.

Wazuh, açık kaynaklı bir güvenlik bilgi ve olay yönetimi çözümünü olarak açıklanmaktadır. Wazuh, merkezi bir izleme ve yönetim platformu sağlayarak güvenlik olaylarının tespit edilmesine, analiz edilmesine ve yanıtlanmasına yardımcı olmaktadır. Wazuh'un temel bileşenlerinden biri olan kod çözücü ve kural yapısı, güvenlik olaylarını anlamak ve uygun aksiyonları almak için kritik öneme sahip olduğu belirtilmektedir. Kod çözücüler, Wazuh'un farklı formatlardaki günlük kayıtlarını anlayıp standart bir formata çevirmesini sağlamaktadır. Herhangi bir log kaynağından gelen veriler, önce kod çözücü tarafından işlenmektedir. Kod çözücüler, belirli bir format veya düzeni tanıyarak log verilerini yapılandırılmış bir forma dönüştürmektedir. Kod çözücüler, logun hangi log kaynağından geldiğini belirlemektedir. Log verileri, yapılandırılmış ve anlaşılabilir bir formata dönüştürülmektedir. Eşleşen kurallara göre alarmlar oluşturulmakta ve tanımlı aksiyonlar (örneğin, e-posta gönderme, komut çalıştırma) gerçekleştirilmektedir. Wazuh'un kod çözücü ve kural yapısı, log verilerini anlamlandırma ve güvenlik olaylarına uygun yanıt verme sürecinin temel bileşenleri olarak vurgulanmaktadır. Kod çözücüler log verilerini belirli bir formata dönüştürürken, kurallar bu verileri analiz etmekte ve güvenlik olaylarını yönetmektedir. Bu yapı, güvenlik operasyonlarının daha etkili ve verimli hale getirilmesini sağlamaktadır.

6.2. T-pot Balküpu ile Saldırgan Davranışlarının Kaydedilmesi

Ağ güvenliğinde bal noktaları kullanmanın temel amacı, saldırganların TTP'ler hakkında bilgi toplamak için onlarla etkileşime geçmek ve kandırılmak olarak belirtilmektedir. Bal noktaları, meşru hedefler gibi görünen ancak aslında izole edilmiş ve izlenen ortamlar olan tuzak sistemler olarak kasıtlı olarak konuşlandırılmaktadır. Güvenlik uzmanları, saldırganların bal noktalarıyla etkileşime girmeye ikna edilerek davranışlarının gözlemlenip analiz edilmesini sağlayabilmekte, saldırı yöntemlerinin anlaşılması ve genel ağ güvenliğinin artırılması için değerli istihbarat toplanabilmektedir. Bal noktaları, istenmeyen e-postalar, kimlik avı, kimlik hırsızlığı, hizmet reddi saldırıları ve hatta fidye yazılımı faaliyetleri gibi çeşitli siber suçların tespit edilmesine ve incelenmesine yardımcı olabilmektedir. Ek olarak, balküpleri, saldırgan davranışının tanımlanması, saldırı eğilimlerinin bulunması ve toplanan içgörülere dayanarak güvenlik önlemlerinin iyileştirilmesi için kullanılabilir (Amal ve Venkadesh 2023).

6.3. Auditd ile Sistem Çağrılarının İzlenmesi

Siber saldırı senaryolarının planlanması kapsamında, son kullanıcı Linux makinelerine auditd (Linux Audit Daemon) yüklenmiş ve bu uygulama ile özel auditd kuralları tanımlanmıştır. Auditd, Linux platformlarında çeşitli güvenlik olaylarını izlemek ve kaydetmek için kullanılan güçlü bir araç olarak açıklanmıştır. Bu çalışma, son kullanıcı makinelerinde kullanıcıların ve/veya dışarıdan erişim sağlayan saldırganların komut satırı üzerinden gerçekleştirdikleri işlemleri denetlemek amacıyla yapılmıştır.

İlk olarak, her iki linux makinesine auditd kurulumu yapılmıştır. Auditd kurulduktan sonra, kullanıcı ve saldırgan aktivitelerini izlemek için özel auditd kuralları tanımlanmıştır. Auditd'nin yapılandırılması tamamlandıktan sonra, sistemde gerçekleştirilen tüm komut satırı işlemleri kontrol edilmiş ve detaylı loglar oluşturulmuştur. Bu loglar, her komut çalıştırma işleminin zamanını, hangi kullanıcı tarafından gerçekleştirildiğini ve hangi komutların çalıştırıldığını içermektedir. Bu loglar, Wazuh ajanları aracılığıyla merkezi Wazuh sunucusuna iletilmektedir. Wazuh ajanı, Linux makinesinde sürekli çalışarak auditd tarafından oluşturulan logları toplamakta ve Wazuh sunucusuna göndermektedir. Wazuh sunucusunda, bu loglar çeşitli çözümleyici ve kurallar kullanılarak anlamlı hale getirilmektedir. Bu kod çözücü ile edinilen veriler, MITRE ATT&CK matrisi göre haritalanmaktadır. MITRE ATT&CK matrisi, siber saldırganların saldırı amaçlı kullandıkları teknik ve taktikleri içeren kapsamlı bir çerçeve olarak tanımlanmaktadır. Wazuh, bu verileri MITRE ATT&CK tekniklerine göre sınıflandırmakta ve hangi saldırı tekniklerinin kullanıldığını belirlemektedir. Sonuç olarak, toplanan ve çözümlenen loglar MITRE ATT&CK matrisine göre haritalandırılmakta ve raporlanmaktadır. Bu raporlar, hangi saldırı tekniklerinin kullanıldığını ve bu tekniklerin nasıl tespit edildiğini göstermektedir. Raporlar, güvenlik ekiplerine iletilerek güvenlik açıklarının belirlenmesi ve giderilmesi için kullanılmaktadır. Bu süreç, son kullanıcı makineleri üzerinde gerçekleştirilen saldırı simülasyonlarının etkin bir şekilde izlenmesini ve analiz edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, kuruluşların siber güvenlik durumu değerlendirilmekte ve iyileştirilmektedir.

Atomic Red Team, kuruluşların siber güvenlik seviyelerinin ölçülmesi, değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi amacıyla kullanılan bir açık kaynaklı saldırı simülasyon uygulaması olarak tanımlanmaktadır. Bu uygulama, MITRE ATT&CK matrisine dayanan çeşitli saldırı tekniklerinin ve taktiklerinin simüle edilmesine olanak tanımaktadır. Atomic Red Team, güvenlik ekiplerinin olası saldırılara karşı hazırlıklı olmalarını sağlarken, mevcut güvenlik kontrollerinin etkinliğinin de test edilmesini sağlamaktadır. Her bir atomik test, belirli bir saldırı tekniğini hedef almakta ve bu tekniklerin güvenlik kontrolleri üzerindeki etkisi değerlendirilmek üzere tasarlanmaktadır. Böylece, güvenlik açıkları tespit edilip giderilerek kuruluşun siber güvenlik durumu sürekli olarak iyileştirilebilmektedir.

Atomic Red Team'in kullanımı, kuruluşların tehdit avlama ve olay müdahale kapasitelerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır. Testlerin düzenli olarak uygulanması, güvenlik ekiplerine gerçek saldırı senaryoları üzerinde çalışma imkânı sağlamakta ve güvenlik önlemlerinin etkinliğinin ölçülmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, bu simülasyonlar sayesinde güvenlik açığı yönetimi süreçleri daha etkin hale getirilmekte ve personelin bilgi birikimi artırılmaktadır. Atomic Red Team'in sağladığı yapılandırılmış ve tekrarlanabilir testler, kuruluşların siber tehditlere karşı daha dirençli olmalarını sağlamakta ve güvenlik olgunluğunun artırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu bağlamda, Atomic Red Team, sürekli değişen tehdit ortamında kuruluşların proaktif bir güvenlik stratejisi geliştirmelerine ve uygulamalarına önemli bir destek sağlamakta bulunmaktadır.

7. SALDIRI SONUÇLARININ ANALİZİ

7.1. İzleme ve Analiz Sonuçları

Saldırıların tespit edilmesi ve analiz edilmesi sürecinden elde edilen veriler, izleme ve analiz sonuçları olarak adlandırılmaktadır. Bu veriler, saldırıların tespit edilmesi, incelenmesi ve analiz edilmesi için kullanılmaktadır. Bu bölümde, izleme ve analiz sonuçlarının nasıl değerlendirileceği ve kullanılacağı üzerinde durulmaktadır.

Tablo 3. Ttp Sayıları

TTP Kodları	Hit Sayıları
T1078 (Geçerli Hesaplar)	86.794
T1133 (Dış Uzaktan Servisler)	75.525
T1082 (Sistem Bilgisi Keşfi)	56.182
T1119 (Otomatik Veri Toplama)	56.182
T1030 (Veri Aktarım Boyut Sınırlamaları)	50.348
T1043 (Yaygın Olarak Kullanılan Portlar)	50.348
T1071 (Uygulama Katmanı Protokolü)	44.175
T1018 (Uzaktan Sistem Keşfi)	35.442
T1036 (Gizlenme)	28,520

T1041 (Komut ve Kontrol Kanalı Üzerinden Veri Sızıntısı)	28.520
T1053 (Planlanmış Görev)	28.520
T1102 (Web Servisi)	28.520
T1485 (Veri Yok Etme)	28.520
T1003 (İşletim Sistemi Kimlik Bilgisi Toplama)	27.662
T1048 (Alternatif Protokol Üzerinden Veri Sızıntısı)	6.615
T1110.001 (Kaba Kuvvet)	212
T1021.004 (Uzaktan Servisler: SSH)	116
T1020 (Otomatik Veri Sızıntısı)	99
T1529 (İşletim Sistemi Kimlik Bilgisi Toplama)	97
T1040 (Ağ Dinleme)	24
T1107 (Dosya ve Dizin İzinlerini Değiştirme)	24
T1565.001 (Depolanan Verilerin Manipülasyonu)	23
T1027 (Karmaşıklık)	21
T1110 (Kaba Kuvvet)	20
T1059 (Komut ve Betik Yorumlayıcıları)	18
T1526 (Ağ Servisinde Hizmet Reddi)	6

T-pot üzerinde toplanan saldırılar, Wazuh platformu aracılığıyla MITRE ATT&CK matrisi çerçevesindeki TTP'ler ile detaylı bir şekilde ilişkilendirilmiştir. Bu süreçte, saldırganların kullandığı belirli tekniklerin toplam hit sayıları analiz edilerek, hangi TTP'lerin daha yaygın olarak tercih edildiği ortaya konulmuştur. Bu analizler, güvenlik ekiplerinin saldırıların doğasını daha iyi anlamalarına ve hangi alanlarda daha fazla güvenlik önlemi alınması gerektiğini belirlemelerine yardımcı olmaktadır. Her bir TTP'nin hit sayısının izlenmesi, saldırıların zaman içindeki trendlerini değerlendirmek ve potansiyel zayıflıkları tespit etmek açısından büyük önem taşımaktadır. Böylece, toplanan veriler üzerinden stratejik kararlar alınmakta, güvenlik politikaları güncellenmekte ve sistemlerin dayanıklılığı artırılmaktadır.

Tablo 3'de belirtilen MITRE ATT&CK matrisi TTP'lerinin Balküpe test çalışmasında elde edilen toplam 184.750 olay analiz edilmiştir. Bu olayların her biri, siber saldırıların farklı yönlerini yansıtmakta olup, bazen birden fazla MITRE ATT&CK TTP'si (Taktik, Teknik ve Prosedür) ile eşleştirilmiştir. Bu durum, saldırganların karmaşık ve çok katmanlı yöntemler kullanarak sistemlere sızma ve veri elde etme stratejilerinin bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Örneğin, T1078 (Geçerli Kullanıcı Hesapları) 86.794 kez gibi teknikler, saldırganların yetkili hesapları kullanarak daha fazla olayın tetiklenmesine neden olmakta iken, T1119 (Otomatik Veri Toplama) 56.182 kez teknikleri de veri toplama süreçlerinde sıklıkla bir arada kullanılmaktadır. Bu çoklu eşleşmeler, saldırıların karmaşıklığını ve tespit edilen olayların birbirleriyle olan ilişkilerini anlamada kritik bir rol oynamaktadır.

Analiz sonuçları, her bir TTP'nin siber güvenlik tehditleri ile olan bağlantısını ve hangi tekniklerin daha yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir. Örneğin, T1133 (Dış Uzaktan Servisler) 75.525 kez ve T1043 (Yaygın Olarak Kullanılan Portlar) 50.348 kez gibi teknikler, saldırganların sistemlere erişim sağlamak için yaygın olarak

kullandıkları yolları temsil etmektedir. Bu bağlamda, bir olayın birden fazla TTP ile eşleşmesi, sistemin çeşitli zafiyetlerine yönelik saldırıların gerçekleştirildiğini göstermekte ve siber güvenlik alanında alınacak önlemlerin kapsamını genişletmektedir.

Tablo 4. Ttp Sayıları

Ttp Grubu	Hit Sayısı
T1030 (Veri Aktarım Boyut Sınırlandırma)	50.348
T1043 (Yaygın Olarak Kullanılan Portlar)	
T1078 (Geçerli Hesaplar)	
T1133 (Dış Uzaktan Servisler)	
T1036 (Gizlenme)	
T1041 (Komut ve Kontrol Kanalı Üzerinden Veri Sızıntısı)	
T1053 (Planlanmış Görev)	
T1082 (Sistem Bilgisi Keşfi)	
T1102 (Web Servisi)	
T1119 (Otomatik Veri Toplama)	
T1485 (Veri Yok Etme)	
T1003 (İşletim Sistemi Kimlik Bilgisi Toplama)	27.662
T1078 (Geçerli Hesaplar)	
T1082 (Sistem Bilgisi Keşfi)	
T1119 (Otomatik Veri Toplama)	

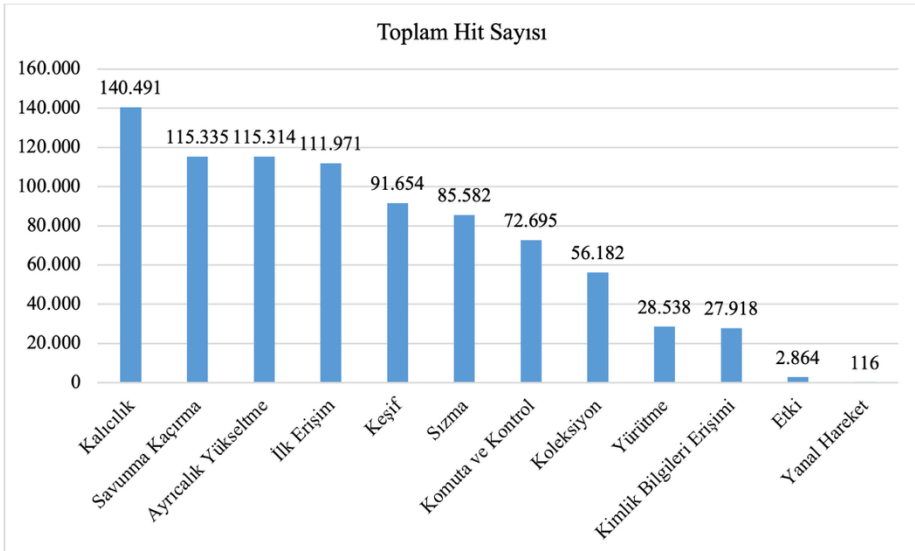
Tablo 4’te verilen MITRE TTP değerleri, Wazuh analizinde etiketlenmiş saldırı tekniklerinin etkinliği ve yaygınlığı gösterilmektedir. İlk grupta, T1030 (Veri Aktarım Boyut Sınırlamaları), T1043 (Yaygın Olarak Kullanılan Portlar), T1078 (Geçerli Kullanıcı Hesapları) ve T1133 (Dış Uzaktan Servisler) toplam 50.348 hit almıştır. Bu durum, sistemlere erişim sağlamak için saldırganların kimlik doğrulama ve ağ yönetim protokollerini hedef alma eğiliminde olduklarını ortaya koymaktadır. Bu tekniklerin yüksek hit sayısı, güvenlik ekiplerinin kimlik bilgilerini koruma ve ağ yönetim stratejilerini güçlendirme gerekliliğini vurgulamaktadır.

İkinci grupta ise, T1036 (Gizlenme), T1041 (Komut ve Kontrol Kanalı Üzerinden Veri Sızıntısı), T1053 (Zamanlayıcı Görevler), T1082 (Sistem Bilgisi Keşfi), T1102 (Web Servisi) ve T1119 (Otomatik Veri Toplama) toplam 28.520 hit almıştır. Bu gruptaki teknikler, daha karmaşık ve çok katmanlı saldırı stratejilerinin benimsendiğini göstermektedir. Özellikle, sistem bilgilerini toplama ve kötü niyetli yazılım yerleştirme gibi faaliyetler, siber tehditlerin daha karmaşık hale geldiğini ortaya koymaktadır.

Son olarak, T1003 (İşletim Sistemi Kimlik Bilgisi Toplama), T1078 (Geçerli Kullanıcı Hesapları), T1082 (Sistem Bilgisi Keşfi) ve T1119 (Otomatik Veri Toplama) teknikleri toplam 27.662 hit almıştır. Bu veri, kimlik bilgileri çalma ve kötü amaçlı yazılımlar kullanarak sistemlere sızma girişimlerinin odak noktası haline geldiğini göstermektedir. Genel olarak, bu analiz, saldırıların hangi alanlarda yoğunlaştığını ve hangi tekniklerin daha fazla dikkat ve önlem gerektirdiğini belirlemek açısından değerli bir kaynak sunmaktadır. Güvenlik ekipleri, bu verileri kullanarak savunma stratejilerini güncelleyebilir ve önceliklendirebilir.

Savunma stratejileri geliştirirken, bu tekniklerin birbirleriyle olan ilişkileri göz önünde bulundurularak, saldırı tespit ve önleme süreçlerinde daha etkili olunması sağlanmaktadır. Genel olarak, bu analiz saldırganların daha sık tercih ettiği teknikleri ve saldırı vektörlerini ortaya koyarak, savunma stratejilerinin hangi alanlara odaklanması gerektiğine dair önemli ipuçları sunmaktadır. Savunma stratejilerinin güçlendirilmesi ve olası saldırıların önlenmesi için bir dizi çözüm önerisi ve aksiyonlar bulunmaktadır. Öncelikle, T1078 (Geçerli Kullanıcı Hesapları) ve T1082 (Sistem Bilgisi Keşfi) tekniklerinin sıkça kullanıldığı göz önünde bulundurularak, güçlü kimlik doğrulama yöntemlerinin uygulanması ve çok faktörlü kimlik doğrulamanın (MFA) zorunlu hale getirilmesi kritik bir önem taşımaktadır. Kullanıcı hesaplarının düzenli olarak denetlenmesi ve şüpheli etkinliklerin izlenmesi de gereklidir.

Ayrıca, T1030 (Veri Aktarım Boyut Sınırlamaları) ve T1041 (Komut ve Kontrol Kanalı Üzerinden Veri Sızıntısı) tekniklerine karşı, veri transferlerinin izlenmesi ve anormal büyük veri hareketlerinin tespit edilmesi için gelişmiş veri kaybı önleme (DLP) çözümleri kullanılmalıdır. Ağ trafiğinin sıkça kullanılan portlar, T1043 (Yaygın Olarak Kullanılan Portlar) üzerinden izlenmesi ve analiz edilmesi, potansiyel gizlenmiş saldırıların tespit edilmesine yardımcı olabilmektedir. T1036 (Gizlenme) ve diğer gizlenme tekniklerine karşı, davranış tabanlı izleme ve analiz araçlarının kullanılması, meşru süreçlerin taklit edilmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, T1133 (Dış Uzaktan Servisler) ve T1018 (Uzaktan Sistem Keşfi) tekniklerine karşı, dış ağ bağlantılarının sıkı denetimi ve sadece gerekli erişimlerin izin verilmesi, ağ üzerindeki keşif ve erişim saldırılarını azaltmaktadır. Düzenli siber güvenlik eğitimleri ve farkındalık programları ile çalışanların bu tür saldırı tekniklerine karşı bilinçlendirilmesi, insan hatasından kaynaklanan zafiyetlerin azalmasına katkı sağlamaktadır. Bu çözüm önerileri ve aksiyonlar, genel savunma hattının güçlendirilmesine ve olası saldırıların başarı şansının önemli ölçüde düşürülmesine yardımcı olmaktadır.



Şekil 2. Mitre Taktik Sayıları

Araştırma bulguları, sistemlerde kalıcılığın sağlanması, güvenlik önlemlerinin atlatılması ve yetki yükseltme gibi saldırıların en yaygın olduğu göstermektedir. Şekil 2'de detaylandırıldığı üzere, T-Pot üzerinden tespit edilen 184.750 adet olayın MITRE taktiklere eşleştirilmesi sonucunda bir tablo oluşturulmuştur. Bir olay, birden fazla MITRE taktik ile eşleştirilebilmektedir. Kalıcılık kategorisinde, 140.491 saldırı sayısı ile en yüksek değer elde edilmiştir, bu da saldırganların sistemde kalıcı olma çabalarının belirgin olduğu gösterilmektedir. Ayrıcalık Yükseltme ve Savunma Kaçırma, her biri 115.335 saldırı ile dikkat çekmekte ve bu, saldırganların daha fazla yetki elde etme ve güvenlik önlemlerini atlatma çabalarının önemli olduğu gösterilmektedir. İlk Erişim 11.197 ve Sızma 8.558 olayları da oldukça yüksek olup, saldırganların sisteme giriş yapma ve daha fazla yayılma konusundaki başarılarının yansıması olarak görülmektedir. Keşif 91.654 ve Koleksiyon 56.182 saldırıları, saldırganların sistem hakkında bilgi toplama ve veri çalma çabalarının önemli bir kısmını oluşturduğu gösterilmektedir. Kimlik Bilgileri Erişimi 27.918 ve Komuta ve Kontrol 72.695 saldırıları, kimlik bilgilerini elde etme ve sistemle sürekli iletişim kurma çabalarının yaygın olduğu gösterilmektedir. Etki 28.640 ve Yürütme 28.640 saldırıları, saldırganların sistem üzerinde zararlı işlemler gerçekleştirme çabalarını göstermekteyken, Yanal Hareket 116 saldırıları en düşük kategoriye oluşturmuş ve saldırganların sistem içinde yatay hareketlerinin nispeten daha az olduğu ortaya konmuştur. Bu veriler, savunma stratejilerinin kalıcılığın engellenmesi, güvenlik önlemlerinin güçlendirilmesi ve Ayrıcalık Yükseltme girişimlerinin tespit edilmesi konularına odaklanması gerektiğini göstermektedir.

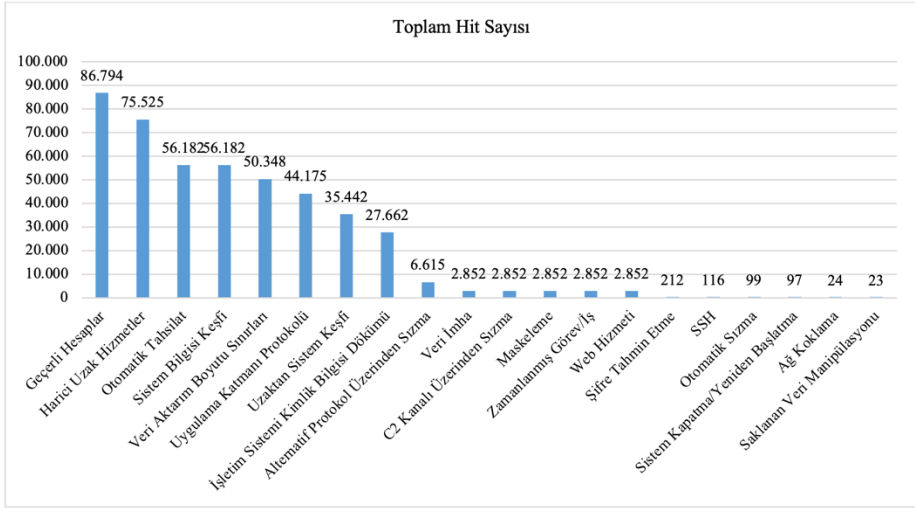
Saldırganlar, bir sisteme ilk erişimi sağladıktan sonra kalıcılığı sürdürmek için çeşitli yöntemler kullanmaktadır. Benzer şekilde, Ayrıcalık Yükseltme ve Savunma Kaçırma teknikleri de sıklıkla birlikte kullanılabilir; saldırganlar, ayrıcalıklarını yükselterek daha fazla yetki elde eder ve savunma mekanizmalarını atlatmak için çeşitli stratejiler geliştirmektedirler.

İlk Erişim ve Ayrıcalık Yükseltme saldırılarının önlenmesi için, güçlü kimlik doğrulama yöntemleri ve çok faktörlü kimlik doğrulama (MFA) kullanılmasının önemi vurgulanmaktadır. Kullanıcı hesaplarının düzenli olarak denetlenmesi ve şüpheli etkinliklerin izlenmesi de saldırıların önlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Kalıcılık ve Savunma Kaçırma tekniklerine karşı, davranış tabanlı izleme ve analiz araçlarının kullanılması gerekmektedir. Bu araçlar, anormal etkinliklerin tespit edilmesine ve hızlı müdahale edilmesine olanak tanımakta, böylece saldırganların sistemde kalıcı hale gelmesi zorlaştırılmaktadır.

Ağ segmentasyonu ve mikro-segmentasyon stratejilerinin, yanal hareketi sınırlayarak saldırganların ağ içinde yayılmasını zorlaştırabileceği belirtilmektedir. Ayrıca, keşif aşamasında anormal ağ trafiğini tespit edebilecek gelişmiş ağ izleme araçlarının kullanılması önem arz etmektedir. Koleksiyon ve Komuta ve Kontrol tekniklerine karşı, gelişmiş veri kaybı önleme (DLP) çözümleri ve ağ trafiği analiz araçları kullanılarak, verilerin dışarıya sızdırılmasının engellenebileceği ifade edilmektedir. Anormal veri transferlerinin izlenmesi ve engellenmesi gereklidir.

Çalışanların siber güvenlik farkındalığını artırmak için düzenli eğitim programlarının düzenlenmesi gerektiği önerilmektedir. Bu programlar, insan hatasından kaynaklanan zafiyetlerin azaltılmasına yönelik olmalı ve çalışanlar, kimlik avı saldırıları ve sosyal

mühendislik gibi tehditler konusunda bilinçlendirilmelidir. Bu aksiyonlar ve önlemler, saldırganların başarılı olma şansını azaltarak genel savunma hattının güçlenmesine katkı sağlayacak ve kuruluşun siber güvenlik duruşunun önemli ölçüde iyileştirilmesini sağlayacaktır.



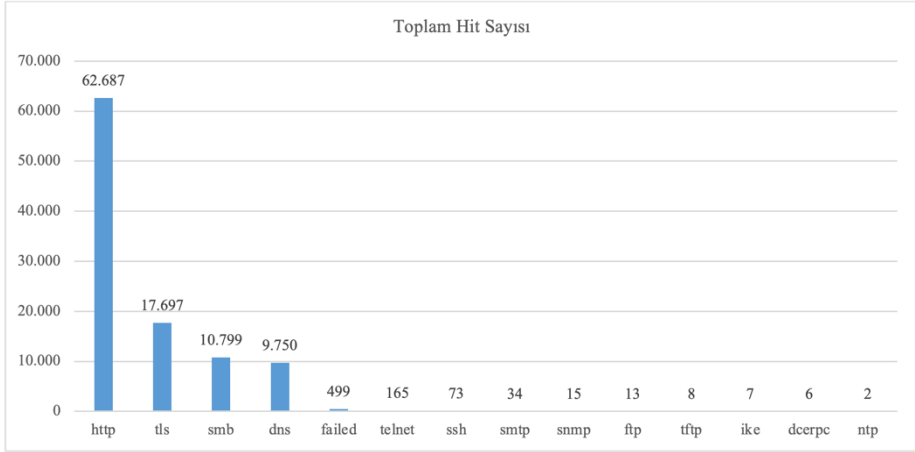
Şekil 3. Ttp Toplam Rakamları

Şekil 3'deki araştırma bulgularına göre, çeşitli MITRE ATT&CK TTP'lerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Geçerli Hesaplar (T1078), 86.794 saldırı ile en yüksek değeri almış olup, bu, saldırganların mevcut hesapları kullanarak sistemlere erişim sağlama çabalarının yoğun olduğunu göstermektedir. Sistem Bilgisi Keşfi (T1082) ve Otomatik Veri Toplama (T1119) teknikleri de her biri 56.182 saldırı ile oldukça yüksek bir oranda kullanılmıştır. Bu da, saldırganların sistem hakkında bilgi toplama ve veri toplama çabalarının yaygın olduğunu göstermektedir.

Veri Aktarım Boyutu Sınırları (T1030), 50.348 saldırı ile saldırganların büyük veri setlerini gizlice aktarma çabalarının yoğun olduğunu göstermektedir. Harici Uzak Hizmetler (T1133), 75.525 saldırı ile saldırganların yaygın kullanılan ağ noktalarını hedef alma eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. Zamanlanmış Görev/İş (T1053) ve Komut ve Kontrol Kanalı Üzerinden Sızma (T1041), her biri 28.520 saldırı ile saldırganların kalıcılık sağlama ve komuta ve kontrol kanalları üzerinden veri sızdırma çabalarını vurgulamaktadır. Maskeleyme (T1036) ve Uygulama Katmanlı Protokolü (T1071), 28.520 ve 44.175 saldırı ile saldırganların varlıklarını gizleme ve veri iletişimini sürdürme stratejilerini göstermektedir.

SSH (Secure Shell) (T1071) ve Şifre Tahmin Etme (T1110), her biri 116 ve 212 saldırı ile, daha az yaygın olmakla birlikte önemli tehditler olarak tespit edilmiştir. Web Hizmetleri (T1102) ve İşletim Sistemi Kimlik Bilgisi Dökümü (T1003), sırasıyla 28.520 ve 27.662 saldırı ile saldırganların web tabanlı uygulamaları ve işletim sistemi kimlik bilgilerini hedef alma eğiliminde olduklarını göstermektedir.

Bu veriler, güvenlik stratejilerinin, geçerli hesapların korunması, sistem bilgisi keşfi ve otomatik veri tahsilatı gibi yüksek riskli alanlara odaklanması gerektiğini ortaya koymaktadır.



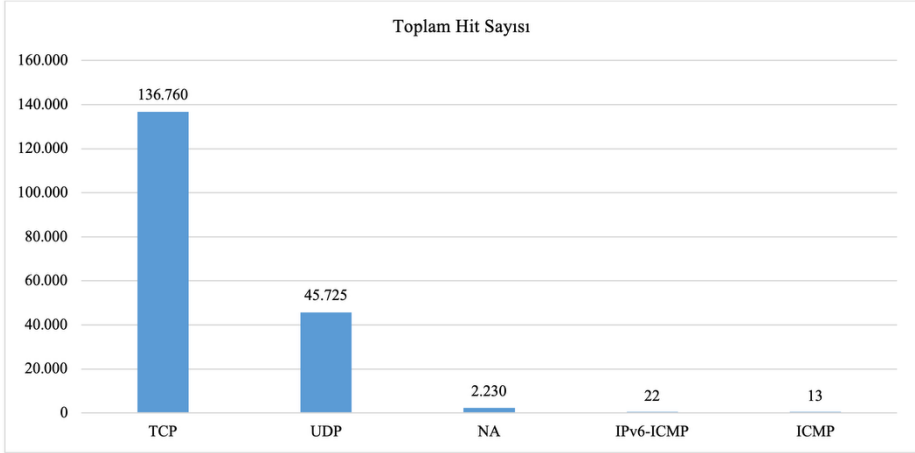
Şekil 4. Uygulama Protokol Sayıları

Alınan saldırıların analizi sonucunda elde edilen verilere göre, saldırıların uygulama protokollerine göre dağılımı Şekil 4’de gösterilmiştir. En fazla saldırıya maruz kalan protokol, 62.687 işlemle HTTP (Hypertext Transfer Protocol) olmuştur. Bu durum, HTTP protokolünün yaygın kullanımından ve güvenlik açıklarının sıkça hedef alınmasından kaynaklanmıştır. İkinci sırada ise TLS (Transport Layer Security) protokolü yer almakta olup, toplamda 17.697 işlem kaydedilmiştir. TLS, güvenli iletişim sağlamak için yaygın olarak kullanıldığından, saldırganlar bu protokolü hedef alarak güvenlik açıklarını sömürmeye çalışmıştır.

Üçüncü sırada SMB (Server Message Block) protokolü yer almakta olup, toplamda 10.799 işlem kaydedilmiştir. SMB, özellikle dosya paylaşımı ve ağ iletişimi için kullanılan bir protokol olduğundan, saldırganların ilgisini çekmiştir. DNS (Domain Name System) protokolü üzerinden 9.750 işlem gerçekleştirilmiştir. DNS saldırıları, internet trafiğinin yönlendirilmesinde kritik bir rol oynayan DNS sunucularını hedef alarak, kullanıcıların yanlış yönlendirilmesi veya servis kesintilerine yol açılmasını amaçlamaktadır.

Analiz sırasında belirlenen 499 işlem, hangi protokol kullanılarak yapıldığı tespit edilemediği için “failed” olarak sınıflandırılmıştır. Bu işlemler, saldırıların karmaşıklığını ve bazı durumlarda kullanılan araçların tespit edilememesini göstermektedir. Diğer protokoller ise daha az saldırıya maruz kalmıştır: Telnet üzerinden 165, SSH üzerinden 73, SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) üzerinden 34, SNMP (Simple Network Management Protocol) üzerinden 15, FTP (File Transfer Protocol) üzerinden 13, TFTP (Trivial File Transfer Protocol) üzerinden 8, IKE (Internet Key Exchange) üzerinden 7, DCERPC (Distributed Computing Environment Remote Procedure Call) üzerinden 6 ve NTP (Network Time Protocol) üzerinden 2 işlem kaydedilmiştir.

Bu protokoller, nispeten daha az kullanılmakta veya daha iyi korunmuş olduklarından, saldırganlar tarafından daha az hedef alınmıştır. Analiz, saldırganların genellikle yaygın ve kritik protokolleri hedef aldığını ortaya koymuştur. Özellikle HTTP ve TLS protokollerine yönelik saldırıların yüksek sayıda olması, bu protokollerin güvenliğinin sağlanmasının önemini vurgulamaktadır. Daha az saldırıya maruz kalan protokoller bile dikkate alınmalı ve güvenlik önlemleri sürekli olarak güncellenmelidir.



Şekil 5. Protokol Özeti

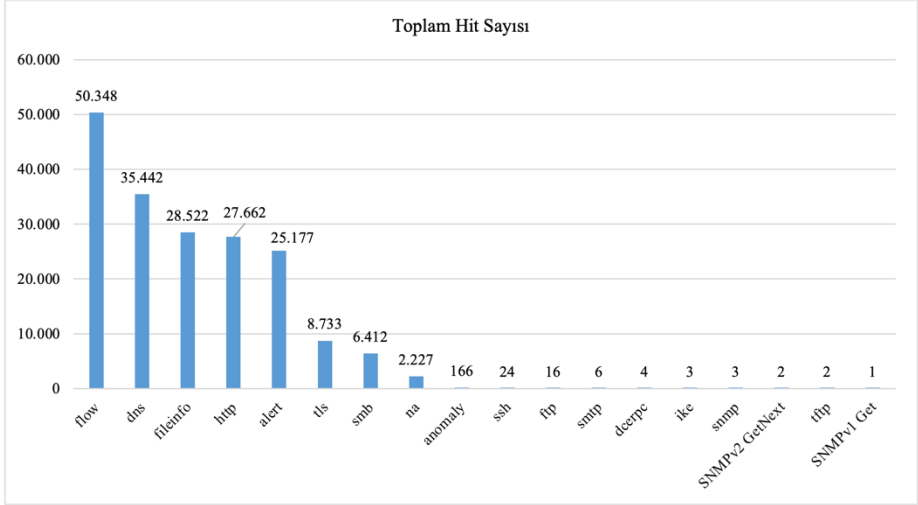
Şekil 5’de detaylandırıldığı üzere, ağ protokollerine göre dağılımın belirgin farklılıklar gösterdiği ortaya konulmuştur. T-Pot üzerinden toplanan ve analiz edilen 184.750 olayın protokol bazında kırılımının tespit edilmiş olduğu görülmüştür. Bu analiz, TCP (Transmission Control Protocol) ve UDP (User Datagram Protocol) protokollerinin saldırıların büyük bir kısmını oluşturduğunu göstermektedir. En fazla saldırıya maruz kalan protokol TCP olup, toplamda 136.760 işlem kaydedilmiştir. TCP, internetin temel iletişim protokollerinden biri olup, birçok uygulamanın veri iletimi için kullandığı bir protokol olduğundan, saldırganlar tarafından sıklıkla hedef alınmaktadır. TCP üzerinden gerçekleştirilen saldırıların, genellikle hizmet engelleme DoS (Denial of Service) saldırıları, oturum kaçırma veya kötü amaçlı yazılım yayma gibi amaçlarla yapılmış olduğu görülmüştür.

İkinci sırada, toplamda 45.725 işlemle UDP protokolü yer almaktadır. UDP, TCP’ye göre daha az güvenli kabul edilmekle birlikte, hızlı veri iletimi sağladığı için birçok uygulama tarafından tercih edilmektedir. UDP üzerinden gerçekleştirilen saldırıların, genellikle DNS (Domain Name System) yansıma (reflection) saldırıları, DDoS (Distributed Denial of Service) saldırıları veya ağ hizmetlerinin zayıflıklarını hedef alan diğer saldırılar olabileceği görülmüştür.

Daha az sayıda saldırıya maruz kalan protokoller arasında IPv6-ICMP (Internet Control Message Protocol) ve ICMP bulunmaktadır. IPv6-ICMP protokolü üzerinden 22 işlem, ICMP protokolü üzerinden ise 13 işlem kaydedilmiştir. ICMP protokolleri, genellikle ağ teşhis ve hata mesajları için kullanılmaktadır. Bu nedenle, saldırganlar tarafından diğer protokoller kadar sık hedef alınmamaktadır. Ancak, ICMP protokolleri üzerinden

yapılan saldırıların, ağ altyapısına zarar vermek veya ağ haritalaması (network mapping) gibi amaçlarla kullanılabileceği görülmüştür.

Bu analiz, saldırganların genellikle yaygın ve kritik iletişim protokollerini hedef aldığını göstermektedir. TCP ve UDP protokollerine yönelik saldırıların sayısının yüksek olması, bu protokollerin güvenliğinin sağlanmasının ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır. Daha az saldırıya maruz kalan ICMP ve IPv6-ICMP protokollerinin bile dikkate alınması ve bu protokoller üzerinden yapılabilecek olası saldırılara karşı önlemler alınması gerektiği sonucuna varılmaktadır.



Şekil 6. Olay Türü Bazında

Şekil 6'da alınan saldırıların çeşitli olay türleri bazında incelenmiş olduğu görülmüştür. T-Pot sistemi üzerinden toplanan 184.750 olayın analizi ve etiketlenmesi sonucunda çeşitli event türleri tespit edilmiştir. En yüksek hit sayısına sahip olan HTTP olayları, 27.662 kez kaydedilmiş olup, bu da web tabanlı saldırıların ve etkileşimlerin yaygınlığını göstermektedir. DNS olayları ise 35.442 kez kaydedilmiş olup, ağ tabanlı iletişimin önemli rolünü vurgulamaktadır.

Bunun yanı sıra, dosya bilgilerine dair olaylar 28.522 kez rapor edilmiş olmuştur, bu da saldırganların dosya manipülasyonu ve bilgi toplama faaliyetlerine odaklanmış olduklarını göstermektedir. TLS ve alert olayları, sırasıyla 8.733 ve 25.177 hit alarak, güvenlik tehditlerinin ve şifreli iletişimin izlenmesinin önemini ortaya koymuştur. Bu olay türlerinin analizi, saldırganların hangi alanlarda daha yoğun faaliyet gösterdiğini ve güvenlik stratejilerinin hangi olay türlerine daha fazla odaklanması gerektiğini ortaya koymuştur.

Ayrıca, akış verileri (flow) 50.348 hit ile dikkat çekmiş olup, bu da ağ trafiğinin analizinin ve yönetiminin kritik bir unsur olduğunu göstermektedir. SMB olayları 6.412 kez kaydedilmişken, anomali durumları ise yalnızca 166 defa tespit edilmiştir, bu da anormal durumların nadir olduğunu göstermektedir. Diğer olay türleri, örneğin

IKE, SNMP ve SMTP olayları, toplamda daha düşük hit sayıları ile kaydedilmiş olmuştur, bu da belirli protokollerin kullanımının sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu bulgular, siber güvenlik alanında proaktif önlemler almak ve saldırıların doğasını daha iyi anlamak için değerli bilgiler sunmuş olmaktadır. Saldırıların çeşitli protokoller ve hedefler üzerinde odaklandığı gösterilmiştir. Özellikle HTTP ve DNS gibi yaygın olarak kullanılan servislerin saldırıya maruz kalmış olmaları dikkat çekicidir. Dosya bilgisi ve TLS ile ilgili olaylar da muhtemelen sistemlere erişim veya hassas verilere erişim girişimlerini yansıtmaktadır. Uyarılar ise genellikle potansiyel tehditler veya ihlaller konusunda uyarı veren sistemler tarafından oluşturulmuş olup dikkatle incelenmelidir.

Ancak, çok düşük sayıda gerçekleşen anormallikler ve diğer nadir olaylar, genel olarak düşük risk taşıya da göz ardı edilmemelidir; çünkü bunlar da potansiyel olarak yeni ve gelişen tehditlerin göstergesi olabilir.

HTTP ve DNS saldırılarına karşı daha güçlü koruma önlemleri uygulanmış olmalıdır; bu, Web Uygulama Güvenlik Duvarları (WAF) ve DNS güvenlik çözümleriyle desteklenmiş olmalıdır. Dosya bilgisi ve TLS erişimlerinde güvenlik kontrolleri sıkılaştırılmalı, hassas verilere erişim için katı kimlik doğrulama ve yetkilendirme politikaları benimsenmiş olmalıdır. Uyarılar derhal incelenmiş olmalı ve etkili tepki planları oluşturulmuş olmalıdır. Ağ akışı ve SMB protokolü üzerindeki güvenlik zafiyetleri azaltılmalı, yeni veya gelişen tehditler için tehdit algılama sistemleriyle sürekli izleme sağlanmalıdır. Personel güvenlik farkındalığı eğitimleri almalı ve sosyal mühendislik saldırılarına karşı bilinçlendirilmiş olmalıdır.

Güvenlik önlemleri sürekli olarak gözden geçirilmiş ve iyileştirilmiş olmalı, yeni tehditlere karşı proaktif önlemler alınmış olmalıdır.

8. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın temel amacı, Linux platformunda MITRE ATT&CK matrisi çerçevesinde saldırıların nasıl etkin bir şekilde planlanıp uygulanabileceği gösterilmiş olmuştur. MITRE ATT&CK matrisi, saldırganların kullandığı Taktikler, Teknikler ve Prosedürler (TTP'ler) kapsamlı bir şekilde belgelenmiş ve savunma mekanizmalarını güçlendirmek isteyen kuruluşlara rehberlik edilmiştir. T-Pot Balküğü, Wazuh, auditd ve Atomic Red Team gibi araçlar kullanılarak gerçekleştirilen bu saldırılar, MITRE ATT&CK matrisindeki farklı taktikler üzerinden değerlendirilmiş olmuştur.

Tespit edilen saldırı sayıları ve bu taktiklerin sıklığı, sistemlerin hangi alanlarda daha fazla savunmasız olduğu açıkça ortaya konmuş olmuştur. Balküğü tabanlı bu yaklaşım, saldırıları gerçekleştiren aktörlerin taktik ve tekniklerini daha iyi anlamamıza olanak tanımış ve aynı zamanda savunma stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlanmış olmuştur. Bu yöntemlerin belirlenmesi ve raporlanması, ağ güvenliği uzmanlarına saldırıları önceden tespit etme ve etkili bir şekilde karşılama konusunda kritik bir rol oynamış olmuştur.

Bu çalışma, bal peteği kullanımının artan etkisinin ve bu teknolojinin siber güvenlik pratiğine nasıl entegre edilebileceğinin gösterildiği bir araştırma olmuştur. MITRE ATT&CK matrisi çerçevesinde yapılan bu çalışma, siber güvenlikteki yeni yaklaşımların ve savunma stratejilerinin geliştirilmesine ilham verilmesine katkı sağlamış olmuştur. Bu araştırma, siber güvenlik alanındaki bilgi ve uygulamaların derinleştirilmesine olanak tanırken, aynı zamanda savunma ekiplerinin saldırılara karşı nasıl daha etkin bir şekilde hazırlanmaları gerektiğine dair önemli bilgiler sunmuş olmuştur.

Saldırganların sistem içinde yatay geçiş yaparak diğer makineler üzerinde kontrol elde etme çabaları belirli ölçüde tespit edilmiş olmuştur. Kullanıcı kimlik bilgilerine erişim denemelerinin yüksek sayıda olması, kimlik doğrulama mekanizmalarının güçlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuş olmuştur. Saldırganların zararlı kod çalıştırma girişimleri, güvenlik açıklarının ciddi bir tehdit oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca, saldırıların uzaktan komut çalıştırma yeteneklerinin, sistemlerin kontrolünü ele geçirme riski taşıdığı görülmüş olmuştur.

Hassas verilerin toplanmasına yönelik saldırılar, veri güvenliğinin öncelikli bir konu olduğunu işaret etmiştir. Yapılan çalışma ve saldırı senaryosu kapsamında, sistemin zayıf noktalarını keşfetme çabalarının yoğunluğu, saldırıların detaylı bilgi toplama girişimlerinde bulunduğunu göstermiş olmuştur. Saldırı sonuçları incelendiğinde, sisteme izinsiz giriş denemelerinin yüksek sayıda olması, dışarıdan gelen tehditlere karşı daha güçlü bir koruma gerektiğini ortaya koymuş olmuştur.

Bu saldırı simülasyonu kapsamında, ilk erişim denemelerinin fazlalığı, saldırıların başlangıç noktalarının güvenliğinin yetersiz olduğunu göstermiştir. Saldırganların savunma mekanizmalarını atlatma ve sistemdeki ayrıcalıklarını artırma girişimleri, mevcut güvenlik önlemlerinin güçlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymuş olmuştur. Bu çalışmanın bir sonucu olarak, saldırıların sistemde kalıcı olarak yerleşme çabalarının yüksek sayıda olmasının, uzun vadeli tehditlerin varlığına işaret ettiği şeklinde yorumlanış olmalıdır.

Tablo 5'de görüldüğü üzere literatürde bulunan çalışmalar genel olarak, balküpu kullanarak siber güvenliği geliştirmeye yönelik çeşitli araştırmalara bir bakış sunmaktadır. Bizim çalışmamız, diğer araştırmalarla benzer şekilde, Linux sistemlerine yönelik siber saldırıların tespiti ve analizine odaklanmakta olup, balküpu tabanlı bir yaklaşım kullanılmaktadır. Bu çalışmalardaki ortak tema, saldırı tekniklerini sınıflandırmak ve anlamak için MITRE ATT&CK çerçevesinin kullanılmasında yatmaktadır. Ayrıca, bu makalelerin çoğu, çeşitli saldırı türlerini test etme amacını gütmektedir. Ancak, bizim çalışmamız, kullanılan araçlar açısından bildiğimiz kadarıyla benzersizdir; saldırı simülasyonuna verilen önem ve siber güvenlik uzmanlarına yardımcı olmayı hedefleyen yaklaşımı ile öne çıkmaktadır.

Tablo 5. Literatür Çalışmaların Karşılaştırması

Makale	Kullanılan Metod	Sonuçlar	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Balküpi Çeşitleri	T-Pot Kullanımı	Test Edilen Saldırı Türleri	Wazuh Kullanımı
A Highly Interactive Honeypot-Based Approach to Network	Yüksek etkileşimli bir balküpi tehdit yönetim sistemi için modüler tasarım aşağıdaki modüllere ayrılmıştır. Glasspof, savunmasız web sunucularını simüle etmek için düşük etkileşimli bir balküpi olarak kullanılmaktadır.	65 saldırı verisi kaydı belirli bir süre boyunca toplanmıştır. Merkezi düğüm, sürekli saldırılara rağmen güvenli tutulmuştur. Bu yöntem, geleneksel ağ tehdit yönetim yöntemlerine kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Sistem, mevcut ağ ortamında güvenlik sağlamakta etkili olduğu kanıtlanmıştır.	Glasspof, MongoDB	Yüksek etkileşimli: Shadow Daemon, Ehoney Düşük etkileşimli: Glasspof	Geçerli değildir (Not Applicable)	Genel saldırı davranışı, belirli türler açıkça belirtilmemiştir, ancak kaynak SQL enjeksiyonu gibi güvenlik açıklarına odaklanmıştır.	Hayır
An Improved Honeypot Model for Attack Detection and Analysis	Sistemin bütünlüğü korunurken saldırganlarla daha yüksek etkileşim sağlanması amacıyla yeni bir balküpi modelinin tasarımı yapılmıştır.	17 gün boyunca 1.5 milyon olay toplanmıştır. Daha önce belgelenmemiş Kompromize Göstergeleri (IOC'ler) tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, literatürdeki benzer dağıtımlar ile karşılaştırılabilir niteliktedir.	Wazuh, Elasticsearch-Logstash-Kibana (ELK), IPTables	Yüksek etkileşimli: Özel balküpleri (detaylar sağlanmamıştır)	Geçerli değildir (Not Applicable)	RDP brute-force denemeleri, SSH brute-force denemeleri, Apache Web Sunucusu ve Apache Druid'teki güvenlik açıklarını istismar etme girişimleri.	Hayır
An Adversarial Approach Comparing Windows and Linux Security Hardness Using Mitre ATT&CK Framework for Offensive Security	Statik ve dinamik analizlerin kötü amaçlı yazılım tespiti üzerindeki etkinliği incelenmektedir.	Verilen alıntı, herhangi bir spesifik sonucu belirtmemektedir. Bu alıntı, siber güvenlikle ilgili çeşitli mevcut çalışmaları özetlemeye odaklanmaktadır, bunlar arasında kötü amaçlı yazılım teknikleri de bulunmaktadır.	Belirtilmemiştir (Not specified)	Belirtilmemiştir (Not specified)	Geçerli değildir (Not Applicable)	Phishing, süreklilik ve yatay hareketle ilgili zafiyetlerin istismarı, belirli saldırı türleri metinde ayrıntılı olarak belirtilmemiştir.	Hayır

Makale	Kullanılan Metod	Sonuçlar	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Balküpü Çeşitleri	T-Pot Kullanımı	Test Edilen Saldırı Türleri	Wazuh Kullanımı
Cyber security threat modeling based on the MITRE Enterprise ATT&CK	MITRE Enterprise ATT&CK Matrisi'ne dayalı olarak, kurumsal güvenlik için 'enterpriseLan g' adı verilen bir tehdit modelleme dili önerilmektedir. Saldırı simülasyonları kullanılarak güvenlik ayarları ve mimari değişiklikler incelenmektedir.	Saldırı simülasyonları yapmak, paydaşların kurumlarına yönelik bilinen tehditleri, potansiyel azaltma önlemleri, en kısa saldırı yolları ve düşmanların sistemi tehlikeye atmak için gereken süreyi değerlendirmelerine olanak tanımıştır.	Belirtilmemiştir (Not specified)	Geçerli değildir(Not Applicable) Tehdit modelleme, balküpü dağıtımı değil	Geçerli değildir (Not Applicable)	Geçerli değildir (MITRE ATT&CK çerçevesi kullanılarak saldırı senaryolarının modellenmesine odaklanılmakta, belirli saldırı türlerine odaklanılmamaktadır).	Hayır
Developing Proactive Cyber Threat Defense Systems on Server Computers Using HoneyPot	Brute Force saldırılarını karşısında sunucu bilgisayarları üzerindeki olay yanıtı analiz teknikleri kullanılmaktadır. SIEM sistemi, saldırılarını MITRE ATT&CK çerçevesi ile karşılaştırarak saldırı tekniklerini tanımlamaktadır.	Bir saldırı gerçekleştiğinde, SIEM saldırıyı "Parola Tahmini", bir SSH Brute Force Saldırısı olarak kaydeder ve tanımlar.	SIEM	Belirtilmemiştir (Not specified)	Geçerli değildir (Not Applicable)	SSH brute-force saldırıları (özellikle Şifre Tahmin Etme)	Hayır

Makale	Kullanılan Metod	Sonuçlar	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Balküğü Çeşitleri	T-Pot Kullanımı	Test Edilen Saldırı Türleri	Wazuh Kullanımı
Enhancing False Positive Detection in IDS-IPS Using Honeyd: A Case Study with CSE-CIC-2018 Dataset	Balküğü verilerini IDS/IPS çıktılarıyla entegre eden hibrit bir geliştirilmiştir. Bu yaklaşımın etkinliği, CSE-CIC-2018 veri seti kullanılarak değerlendirilmiştir.	Yanlış pozitif oranları, doğru pozitif oranları, doğruluk ve ilgili metriklerin nicel ölçümleri, mimarinin etkinliğini değerlendirmiştir. Sonuçlar, yanlış pozitiflerin azaldığını göstermiştir. Verilerin analizi, saldırgan davranışları hakkında içgörüler sunmuştur.	Honeyd, Collapsar, Snort, TPOT CE Honeynet	Düşük etkileşim: Honeyd Orta etkileşim: TPOT CE'nin SentryPeer, DCOMPot, HoneyTrap, Glutton Snare ve Tanner gibi orta etkileşimli balküğüleri	Cowrie, Dionaea, Snare, Tanner, Citrix Honeyd	SQL Injection, Cross-Site Scripting (XSS), Nmap taramaları, sızma saldırıları (geniş bir kategori olup, sızma içindeki belirli teknikler ayrıntılı olarak belirtilmemiştir), çeşitli protokollere yönelik saldırılar (FTP, HTTP, HTTPS, SSH), ve CSE-CIC-2018 veri setinde bulunan saldırılar (çok çeşitli saldırı türlerini içermekte olup, hepsi metinde açıkça listelenmemiştir; ancak kaynak, brute force, DoS, heartbleed, botnet, sızma ve DDoS gibi örnekleri belirtmektedir) kullanılarak yapılan saldırılar tanımlanmıştır.	Hayır

Makale	Kullanılan Metod	Sonuçlar	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Balküğü Çeşitleri	T-Pot Kullanımı	Test Edilen Saldırı Türleri	Wazuh Kullanımı
Faking smart industry_exploring cyber-threat landscape deploying cloud-based honeypot	Bulut tabanlı balküğü dağıtımı, akıllı endüstrilerde siber tehdit manzarasını keşfetmek için kullanılmıştır. İzleme için T-Pot balküğü ve Cockpit kullanılmıştır.	SHODAN ve SHODAN dışı tabanlı eşler arasındaki etkileşimler ve korelasyonlar belirlenmiştir. Araştırma, aşağıdaki veriler toplanmıştır: Saldırgan kullanıcı adları, İstismar sonrası kullanılan komutlar, İstismar edilen CVE'ler, Kötü amaçlı yazılım imzaları.	T-Pot, Cockpit, Conpot, Cowrie, Dicompot, Heralding, Honeysap, Honeytrap, Medpot, Rdp, Honeypot, Cyberchef, ELK, Fatt, Elasticsearch Head, Ewsposter, Nginx, Spiderfoot, POF, Suricata	Düşük etkileşim: Conpot, Dionaea, Heralding, Medpot; Orta etkileşim: Cowrie, Honeytrap kullanılarak etkileşimler sağlanmaktadır.	Conpot, Cowrie, Dionaea, Heralding, Honeysap, Honeytrap, Medpot	Çeşitli protokoller (SSH, FTP, Telnet, HTTP, HTTPS, IMAP, IMAPS, POP3, POP3S, SMTP, VNC, Socket5, PostgreSQL) karşısında brute-force kimlik doğrulama saldırıları, Çeşitli CVE'leri (belirli CVE'ler alıntıda belirtilmemiştir) kullanılarak yapılan istismar girişimleri, Belirli endüstriyel kontrol sistemlerini hedef alan saldırılar (Guardian AST, Siemens S7-200, Akıllı Sayaç)	Hayır
Honeypot in a box_A Distributed cluster network for honeypot deployment	Orkestrasyon için Kubernetes kullanılan dağıtılmış bir balküğü altyapısı kurulmuştur. Altyapının performansını ve etkinliğini değerlendirmek için karşılaştırmalı testler (benchmarking) yapılmıştır.	Ortalama bir ağ gecikmesi 17ms ve bant genişliği 95 Mbit/s olarak elde edilmiştir. Bu yaklaşım, balküğüleri farklı konumlara başarıyla dağıtmıştır.	Kubernetes, Cowrie	Not specified.	Cowrie	Brute-force attacks	Hayır

Makale	Kullanılan Metod	Sonuçlar	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Balküğü Çeşitleri	T-Pot Kullanımı	Test Edilen Saldırı Türleri	Wazuh Kullanımı
Industrial Control Systems Security Validation Based on MITRE Adversarial Tactics, Techniques, and Common Knowledge Framework	Endüstriyel Kontrol Sistemlerinde güvenlik doğrulaması için Snort IDS ve T-Pot balküğü gibi açık kaynaklı araçlar kullanılmıştır. Saldırıları analiz etmek için MITRE ATT&CK çerçevesi kullanılmıştır.	Çeşitli saldırı senaryoları için IOC'ler belirlenmiştir. Araştırma, açık kaynak araçlarının ICS ortamlarında tehditlerin tespit edilmesi ve hafifletilmesinin etkinliği incelenmiştir.	Snort IDS, T-Pot	Belirtilmemiştir, ancak T-Pot'un yeteneklerine dayalı olarak düşük, orta ve yüksek etkileşimli balküplerinin bir kombinasyonu kullanılır.	Belirtilmemiştir, ancak T-Pot'un kullanımı göz önünde bulundurularak, farklı saldırı türleri için çeşitli honeypotlar içerildiği tahmin edilmektedir.	Sağlanan alıntıda belirli saldırı türleri ayrıntılı olarak belirtilmemiştir, ancak odak noktası Endüstriyel Kontrol Sistemleri güvenliğidir.	Hayır
Investigating Threats to ICS and SCADA Systems Via HoneyPot Data Analysis and SIEM	Conpot balküğü, Wazuh SIEM ve The Hive kullanarak tehdit istihbaratı paylaşımı yapan gerçek zamanlı bir tehdit analiz sistemi geliştirilmiştir. Bu araştırma, ICS (Endüstriyel Kontrol Sistemleri) ve SCADA (Denetleyici ve Veri Toplama) ortamlarında saldırı eğilimlerini tanımlamaya ve proaktif tehdit azaltma sağlamaya odaklanmaktadır.	ICS/SCADA sistemlerinde proaktif tehdit azaltma için balküğü verilerinin gerçek zamanlı analizi yapılmış ve tehdit istihbaratı çıkarılmıştır. Balküpleri tarafından tespit edilen kötü niyetli IP'ler başarıyla engellenmiştir.	Conpot, Wazuh SIEM, The Hive	Düşük etkileşim: Conpot	Geçerli değildir (Not Applicable)	HTTP, SNMP ve Modbus protokollerini hedef alan saldırılar, Gözlemlenen belirli taktikler ve teknikler, MITRE ATT&CK çerçevesi kullanılarak kategorize edilmiştir.	Evet

Makale	Kullanılan Metod	Sonuçlar	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Balküpi Çeşitleri	T-Pot Kullanımı	Test Edilen Saldırı Türleri	Wazuh Kullanımı
It's too late if exfiltrate _ Early stage Android ransomware detection	MITRE ATT&CK bilgi tabanını kullanarak fidye yazılımlarını erken aşamada tespit etmek için 'Weapon' adı verilen yeni bir çerçeve geliştirilmiştir. Bu çerçeve, dinamik analiz kullanarak özellikler çıkarır ve bunları MITRE saldırı verileriyle ilişkilendirir.	Fidye yazılımlarını erken aşamalarda tespit etmede yüksek doğruluk elde edilmiştir. Bu, aşağıdaki yöntemlerin bir kombinasyonu kullanılarak başarmıştır: - Dinamik analiz - Semantik özellik eşleşmesi - MITRE ATT&CK çerçevesi Önerilen Weapon yöntemi, tespit doğruluğu açısından diğer son teknoloji yaklaşımları geride bırakmıştır.	Belirtilmemiştir (Not specified)	Geçerli değildir (fidye yazılımı tespit çerçevesi, balküpi dağıtımı değil).	Geçerli değildir (Not Applicable)	Fidye yazılımı saldırıları, özellikle aşağıdaki tekniklerle ilgili odaklanılmalıdır: Süreklilik (Persistence) Ayrıcalık Yükseltme (Privilege Escalation) Komut ve Kontrol (Command and Control) Keşif (Discovery) Toplama (Collection)	Hayır

Makale	Kullanılan Metod	Sonuçlar	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Balküpü Çeşitleri	T-Pot Kullanımı	Test Edilen Saldırı Türleri	Wazuh Kullanımı
Mapping Linux Shell Commands to MITRE ATT&CK using NLP-Based Approach	Doğal dil işleme (NLP) yaklaşımı, Linux kabuk komutlarını MITRE ATT&CK tekniklerine ve taktiklerine eşlemek için kullanılmaktadır.	Linux komutlarını hem MITRE ATT&CK tekniklerine/alt tekniklerine hem de taktiklere eşlemek için makul geri çağırma (recall) değerleri elde edilmiştir. En iyi performans gösteren model, şu geri çağırma değerlerini elde etmiştir: Taktiklere eşleme için Recall-10: 0.75397 Tekniklere/alt tekniklere eşleme için Recall-10: 0.45575 Bu araştırma, doğal dil işlemenin (NLP) bu görev için uygulanabilirliğini göstermektedir.	Cowrie	Geçerli değildir(Not Applicable)	Odak noktası, shell komutlarının MITRE ATT&CK'e haritalanmasıdır, belirli saldırı türlerinin test edilmesine değil. Kaynak, curl komutunu bir örnek olarak kullanır.	Hayır	Hayır

Makale	Kullanılan Metod	Sonuçlar	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Balküğü Çeşitleri	T-Pot Kullanımı	Test Edilen Saldırı Türleri	Wazuh Kullanımı
Performance analysis of network intrusion detection using T-Pot honeypots	T-Pot balküğü dağıtımı ve ağ izinsiz giriş tespiti için performans analizi amacıyla ELK yığını (stack) kullanılmıştır. Etkinlik değerlendirme si için Nmap, Hydra ve DDoS saldırıları kullanılarak deneyler yapılmıştır.	Balküpleri, port taramaları, brute-force saldırıları ve DDoS saldırıları da dahil olmak üzere izinsiz giriş girişimlerini başarılı bir şekilde tespit etmiş ve kaydetmiştir. Sonuçlar, T-Pot balküğü'nün çeşitli ağ saldırılarını tespit etmede etkili olduğunu göstermektedir. Toplanan verilerin analizi: Saldırgan davranışları hakkında içgörüler sunmaktadır. Potansiyel güvenlik açıklarını tanımlamaya yardımcı olmaktadır.	T-Pot, ELK stack	Belirtilmem iştir, ancak T-Pot'un kullanımı göz önünde bulundurularak, farklı saldırı türleri için çeşitli balküplerinin içerildiği tahmin edilmektedir.	Belirtilmem iştir, ancak araştırmada açıkça şunlar kullanılır: Port taraması için Nmap, brute-force saldırıları için Hydra, DDoS saldırıları.	Hayır	Hayır

Makale	Kullanılan Metod	Sonuçlar	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Balküpi Çeşitleri	T-Pot Kullanımı	Test Edilen Saldırı Türleri	Wazuh Kullanımı
Attack detection and forensics using honeypot in IoT environment	Çeşitli makine öğrenimi algoritmaları, saldırıları sınıflandırmak için uygulanmıştır.	Weka'dan elde edilen bir bilgi grafiği, kullanılan tüm yaklaşımların karşılaştırılma sını sağlamıştır. SVM (Support Vector Machine) ve Random Forest, daha iyi doğruluk ve ROC eğrisi sunmuştur. Balküpi adli incelemeleri, bir saldırının nasıl çalıştığına dair derin içgörüler sağlamıştır. Balküpi verilerinin analizi, güvenlik duvarı kurallarını güçlendirmek için kullanılmaktadır.	Cowrie honeypot, Naive Bayes, J48 decision tree, Random Forest, SVM	Orta etkileşim: Cowrie kullanılır.	Geçerli değildir (Not Applicable)	SSH ve Telnet hedef alan saldırılar, Kötü niyetli yük teslimi, XOR DDoS saldırıları, Casusluk olarak sınıflandırılan saldırılar	Hayır
Bizim Çalışmamız	Linux sistemlerini hedef alan siber saldırıları tespit etmek ve analiz etmek için bir bal peteği tabanlı yaklaşım kullanılmıştır.	Çalışma, Linux platformlarındaki saldırıların MITRE ATT&CK matrisi kullanılarak nasıl etkili bir şekilde planlanabileceğini ve yürütülebileceğini göstermiştir. Sonuçlar, siber güvenlik uzmanlarının Linux platformlarındaki karşılaşabilecekleri tehditleri daha iyi anlamalarına ve bu tehditlere karşı etkili savunma stratejileri geliştirmelerine yardımcı olmuştur.	T-Pot Balküpi-Wazuh-auditd-Atomic Red Team	Düşük etkileşimli bal petekleri (MedPot, Honeyd, Dionaea) Orta etkileşimli bal petekleri (HoneyTrap, Snare, Glutton) Yüksek etkileşimli bal petekleri (Cowrie, Hellpot, Redishoney pot)	Evet	Kaba kuvvet girişimleri, Hizmet reddi (DoS) saldırıları, Ağ haritalama saldırıları, SQL enjeksiyon saldırıları, Siteler arası komut dosyası çalıştırma (XSS) saldırıları, Bilinen güvenlik açıklarının istismarı, Veri sızdırma	Evet

Araştırmalarda balküğü platformu olan T-Pot'un kullanımı vurgulanırken, bizim çalışmamız daha kapsamlı bir yaklaşım benimsemektedir. T-Pot'un yanı sıra, bir güvenlik bilgi ve olay yönetimi (SIEM) sistemi olan Wazuh, Linux sistem denetimi için auditd ve saldırı simülasyonu için Atomic Red Team kullanılmaktadır. Bu araçlar birleşimi, saldırıların ve bunların Linux sistemi üzerindeki etkilerinin daha derinlemesine analiz edilmesini sağlamaktadır.

Bizim çalışmamızı diğer çalışmalarla ayıran bir başka faktör, MITRE ATT&CK matrisinin sadece saldırı desenlerini anlamak için değil, aynı zamanda kontrollü bir ortamda saldırıları planlayıp gerçekleştirmek için kullanılmasına odaklanılmasıdır. Bu proaktif yaklaşım, araştırmacıların olası saldırı vektörlerini önceden tahmin etmelerini ve sağlam savunma stratejileri geliştirmelerini mümkün kılmaktadır. Bu tür bir saldırı simülasyonuna vurgu, daha çok gözlemlenen saldırıların reaktif analizine odaklanan diğer araştırmalarda pek belirgin değildir. Ayrıca, hedef kitlesi açıkça belirtilmiştir. Çalışma, siber güvenlik profesyonellerine Linux platformlarını hedef alan tehditlere karşı daha iyi bir anlayış kazandırmayı ve etkili savunma stratejileri oluşturmalarına yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Uygulamalı yaklaşıma ve siber güvenlik uzmanlarına yönelik yardım amacına açıkça odaklanılması, bazı diğer araştırmalardan ayıran bir özelliktir; çünkü diğer çalışmalar genellikle daha geniş bir kapsamdadır.

Bu çalışmada sunulan yenilikçi unsur, Linux platformlarına yönelik yapılan siber saldırıların balküğü sistemleri aracılığıyla toplanarak MITRE ATT&CK matrisine dayalı olarak ele alınması ve bu saldırılara ait log verilerinin Wazuh platformunda analiz edilerek yeni kod çözücülerin (decoder) ve kuralların (rules) oluşturulmasıdır. Literatürde, genellikle Windows tabanlı sistemler veya genel saldırı türleri üzerine yapılan çalışmalarda, Linux tabanlı sistemlerin balküğü ortamında bu kadar derinlemesine analiz edilmediği ve saldırıların MITRE ATT&CK çerçevesi üzerinden detaylı şekilde ele alınmadığı görülmektedir. Özellikle, Linux platformları üzerinde balküğü kullanılarak saldırıların tespit edilmesi ve bu verilerin zamanında analiz edilmesi konusunda sınırlı sayıda araştırma yapılmıştır.

Bu çalışma, Linux tabanlı sistemlerinde çeşitli siber saldırı türlerini tespit etmek amacıyla MITRE ATT&CK matrisinin kullanılmasıyla, farklı saldırı tekniklerinin ve prosedürlerinin analiz edilmesi hedeflenmiştir. Saldırı, SSH kaba kuvvet saldırıları gibi yaygın tehditlerden web tabanlı zafiyetlerin istismarına kadar geniş bir yelpazeyi kapsayacak şekilde ele alınmıştır. Bu tür saldırılardan toplanan log verileri, Wazuh SIEM platformunda analiz edilmiş ve bu saldırı türlerine yönelik özel kod çözücüler (decoder) ve kurallar (rules) geliştirilmiştir. Özellikle, saldırganların kullandığı yöntemlerin ve saldırı tekniklerinin MITRE ATT&CK matrisine dayalı olarak modellenmesi, bu araştırmanın en önemli yeniliklerinden biri olarak belirlenmiştir.

Wazuh ve T-Pot araçlarının seçilme gerekçeleri, literatürdeki güvenlik ihtiyaçları ve bu araçların sunduğu avantajlarla ilişkilidir. Wazuh, güvenlik bilgi ve olay yönetimi (SIEM) alanında kullanılan açık kaynaklı bir araç olarak tanımlanır ve ağ güvenliği ile tehdit tespiti açısından kritik bir rol üstlenir. Literatürde, Wazuh'un gelişmiş olay izleme, güvenlik açığı tespiti ve anomali analizi işlevlerinin ağlardaki tehditleri hızlı ve etkili şekilde tespit ettiği belirtilir. Bu araç, ayrıca merkezi log yönetimi sağlayarak, saldırıların kaydını tutar ve gerçek zamanlı izleme imkânı sunar.

T-Pot ise, saldırganları cezbetmek ve kullandıkları teknikleri anlamak amacıyla kullanılan bir balküpu çözümdür. Balküpu teknolojilerinin ağ üzerindeki saldırıları gözlemlemek ve detaylarını kaydetmek için faydalı olduğu literatürde vurgulanır. T-Pot, farklı balküpleri araçlarını entegre ederek, çeşitli saldırı türlerini (DDoS, SQL injection, brute force vb.) tespit etmek ve analiz etmek için kapsamlı bir çözüm sunar.

Wazuh ve T-Pot'un birlikte kullanılması, ağ güvenliği ve saldırı tespiti konusunda güçlü bir kombinasyon oluşturur. Wazuh, sistemleri izleyerek tehditleri erken aşamalarda tespit ederken, T-Pot, saldırıların teknik detaylarını analiz etme fırsatı sağlar. Bu sayede, sistemdeki güvenlik açıkları ve saldırganların taktikleri daha iyi anlaşılır, böylece savunma stratejileri geliştirilir.

Wazuh platformu, saldırıların tespiti ve analizinin kolaylaştırılması amacıyla kullanılmış, log verileri bu sistemde detaylı bir şekilde incelenmiş ve yeni kurallar geliştirilmiştir. Bu kurallar, belirli saldırı tekniklerini tanımlamak için MITRE ATT&CK çerçevesine dayalı olarak tasarlanmış ve Linux tabanlı sistemlere özgü saldırılara dair daha kapsamlı bir analiz sağlanmıştır. Ayrıca, bu çalışma ile elde edilen veriler, Wazuh platformunun Linux sistemlerine yönelik tehditleri tanıma ve analiz etme kapasitesinin güçlendirilmesini sağlamıştır.

Literatürdeki mevcut çalışmalar genellikle belirli saldırı türlerinin tespit edilmesine veya savunma stratejilerinin geliştirilmesine odaklanmıştır. Ancak, günümüz siber tehdit ortamının hızla evrimleşmesi ve saldırganların daha sofistike teknikler kullanması nedeniyle, literatürdeki mevcut yaklaşımların bazen yeni tehditleri ve gelişen saldırı tekniklerini yeterince kapsamlı bir şekilde ele almadığı görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışma, mevcut literatürdeki eksikliklerin giderilmesi ve daha dinamik bir tehdit tespiti sürecinin sunulması amacıyla ortaya konmuştur. Wazuh ve T-Pot gibi araçların birlikte kullanılması, yalnızca geleneksel saldırı tespit yöntemlerinin değil, aynı zamanda saldırganların taktiklerinin ve yöntemlerinin derinlemesine incelenmesine olanak tanımaktadır. Literatürdeki çoğu çalışmanın, yalnızca tek bir araç ya da yöntemi kullanarak saldırıların tespit edilmesine odaklandığı, bu çalışmada ise çoklu araçların entegrasyonu sağlanarak her iki aracın da güçlü yönlerinden faydalanılmıştır. Wazuh, ağ ve sistem güvenliğini izlerken, T-Pot saldırganların kullandığı teknikleri simüle etmekte ve bu sayede saldırıların gerçek zamanlı olarak izlenmesi mümkün olmaktadır. Bu şekilde hem savunma hem de saldırı analizi açısından daha derinlemesine ve etkili bir bakış açısı elde edilmektedir. Bu çalışma, siber güvenlik alanında daha proaktif bir yaklaşım geliştirilmesine katkı sağlamak amacıyla yapılmıştır. Bu tür bir yaklaşım, literatüre önemli bir katkı sunmakta ve siber güvenlik araştırmalarında daha bütünsel ve dinamik bir güvenlik modelinin oluşturulmasına zemin hazırlamaktadır.

Bu yenilikçi yaklaşım, özellikle Linux tabanlı sistemlerde güvenlik açıklarının tespit edilmesi, analiz edilmesi ve buna yönelik otomatik karşı önlemler geliştirilmesi konusunda önemli bir katkı sağlamaktadır.

8.1. Savunma Önlemleri

Siber güvenlik alanında, Linux tabanlı sistemlere yönelik saldırılara karşı çeşitli savunma önlemleri uygulanmış olmuştur. Brute Force saldırılarına karşı alınan

önlemler arasında, şifre politikalarının güçlendirilmesi ve SSH erişimi için genel anahtar yetkilendirmesi (public key authentication) yönteminin zorunlu kılınması yer almıştır. Ayrıca, Fail2ban gibi araçlar kullanılarak, başarısız giriş denemeleri sayısına göre IP adreslerinin engellenmesi sağlanmış olmuştur. Sistem üzerindeki tüm şüpheli girişler takip edilmiş, zayıf şifreler engellenmiş ve root erişimi için yapılan kötü niyetli giriş denemeleri başarıyla tespit edilmiştir. Port yönlendirme ve gizleme yöntemleri ile, yalnızca güvenli IP adreslerinden erişim sağlanması mümkün kılınmıştır.

DDoS saldırıları gibi yüksek trafikle yapılan saldırılara karşı savunma önlemleri de önemli bir yer tutmuş olmuştur. Bu tür saldırılar için, trafik analizi ve rate limiting gibi teknikler uygulanmış olmuştur. Yük dengeleme (load balancing) yöntemleri ile, anormal trafik birden fazla sunucuya yönlendirilerek, tek bir sunucunun aşırı yüklenmesi engellenmiş olmuştur. Ayrıca, Cloudflare gibi bulut tabanlı hizmetler ile gelen trafik önceden filtrelenmiş ve asıl hedef sistemlere ulaşmadan zararlı trafik engellenmiş olmuştur. Bu önlemler sayesinde, sistemlere yapılan DDoS saldırıları etkin bir şekilde tespit edilmiş ve gerekli aksiyonlar alınmıştır.

Web tabanlı saldırılar, özellikle SQL enjeksiyonu ve XSS gibi tehditlere karşı alınan önlemler de hayati öneme sahip olmuştur. Web Application Firewall (WAF) kullanılarak, web uygulamalarına gelen zararlı istekler tespit edilmiş ve engellenmiş olmuştur. Ayrıca, kullanıcıdan alınan tüm girişler sanitize edilmiş ve prepared statements kullanılarak, SQL enjeksiyonuna karşı güvenlik sağlanmış olmuştur. Bu yöntemler ile, web uygulamaları üzerindeki güvenlik açıkları minimize edilmiş ve siber saldırılara karşı dayanıklılık artırılmış olmuştur. Güvenli kod yazma ve sistem güncellemeleri gibi genel güvenlik önlemleri, Linux tabanlı sistemlerin sürekli olarak güvenli kalmasını sağlamıştır.

Tespit edilen saldırılara karşı alınabilecek savunma önlemleri, saldırı türlerine ve kullanılan araçlara bağlı olarak farklı stratejiler içermektedir. Wazuh ve T-Pot gibi araçlar, bu saldırıları tespit etmek için etkin bir şekilde kullanılmakta ve bu tespitler üzerine uygun savunma önlemleri geliştirilmesi sağlanmaktadır. DDoS (Dağıtık Hizmet Engelleme) saldırıları, ağ üzerindeki kaynakları hedef alarak hizmetin kesintiye uğratılmasına yol açmaktadır. Bu tür saldırılara karşı, ağ trafiği izlenmekte ve anormal trafik artışları tespit edilerek, IP kara listeleri ve trafik sınırlama gibi yöntemlerle savunma önlemleri alınmaktadır. Kaba kuvvet saldırıları, zayıf şifrelerin kırılması amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bu tür saldırılara karşı, güçlü şifre politikaları uygulanmakta, hesaplar belirli sayıda hatalı denemeden sonra kilitlenmekte ve çift faktörlü kimlik doğrulama yöntemleri devreye sokulmaktadır. SQL enjeksiyon saldırıları, veri tabanlarına yetkisiz erişim sağlamayı hedeflemektedir. Bu saldırılara karşı, hazırlanan SQL sorguları için hazırlanmış ifadeler kullanılmakta, kullanıcı girdileri doğrulanmakta ve web uygulama güvenlik duvarları (WAF) ile ek bir koruma sağlanmaktadır.

Zafiyet tabanlı saldırılar ise sistemdeki açıkları hedef almaktadır. Bu saldırılar için, sistemlerin düzenli olarak güncellenmesi, güvenlik yamalarının uygulanması ve sistem sertleştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Kimlik avı ve sosyal mühendislik saldırıları, kullanıcıları kandırarak kişisel bilgilerini ele geçirmeyi amaçlamaktadır. Bu tür saldırılara karşı, kullanıcılar eğitimle bilinçlendirilmekte, e-posta sistemlerinde gelişmiş spam filtreleme teknikleri kullanılmakta ve kimlik doğrulama protokolleri

devreye sokulmaktadır. Son olarak, fide yazılımı saldırıları, verilerin şifrelenip fide talep edilmesiyle gerçekleşmektedir. Bu tür saldırılara karşı, düzenli yedekleme yapılmakta, antivirüs yazılımları kullanılmakta ve erişim denetimleri ile kritik verilere yalnızca yetkili kullanıcıların erişmesi sağlanmaktadır. Bu savunma önlemleri, tespit edilen saldırılara karşı etkili bir koruma sağlamakta ve sistem güvenliği artırılmaktadır.

9. ÖNERİ VE TAVSİYELER

Balküpü tabanlı yaklaşım, siber uzay güvenliğinin artırılmasına ve potansiyel risklerin azaltılmasına katkıda bulunmuş olmuştur. Balküplerinin, saldırganları kendilerine çekerek, güvenlik uzmanlarının potansiyel tehditleri gerçek ağı etkilemeden önce proaktif olarak tespit ve analiz etmelerine olanak tanıdığı gözlemlenmiş olmuştur. Bu sayede tehditlerin erken azaltılması mümkün kılınmış olmuştur. Balküpleri, saldırgan davranışı, taktikleri ve teknikleri hakkında ayrıntılı bilgi sağlayarak güvenlik ekiplerinin potansiyel tehditleri daha kapsamlı bir şekilde anlamasını ve analiz etmesini sağlamış olmuştur. Balküplerinin kullanımı sayesinde kuruluşlar, sistem ve uygulamalarındaki güvenlik açıkları hakkında içgörü kazanmış ve bu zayıflıkları gerçek saldırganlar tarafından istismar edilmeden önce ele alıp yamalamışlardır.

Genel anlamda yapılması gereken güvenlik önlemleri söz konusu olmuştur. Örneğin, MFA kullanılarak kimlik bilgileri erişim girişimlerinin önüne geçilmesi sağlanmış olmalıdır. Sistemlerin ve uygulamaların düzenli olarak güncellenmesi ve güvenlik yamalarının uygulanması sağlanmış olmalıdır. Yanal hareketlerin önlenmesi için ağ segmentasyonu yapılmış ve kritik sistemler izole edilmiştir. Ayrıca, güvenlik olaylarının ve logların düzenli olarak incelenmesi, anormal aktivitelerin tespitini hızlandırmış olmalıdır. Hassas verilerin şifrelenmesi, yetkisiz erişimlerin etkisini en aza indirmiş olmalıdır. Kullanıcılara yönelik düzenli siber güvenlik eğitimleri verilmiş ve farkındalık artırılmış olmalıdır. Ağ cihazları ve yazılımları düzenli olarak güncellenmiş ve güvenlik açıkları kapatılmış olmalıdır. Ağ trafiği sürekli izlenmiş ve anormallikleri tespit etmek için analiz araçları kullanılmış olmalıdır. Çalışanlara ağ güvenliği konusunda eğitim verilmiş ve farkındalık artırılmış olmalı ve kritik verilerin düzenli olarak yedeklenmesi sağlanmış olmalıdır. Felaket kurtarma planları oluşturulmuş ve uygulanabilir hale getirilmiş olmalıdır.

Olası bir siber saldırı durumunda hızlı ve etkili müdahale için olay müdahale planlarının hazırlanmış ve test edilmiş olması gerekmektedir. Kullanıcı ve sistem ayrıcalıkları minimum yetki prensibine göre yönetilmiş ve düzenli olarak gözden geçirilmiş olmalıdır. Güvenlik duvarları ve IDS/IPS (Intrusion Detection System/Intrusion Prevention System) kullanılarak ağ trafiği izlenmiş ve kontrol altında tutulmuş olmalıdır. Bu sistemler, anormal trafik davranışlarını tespit ederek saldırıları engellemiş olabilmektedir. DDoS saldırılarına karşı bulut tabanlı koruma hizmetlerinin kullanılması sağlanmış ve ağ segmentasyonu yapılarak saldırıların yayılması önlenmiş olmalıdır. UDP protokolüne yönelik olarak DNS güvenliği sağlanmış, oran sınırlama (rate limiting) uygulanmış ve gelen UDP paketleri doğrulanarak yalnızca meşru trafik kabul edilmiş olmalıdır. ICMP ve IPv6-ICMP trafiğinde gereksiz paketler filtrelenmiş ve ağ haritalaması saldırılarına karşı önlemler alınmış olmalıdır.

Genel güvenlik önlemleri kapsamında, ağ cihazları ve yazılımları düzenli olarak güncellenmiş ve güvenlik açıkları kapatılmış olmalıdır. Ağ trafiği sürekli izlenmiş ve anormallikleri tespit etmek için analiz araçları kullanılmış olmalıdır. Çalışanlara ağ güvenliği konusunda eğitim verilerek farkındalık artırılmış ve kritik verilerin düzenli olarak yedeklenmesi sağlanmış olmalıdır. Felaket kurtarma planları oluşturulmuş ve uygulanabilir hale getirilmiş olmalıdır.

Bu önlemler, Linux platformlarında MITRE ATT&CK matrisine yönelik saldırıların etkili bir şekilde tespit edilmesi ve önlenmesi için kritik öneme sahip olmuştur. Bu önlemler, sistemlerin güvenlik seviyesini yükseltmiş ve olası siber tehditlere karşı daha dirençli hale getirilmiş olmuştur.

Araştırmamız, Linux platformunda MITRE ATT&CK matrisinin saldırıların planlanması ve uygulanması sürecindeki rolünün ortaya koyulmuş olduğu kabul edilmiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalar, mevcut araştırmanın bulgularına dayanarak derinlemesine analizlerin sunulmuş olabileceği düşünülmektedir. Özellikle, farklı Linux dağıtımları üzerinde MITRE ATT&CK matrisi temelli daha karmaşık ve gerçekçi saldırı senaryolarının simülasyonlarına odaklanılmış olabileceği öngörülmektedir. Bu senaryoların, güvenlik sistemlerinin tepki süreçlerini ve saldırı tespit mekanizmalarını nasıl etkilediğini anlamak için daha geniş kapsamlı bir veri setinin kullanılmış olabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca, makalemizde belirtilen savunma stratejilerinin, gerçek dünya koşullarında nasıl uygulanabileceği ve iyileştirilebileceği üzerine uygulamalı çalışmalar yapılmış olabileceği ifade edilmektedir. Bu çalışmalar, Linux tabanlı sistemlerde siber güvenlik önlemlerinin güçlendirilmesine yönelik yeni yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlanmış olabilecektir.

Gelecekteki araştırmalar, Linux sistemlerinde siber güvenliğin artırılması için yeni teknoloji ve araçların entegrasyonu hedeflenmiş olmalıdır. Örneğin, yapay zekâ (AI) ve makine öğrenimi (ML) tabanlı tehdit analiz araçlarının kullanımı, MITRE ATT&CK matrisinde belirlenen saldırı taktiklerinin daha hızlı ve etkin bir şekilde tespit edilmesi için önemli bir potansiyele sahip olmuştur. Bu teknolojiler, büyük veri kümelerinin analiz edilerek anormal davranışların belirlenmesi ve saldırıların olası hedeflerinin öngörülmesi sağlanmış olabilir. Ayrıca, otomatik yanıt mekanizmalarının geliştirilmesi ve bu teknolojilerle entegrasyonu, saldırılara karşı daha hızlı tepki verilmesini sağlamış olabilir. Bu bağlamda, Linux platformunda AI ve ML teknolojilerinin güvenlik operasyonlarına nasıl uygulanacağı ve mevcut savunma stratejilerinin nasıl iyileştirileceği üzerine uygulamalı çalışmalar yapılmış olmalıdır. Bu çalışmalar, siber tehditlere karşı savunma kapasitelerinin artırılması için önemli bir adım olarak kabul edilmiş olabilir.

Yazarların Katkısı

Bu çalışmada 1. yazar fikir, araştırma, veri toplama, analiz, bilgisayar ortamının sağlanması, kaynak taraması ve makalenin yazımı konusunda katkıda bulunmuştur. 2. yazar düzeltme, gözden geçirme, analiz ve yorum konusunda katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Abbas-Escribano, M., & Hervé D. (2023). An Improved Honeypot Model for Attack Detection and Analysis. *ACM International Conference Proceeding Series*, doi:10.1145/3600160.3604993.
- Afenu, D. S., Asiri, M. & Saxena, N. (2024). Industrial Control Systems Security Validation Based on MITRE Adversarial Tactics, Techniques, and Common Knowledge Framework. *Electronics (Switzerland)* 13(5). doi:10.3390/electronics13050917.
- Al-Sada, B., Sadighian, A. & Oligeri, G. (2024). Analysis and Characterization of Cyber Threats Leveraging the MITRE ATT&CK Database. *IEEE Access* 12. doi:10.1109/ACCESS.2023.3344680.
- Amal, M. R., & P. Venkadesh. (2023). H-DOCTOR: Honeypot based firewall tuning for attack prevention. *Measurement: Sensors* 25. doi:10.1016/j.measen.2022.100664.
- Andrew, Y, Lim, C. & Budiarto, E. (2022). Mapping Linux Shell Commands to MITRE ATT&CK using NLP-Based Approach. *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, doi:10.1109/ICELTICs56128.2022.9932097.
- Candidate, A., & Ayala, G. (2024). *POLITECNICO DI TORINO Master's Degree in ICT FOR SMART SOCIETIES Honeypot in a box: A distributed cluster network for honeypot deployment Supervisors Prof. Marco MELLIA Prof. Idilio DRAGO*.
- Georgiadou, A., Mouzakitis, S., & Askounis, D. (2021). Assessing mitre att&ck risk using a cyber-security culture framework. *Sensors* 21(9). doi:10.3390/s21093267.
- Hobert, K., Lim, C. & Budiarto, E. (2023). Enhancing Cyber Attribution through Behavior Similarity Detection on Linux Shell Honeypots with ATT&CK Framework. *Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Cryptography, Informatics, and Cybersecurity: Cryptography and Cybersecurity: Roles, Prospects, and Challenges, ICoCICs 2023*, doi:10.1109/ICoCICs58778.2023.10276639.
- Hussein, M.A., & Hamza, E.K. (2022). Secure Mechanism Applied to Big Data for IIoT by Using Security Event and Information Management System (SIEM). *International Journal of Intelligent Engineering and Systems* 15(6). doi:10.22266/ijies2022.1231.59.

- Javadpour, A., Ja'fari, F., Taleb, T., Shojafar, M., & Benzaïd, C. (2024). A comprehensive survey on cyber deception techniques to improve honeypot performance. *Computers and Security* 140. doi:10.1016/j.cose.2024.103792.
- José, C. & Santander, M. (2024). Learning Models to Detect Personality Traits of Cyber Attackers: A Combined Approach Using Honeypot and Surveys. doi:10.1007/978-3.
- Kovar, R. & Paine, K. (2024). The CISO Report. https://www.splunk.com/en_us/pdfs/gated/ebooks/the-ciso-report.pdf adresinden 16 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- Koutsikos, I. (2024). *Improving Infrastructure Security using Deceptive Technologies*.
- Liao, M.L., Yu, C.L., Lai, Y.C., Chiu, S.P. & Chen, J.L. (2023). An Intelligent Cyber Threat Classification System. *International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT*, doi:10.23919/ICACT56868.2023.10079405.
- Mitre Att&Ck. (2023). Techniques - Enterprise | MITRE ATT&CK®. *Techniques*.
- Mohd Fuzi, M. F., Mazlan, M.F., Jamaluddin, M.N.F. & Halim, I.H.A. (2024). Performance analysis of network intrusion detection using T-Pot honeypots. *Journal of Computing Research and Innovation* 9: 348–60. <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/103968> adresinden 16 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- Muhammad, S. & Hafee, A.U. (2024) *Investigating Threats to ICS and SCADA Systems Via Honeypot Data Analysis and SIEM*. <https://www.researchgate.net/publication/382398394> adresinden 16 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- Mungsing, S. & Sringendee, K. (2024) *Developing Proactive Cyber Threat Defense Systems on Server Computers Using Honeypot Techniques*. <http://www.ijert.org>.
- Palmer, D. (2024). Linux malware attacks are on the rise, and businesses aren't ready for it. <https://www.zdnet.com/article/linux-malware-attacks-are-on-the-rise-and-businesses-arent-ready-for-it/> adresinden 16 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- Raghul, S. A., Gayathri, G., Bhatt, R. & Varun Kumar, K. A. (2024). Enhancing Cybersecurity Resilience: Integrating IDS with Advanced Honeypot Environments for Proactive Threat Detection. *Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing, ICAAIC 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1363–68. doi:10.1109/ICAAIC60222.2024.10575865.
- Rashid, S.M.Z.U, Haq, A., Hasan, S.T., Furhad, M.H., Ahmed, M. & Ullah, A.B. (2024). Faking smart industry: exploring cyber-threat landscape deploying cloud-based honeypot. *Wireless Networks* 30(5). doi:10.1007/s11276-022-03057-y.

- Rawat, S. (2024). *Enhancing False Positive Detection in IDS/IPS Using Honeypots: A Case Study with CSE-CIC-2018 Dataset*.
- Shrivastava, R.K., Bashir, B. & Hota, C. (2019). Attack detection and forensics using honeypot in IoT environment. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, doi:10.1007/978-3-030-05366-6_33.
- Sikandar, H.S., Sikander, U., Anjum, A. & Khan, M.A. (2022). An Adversarial Approach: Comparing Windows and Linux Security Hardness Using Mitre ATT&CK Framework for Offensive Security. *IEEE 19th International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI, HONET 2022*, doi:10.1109/HONET56683.2022.10018981.
- Singh, N. & Tripathy, S. (2024). It's too late if exfiltrate: Early stage Android ransomware detection. *Computers and Security* 141. doi:10.1016/j.cose.2024.103819.
- Srinivasa, S., Pedersen, L.M. & Vasilomanolakis, E. (2023). Gotta Catch 'em All: A Multistage Framework for Honeypot Fingerprinting. *Digital Threats: Research and Practice* 4(3). doi:10.1145/3584976.
- Xiong, W., Legrand, E., Åberg, O. & Lagerström, R. (2022). Cyber security threat modeling based on the MITRE Enterprise ATT&CK Matrix. *Software and Systems Modeling* 21(1): 157–77. doi:10.1007/s10270-021-00898-7.
- Yang, X., Yuan, J., Yang, H., Kong, Y., Zhang, H. & Zhao, J. (2023). A Highly Interactive Honeypot-Based Approach to Network Threat Management. *Future Internet* 15(4). doi:10.3390/fi15040127.
- Yousaf, A. & Zhou, J. (2024). From sinking to saving: MITRE ATT &CK and D3FEND frameworks for maritime cybersecurity. *International Journal of Information Security*. doi:10.1007/s10207-024-00812-4.
- Zahid, H., Hina, S., Hayat, M.F. & Shah, G.A. (2023). Agentless Approach for Security Information and Event Management in Industrial IoT. *Electronics (Switzerland)* 12(8). doi:10.3390/electronics12081831.



INTEGRATING ECONOMETRIC AND DEEP LEARNING MODELS FOR ENERGY PRICE PREDICTION: A HYBRID APPROACH USING WEATHER AND MARKET DATA

ENERJİ FİYATI TAHMİNİ İÇİN EKONOMETRİK VE DERİN ÖĞRENME MODELLERİNİN ENTEGRASYONU: HAVA DURUMU VE PİYASA VERİLERİNİ KULLANAN KARMA BİR YAKLAŞIM

Cemal ÖZTÜRK¹ 

<https://doi.org/10.55071/ticaretfdb.1578209>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
cemalo@pau.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
05.11.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
25.02.2025

Accepted
(Kabul Tarihi)
06.03.2025

Abstract

This study proposes a hybrid approach that integrates econometric and deep learning models—specifically, Vector Autoregression (VAR), Long Short-Term Memory (LSTM), and Gated Recurrent Unit (GRU)—to enhance electricity price forecasting. By combining historical data with external factors like weather and market indicators, this hybrid approach aims to improve prediction accuracy in volatile energy markets. The model captures complex temporal dependencies through a hybrid VAR, LSTM, and GRU structure and is tested on historical electricity price data supplemented with weather and market variables. Performance is evaluated using mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), symmetric mean absolute percentage error (SMAPE), and root mean squared logarithmic error (RMSLE). Results show that deep learning models, particularly GRU, outperform VAR regarding MAE, RMSE, and RMSLE, suggesting superior predictive accuracy for absolute and relative forecasting tasks. However, SMAPE results highlight that the VAR model performs better in capturing proportional errors, suggesting its relative robustness in volatile price environments. Including weather and market data significantly improves the model's robustness and accuracy. This study's hybrid approach combines the interpretability of econometric models with the predictive power of deep learning, offering insights into the impact of external factors on energy prices. The model supports better decision-making and risk management for energy market participants in dynamic market environments.

Öz

Bu çalışma, elektrik fiyat tahminini geliştirmek için üç farklı modeli, ekonometrik (Vektör Otoregresyon, VAR) ve derin öğrenme tekniklerini (Uzun Kısa Süreli Bellek, LSTM ve Geçitli Tekrarlayan Birim, GRU) entegre ederek hibrit bir yaklaşım önermektedir. Geçmiş verileri hava durumu ve piyasa göstergeleri gibi dış faktörlerle birleştiren bu hibrit yaklaşım, değişken enerji piyasalarında tahmin doğruluğunu artırmayı amaçlamaktadır. Model, hibrit bir VAR, LSTM ve GRU yapısı aracılığıyla karmaşık zamansal bağımlılıkları yakalar ve hava durumu ve piyasa değişkenleri ile desteklenen geçmiş elektrik fiyatı verileri üzerinde test edilir. Performans, ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hata (RMSE), simetrik ortalama mutlak yüzde hata (SMAPE) ve kök ortalama karesel logaritmik hata (RMSLE) kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, özellikle GRU olmak üzere derin öğrenme modellerinin MAE, RMSE ve RMSLE açısından VAR'dan daha iyi performans gösterdiğini ve mutlak ve göreceli tahmin görevleri için üstün tahmin doğruluğu sağladığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, SMAPE sonuçları VAR modelinin oransal hataları yakalamada daha iyi performans gösterdiğini vurgulamakta ve bu da değişken fiyat ortamlarında göreceli sağlamlığını ortaya koymaktadır. Hava durumu ve piyasa verilerinin dahil edilmesi, modelin sağlamlığını ve doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. Bu çalışmanın hibrit yaklaşımı, ekonometrik modellerin yorumlanabilirliği ile derin öğrenmenin tahmin gücünü birleştirerek dış faktörlerin enerji fiyatları üzerindeki etkisine dair içgörüler sunmaktadır. Model, dinamik piyasa ortamlarında enerji piyasası katılımcıları için daha iyi karar alma ve risk yönetimini desteklemektedir.

Keywords: Energy price forecasting, Gated Recurrent Unit (GRU), Long Short-Term Memory (LSTM), deep learning models, time series analysis.

Anahtar Kelimeler: Enerji fiyat tahmini, Geçitli Tekrarlayan Birim (GRU), Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM), derin öğrenme modelleri, zaman serisi analizi.

¹ Pamukkale University, Department of Economics, Denizli, Türkiye.
cemalo@pau.edu.tr.

1. INTRODUCTION

Electricity price prediction is a critical area of research that has gained significant attention due to the increasing complexity of power systems and the volatility of electricity markets. Accurate forecasting of electricity prices is essential for market participants, including utilities, consumers, and investors, as it directly impacts decision-making processes related to energy trading, consumption, and investment strategies. This essay explores various methodologies and approaches for predicting electricity prices, highlighting the challenges and advancements in the field.

The traditional methods for electricity price forecasting have primarily relied on time series analysis techniques, such as the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) (Zhang et al., 2018; Dash et al., 2019), vector auto-regression (VAR) (Meher, 2019) and Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity (GARCH) models (Liu et al., 2010). These models utilize historical price data to identify patterns and trends, allowing for estimating future prices based on past values. Similarly, Zhong discusses integrating deep learning techniques with traditional time series methods to enhance forecasting accuracy, particularly in complex power systems (Zhong, 2023). Nonetheless, the volatile and nonstationary nature of electricity price data often poses significant challenges for purely statistical approaches, leading researchers to seek more sophisticated methods (Lehna et al., 2022).

In response, advanced machine learning and deep learning models have gained prominence for their superior ability to capture nonlinearities in complex energy markets. Various neural network-based architectures have been proposed, each aiming to enhance day-ahead price accuracy. For instance, Deep Belief Networks (DBN) have been utilized to conduct deep feature extraction, showcasing robust predictive performance (Cao et al., 2022). Likewise, Recursive Neural Networks have been tailored for specific markets such as PJM, highlighting the role of temporal dependencies in volatile pricing environments (Mandal et al., 2010).

Recurrent Neural Networks (RNN), particularly Long Short-Term Memory (LSTM) networks, are frequently cited for their effectiveness in handling sequential data in electricity price forecasting. Their memory capabilities enable them to track evolving price dynamics more accurately over time (Uğurlu et al., 2018). Moreover, integrating LSTM with optimization algorithms—such as differential evolution—has proven beneficial for robust forecasting in rapidly fluctuating electricity markets (Peng et al., 2018).

Hybrid approaches that combine multiple techniques have further advanced the field. Guo and Zhao (2017) proposed a hybrid Bayesian-Fruit Fly Optimization-Least Squares Support Vector Machine (BND-FOA-LSSVM) model, emphasizing the value of optimization methods for improved forecast precision. Yao et al. (2021) similarly demonstrated that a backpropagation (BP) neural network optimized by Simulated Annealing Particle Swarm Optimization (SAPSO) can mitigate overfitting and expedite convergence in short-term price prediction.

Beyond electricity price forecasting, parallel research trends in predictive maintenance for machinery degradation also underscore the value of hybrid and deep learning

models. For example, Kara (2021) integrated deep learning with other methodologies to refine Remaining Useful Life (RUL) predictions, aligning with similar efforts in bearing performance (Geetha et al., 2024) and multi-stage degradation analysis (Sun et al., 2024; Wang et al., 2024). Such studies highlight the adaptability of deep architectures, including LSTM and attention-based transformers, which can be extended across diverse forecasting and prognostic tasks (Liang et al., 2024; Cao et al., 2024; Hu et al., 2024).

Finally, recent work by Zhong (2023) illustrates a unified model that integrates Artificial Neural Networks (ANN), LSTM, and transformer networks for load forecasting and electricity price prediction. This composite approach signals an emerging trend in EPF research: leveraging multiple neural architectures within a single framework to address the growing complexity of power markets.

Electricity price forecasting has gained significant attention due to the complexities of deregulated energy markets, driven by the integration of renewable energy, volatile supply-demand dynamics, and external influences like weather conditions. Traditional econometric models, like Vector Autoregression (VAR), offer the advantage of interpretability and can effectively model linear relationships among variables. However, they often fail to capture the nonlinear and nonstationary nature of electricity price data. On the other hand, deep learning models, such as Long Short-Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Unit (GRU), excel at capturing these complexities and identifying long-term dependencies, but they lack the transparency needed for informed decision-making. This study addresses these limitations by introducing a novel hybrid modeling framework that integrates econometric and deep learning approaches. The proposed method combines VAR's interpretability and temporal insights with LSTM and GRU's ability to model complex patterns and long-term trends, offering a comprehensive solution for electricity price forecasting.

Additionally, this research emphasizes the integration of external variables, such as weather and market data, which significantly enhance the model's robustness and prediction accuracy. Unlike previous studies that primarily focus on standalone econometric or deep learning models, this research highlights the synergy of combining both approaches, bridging a critical gap in the literature. The findings demonstrate that this hybrid framework outperforms traditional methods, providing more accurate forecasts and actionable insights for energy market participants. This not only contributes to advancing forecasting methodologies but also supports practical decision-making in the context of increasingly volatile and complex energy markets.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 presents a detailed overview of the dataset and the variables utilized for modeling; Section 3 introduces the methodology, as well as the deep learning techniques, namely LSTM and GRU models, used for forecasting; Section 4 discusses the empirical findings, highlighting the interplay between meteorological factors and energy market dynamics; finally, Section 5 concludes the study, summarizing the main insights and proposing directions for future research

2. DATA DESCRIPTION AND CHARACTERISTICS

This study uses a diverse dataset to forecast the electricity production and consumption of Estonian energy customers equipped with solar panels (Kaggle, 2024). The dataset includes various meteorological and market data, enabling an in-depth analysis of the factors influencing energy behavior. This section provides a detailed overview of the variables used for model development.

The dataset consists of time-series data, which includes weather information, energy market prices, and records of photovoltaic capacity installed by customers. Specifically, we focus on predicting the amount of electricity produced and consumed based on these variables. Table 1 presents the features included in the dataset.

Table 1. Summary of Variables Used in the Forecasting Model

Variable Name	Unit	Description
Electricity Price	Euros per megawatt hour (€/MWh)	The price of electricity in euros per megawatt-hour (MWh) on the day-ahead market.
Gas Price	Euros per megawatt hour (€/MWh)	The lowest and highest prices of natural gas on the day-ahead market for the trading day, are expressed in euros per megawatt-hour equivalent.
Temperature	Degrees Celsius (°C)	The temperature is measured at the end of each hour.
Dewpoint	Degrees Celsius (°C)	The dew point temperature is measured at the end of each hour.
Rainfall	Millimeters (mm)	The rainfall from large-scale weather systems during the hour.
Snowfall	Centimeters (cm)	The snowfall during the hour.
Surface Pressure	Hectopascals (hPa)	The air pressure at the surface.
Cloud cover [low/mid/high/total]	Percentage (%)	Cloud cover at different atmospheric levels is categorized into low (0-3 km), mid (3-8 km), and high (above 8 km), along with total cloud cover.
Windspeed	Meters per second (m/s)	The wind speed was measured at 10 meters above ground level.
Wind Direction	Degrees (°)	The wind direction at 10 meters above ground.
Shortwave Radiation	Watt-hours per square meter (Wh/m²)	The global horizontal irradiation.

Direct Solar Radiation	Watt-hours per square meter (Wh/m ²)	The direct solar radiation.
Diffuse Radiation	Watt-hours per square meter (Wh/m ²)	The diffuse solar irradiation.

This comprehensive set of variables allows us to create a robust model considering meteorological and economic factors. By integrating these features, the model aims to accurately predict energy production and consumption, facilitating better energy management strategies for solar panel customers.

Figure 1 illustrates the temporal evolution of various variables relevant to forecasting electricity production and consumption in October 2022 and April 2023. The graphs provide detailed visualizations of electricity and gas prices (in €/MWh), alongside meteorological data, including temperature (°C), dewpoint (°C), rainfall (mm), snowfall (mm), surface pressure (hPa), and cloud cover percentages at different altitudes (low, mid, high, and total). Additional variables such as wind speed (m/s), wind direction (°), shortwave radiation (W/m²), direct solar radiation (W/m²), and diffuse radiation (W/m²) are also presented.

The visualization reveals significant seasonal and temporal variations in these variables. For instance, temperature and solar radiation levels show a clear cyclic pattern corresponding to seasonal changes, peaking in summer and reaching their lowest in winter. The electricity price fluctuates significantly, with observable peaks in winter months, likely influenced by increased demand and variability in energy supply conditions. Gas prices also display a gradual downward trend over the observed period.

Meteorological elements like rainfall and snowfall exhibit sporadic yet notable peaks during colder months, particularly around winter. Wind speed and cloud cover percentages present fluctuations throughout the period, which could impact the efficiency and predictability of solar energy production. Understanding these temporal dynamics is essential for developing robust forecasting models that integrate these variables to accurately predict energy consumption and production patterns.

This comprehensive view of the data underscores the importance of considering economic and meteorological factors when modeling energy systems, especially for renewable energy sources like solar power that are heavily influenced by weather conditions.

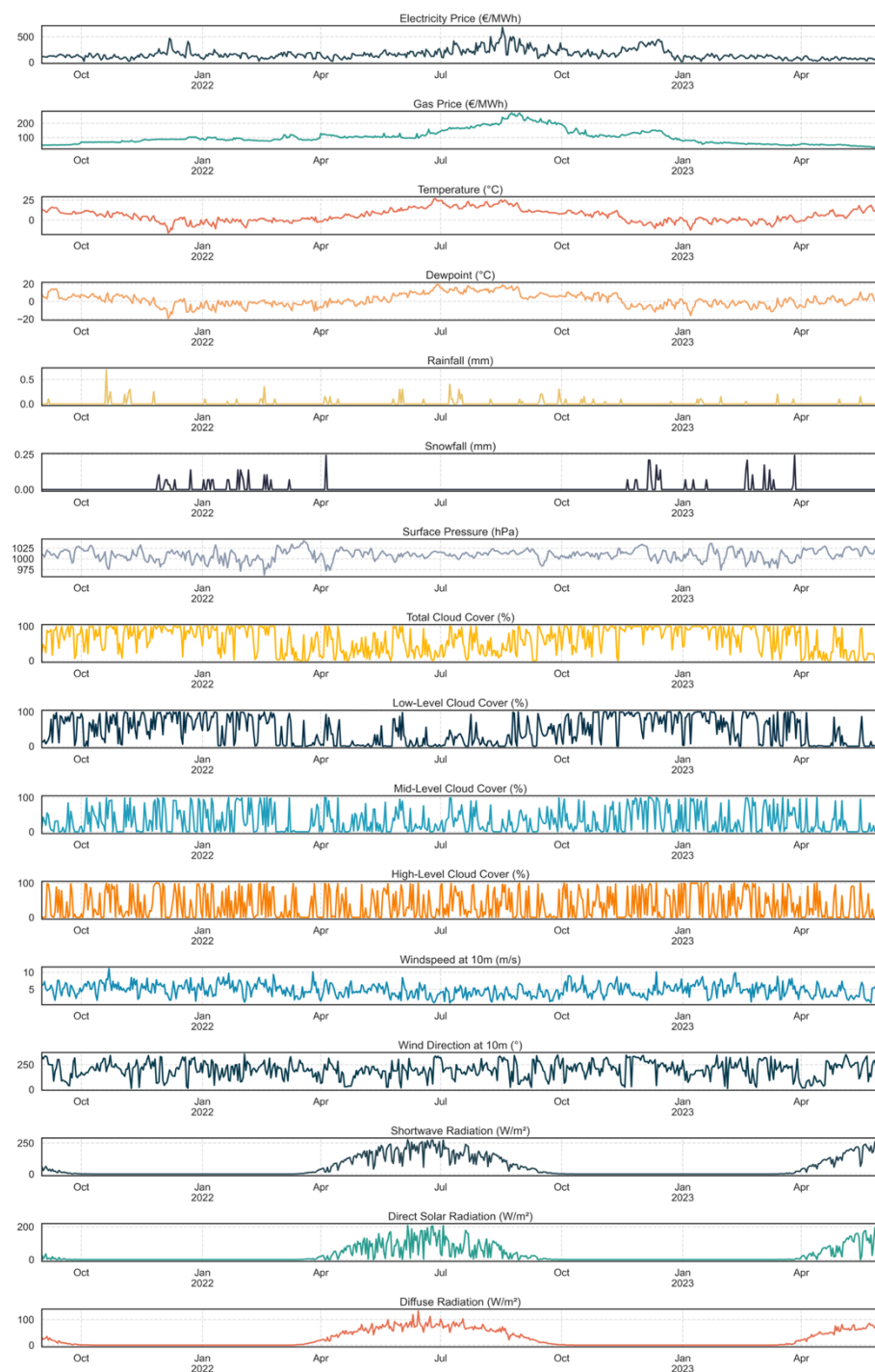


Figure 1. Temporal Patterns of Electricity Price, Weather, and Atmospheric Variables

Figure 2 presents histograms depicting the distribution of key variables in the dataset, including electricity prices, gas prices, temperature, and various meteorological variables such as cloud cover, rainfall, and solar radiation. These distributions provide critical insights into the variability and skewness of the data, which have important implications for model training and performance.

The histogram for electricity prices shows a right-skewed distribution, with most prices concentrated in the lower range and occasional extreme spikes. Gas prices and temperature follow more balanced, near-normal distributions, indicating less volatility compared to electricity prices. Other variables, such as rainfall, snowfall, and solar radiation, exhibit highly skewed distributions, with values clustered around low ranges and rare high-value occurrences. Cloud cover variables display bimodal or skewed patterns, reflecting distinct weather conditions. These visualizations highlight the diversity and complexity of the dataset, emphasizing the challenges of capturing extreme values and variable-specific behaviors in forecasting models.

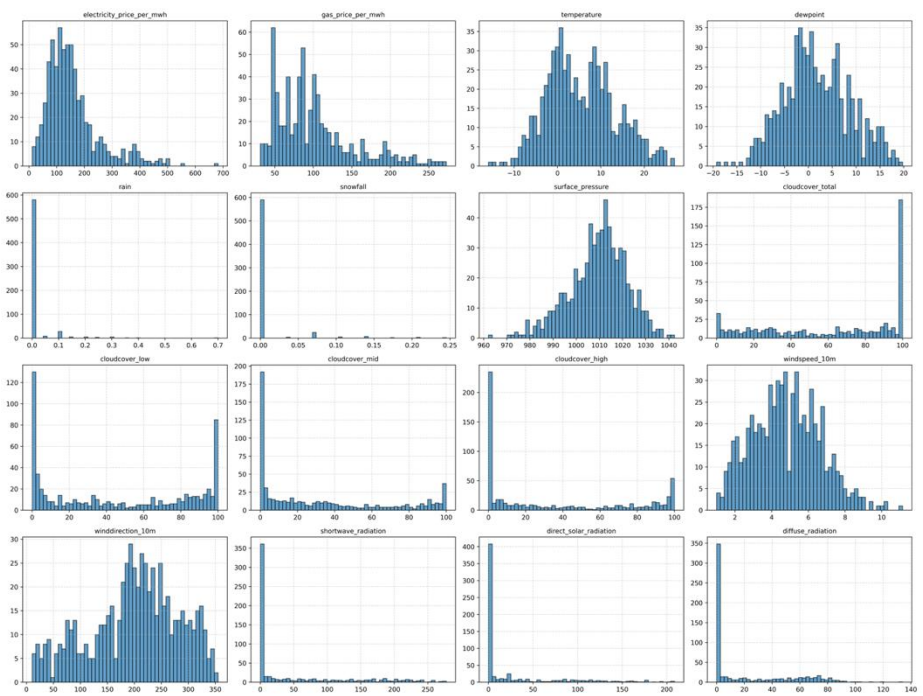


Figure 2. Distribution of Electricity Prices, Market Variables, and Meteorological Factors

Figure 3 presents the correlation matrix of the variables used in forecasting electricity production and consumption. The matrix visually represents the strength and direction of linear relationships between different variables. Positive correlations are indicated in shades of red, while negative correlations are represented in shades of blue. The intensity of the color corresponds to the magnitude of the correlation coefficient.

Key observations from the correlation matrix include a strong positive correlation between dewpoint and temperature (0,94), indicating that these variables tend to increase or decrease together. Similarly, shortwave radiation and direct solar radiation show a high positive correlation (0,95), which is expected as both are related to solar energy input. Conversely, surface pressure and temperature demonstrate a negative correlation (-0,27), suggesting that the other decreases as one increases. This correlation matrix is essential for understanding the relationships among variables, which can inform the selection of features for predictive modeling and highlight potential multicollinearity issues that may need to be addressed in the analysis.

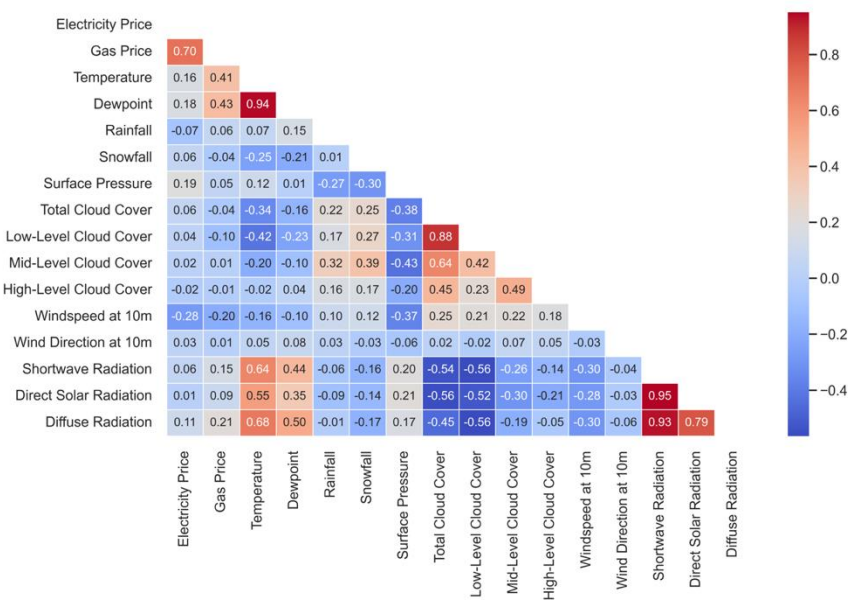


Figure 3. Correlation Matrix of Variables Influencing Electricity Production and Consumption

Figure 4 displays the feature importance values derived from the predictive model for forecasting electricity production and consumption. The bar chart highlights the relative significance of each variable in contributing to the model's performance. Higher values indicate a greater impact on the model's predictive capability.

The Gas Price variable stands out as the most influential factor, suggesting that fluctuations in gas prices significantly impact electricity production and consumption patterns. Other notable variables include Dewpoint, Surface Pressure, and Diffuse Radiation, indicating their relevance in the forecasting model. In contrast, variables such as Mid-Level Cloud Cover and Wind Direction appear to have a lower impact, contributing minimally to the model. This analysis is crucial for understanding which factors are most influential, guiding further refinement of the model by focusing on the most impactful features and potentially reducing complexity by excluding less relevant ones.

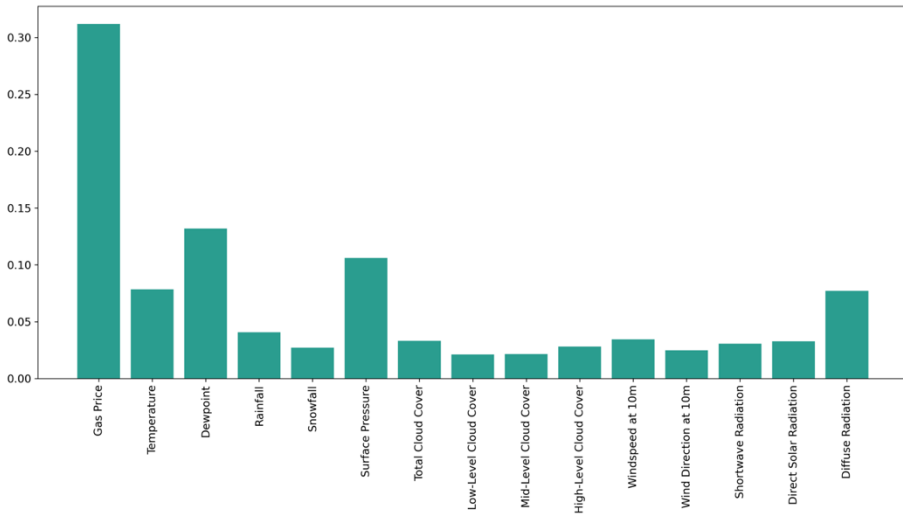


Figure 4. Feature Importance for Predicting Electricity Price

3. METHODOLOGY

The VAR model allows for the simultaneous modeling of multiple time series variables, where each variable is regressed on its own lagged values and the lagged values of other variables in the system. It is particularly effective when dealing with macroeconomic data, where multiple variables interact dynamically (Sims, 1980).

The primary advantage of VAR models is their ability to provide information about the direction and magnitude of the interactions between variables. Additionally, its dynamic structure allows using tools such as impulse response functions (IRFs) to analyze how variables respond to shocks within the system (Lütkepohl, 2005).

The VAR model is based on a system of equations where Y_t represents a vector of k time series variables. Each variable in the system is modeled as a function of its lags and the lags of the other variables. The model can be expressed as follows:

$$Y_t = A_1 Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \dots + A_p Y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (1)$$

where Y_t k -dimensional vector of time series variables, A_i $k \times k$ coefficient matrices for each lag, capturing the influence of past values of all variables in the system, p the lag length of the model, ε_t a vector of error terms or innovations, assumed to be white noise with zero mean and constant variance.

Long Short-Term Memory (LSTM) cells are highly relevant as they enable the model to capture both short-term fluctuations and long-term dependencies within the data. For instance, changes in weather patterns, market conditions, and other external factors that influence energy prices often exhibit both immediate and lingering effects. By leveraging the cell and hidden states in the LSTM, the model can effectively learn to

retain critical information across multiple time steps, which is crucial for accurate forecasting.

The forget, input, and output gates allow the LSTM to dynamically control the information flow, making it suitable for time series applications where relevant patterns may recur over varying time horizons. This capability aligns with the objectives of hybrid modeling approaches that integrate econometric and deep learning models for robust energy market predictions.

LSTM networks are Recurrent Neural Networks (RNN) designed to capture long-term dependencies in time series data. Due to their ability to retain information over long sequences, LSTM models have become a popular choice in time series forecasting, including in applications like energy price prediction, where complex dependencies exist between past prices, weather data, and other external factors (Chang et al., 2019; Zhou et al., 2019; Wang et al., 2020). LSTM networks were introduced to overcome the vanishing gradient problem associated with traditional RNNs. They are designed with memory cells that can store information for long periods, making them particularly effective for time series forecasting, where patterns may span over long data sequences (Hochreiter & Schmidhuber, 1997).

The architecture of an LSTM network includes three main gates: the input gate, the forget gate, and the output gate. These gates regulate the flow of information through the network, enabling it to selectively remember or forget information, which is critical in modeling the dependencies in sequential data like energy prices and their influencing factors (e.g., weather conditions, market dynamics) (Gers et al., 2000).

An LSTM model is composed of a series of LSTM cells. Cell State (c_t) represents the "memory" of the LSTM, storing relevant information over time. The cell state is updated based on the input and forget gates.

LSTM models use three gates to control the flow of information. Forget Gate (f_t) decides what information to discard from the cell state. It is defined as:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f), \quad (2)$$

where f_t is the forget gate output, W_f and b_f are the weight matrix and bias for the forget gate, h_{t-1} is the previous hidden state, x_t is the current input, and σ is the sigmoid activation function.

Input Gate determines which new information is stored in the cell state. It is expressed as:

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i), \quad (3)$$

where W_i and b_i are the weight matrix and bias vector for the input gate. The candidate values to be added are calculated as:

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c). \quad (4)$$

Output Gate decides the next hidden state based on the updated cell state:

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o), \quad (5)$$

where W_o and b_o are the weight matrix and bias vector for the output gate.

The hidden state is then:

$$h_t = o_t \cdot \tanh(c_t). \quad (6)$$

The cell state is updated based on the input and forget gates:

$$c_t = f_t \cdot c_{t-1} + i_t \cdot \tilde{c}_t. \quad (7)$$

These equations control what information is added to or removed from the memory, effectively allowing the model to capture and leverage long-term dependencies (Hochreiter & Schmidhuber, 1997).

Figure 5 illustrates the Long Short-Term Memory (LSTM) cell architecture, highlighting the roles of the forget, input, and output gates in managing both long-term (c_t) and short-term (h_t) memory states. This design allows the LSTM to retain relevant information over extended sequences. It is particularly effective for applications involving temporal data with complex dependencies, such as energy price forecasting influenced by external factors

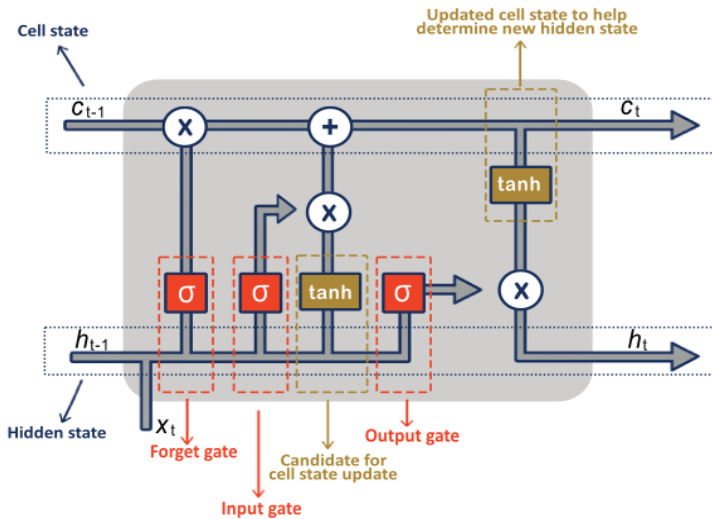


Figure 5. LSTM Cell Architecture: Gate Mechanisms for Long-Term and Short-Term Memory Management

In the context of energy price prediction, where long-term dependencies and temporal patterns play a significant role, the GRU model's gating mechanism allows it to capture these dependencies effectively without overcomplicating the model. The GRU can

focus on relevant time steps by selectively retaining or forgetting past information through the reset and update gates. It is suitable for modeling complex time series data such as energy prices influenced by external factors (e.g., weather data, market trends).

The GRU model is a variant of the Recurrent Neural Network (RNN) architecture designed to improve the learning of long-term dependencies. GRUs are particularly useful when computational efficiency is a priority, as they have fewer parameters than LSTM models while maintaining performance (Cho et al., 2014). GRU model's ability to efficiently capture dependencies in time series data makes it a powerful component in hybrid models that forecast complex energy markets. The GRU has fewer parameters than the LSTM, leading to faster training times and lower computational costs (Chung et al., 2014).

A GRU cell uses two main gates to manage information: the reset gate (r_t) and the update gate (z_t). These gates control what information is kept and what is discarded, allowing the GRU to manage long-term dependencies efficiently while minimizing computational complexity.

The reset gate determines how much of the past information (h_{t-1}) should be forgotten:

$$r_t = \sigma(W_r \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_r), \quad (8)$$

where W_r and b_r are the weight matrix and bias vector for the reset gate, σ is the sigmoid activation function, h_{t-1} is the previous hidden state, and x_t is the current input.

The update gate controls how much of the past information is retained and how much of the new information is added:

$$z_t = \sigma(W_z \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_z), \quad (9)$$

where W_z and b_z are the weight matrix and bias vector for the update gate.

The candidate hidden state ($\tilde{h}_t$) is computed based on the reset gate's influence:

$$\tilde{h}_t = \tanh(W_h \cdot [r_t * h_{t-1}, x_t] + b_h), \quad (10)$$

where r_t is the reset gate output, determining how much of the previous hidden state (h_{t-1}) contributes.

The final hidden state (h_t) is computed using both the update gate and the candidate hidden state:

$$h_t = (1 - z_t) * h_{t-1} + z_t * \tilde{h}_t. \quad (11)$$

This equation appropriately combines the previous hidden state and the new candidate state, balancing new and old information.

Figure 6 provides a detailed schematic representation of the GRU cell architecture, showcasing the role of its gating mechanisms—reset gate and update gate—in controlling information flow within the network. This figure visualizes how the GRU cell processes and combines the current input x_t and the previous hidden state h_{t-1} to produce an updated hidden state h_t , propagated forward in the sequence.

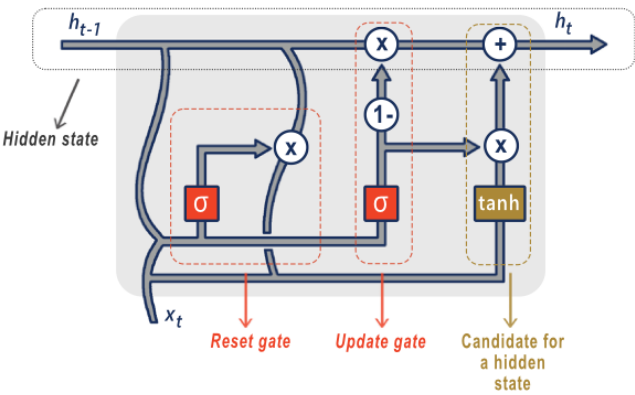


Figure 6. Schematic Representation of the GRU Cell and Its Gating Mechanisms

4. EMPIRICAL FINDINGS

This section presents the empirical results of analyzing the interaction between meteorological variables and energy market dynamics using multiple modeling approaches. To gain a comprehensive understanding, we employed the Vector Autoregression (VAR) model alongside Long Short-Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Units (GRU) methods. This combination of models allows for both statistical inference and advanced forecasting capabilities, enabling the extraction of valuable insights from the dataset.

The VAR model was used to analyze the dynamic interrelationships between variables, focusing on understanding how the past values of meteorological and market factors impact energy prices over time. Meanwhile, LSTM and GRU methods, known for their ability to handle sequential data, were used to make precise and long-term forecasts of electricity consumption and production patterns, leveraging their capability to capture long-range dependencies.

To prepare the dataset for the VAR model, several data preprocessing steps were undertaken to ensure data quality and feature selection, focusing on enhancing both the interpretability and statistical soundness of the model. Initially, the coefficient of variation (CV) was calculated for each variable in the dataset. This metric—computed as the ratio of the standard deviation to the mean—was used to assess the relative variability of each variable over time. Variables with a CV greater than 0,5 were retained for analysis, ensuring that the model captured only those variables with significant variability. This step helped eliminate static variables that could introduce noise rather than meaningful insights.

To address the potential issue of multicollinearity, a correlation matrix was computed, and columns with a correlation coefficient greater than 0,8 were dropped. By removing one variable from each pair of highly correlated features, the model was optimized to reduce redundancy and multicollinearity, ultimately improving the reliability of estimated relationships among variables.

In Table 1, the Augmented Dickey-Fuller (ADF) test is presented under two specifications: one with only a constant term ($ADF(c)$) and one with both a constant and a linear trend ($ADF(ct)$). The results show that several variables, including Rain, Snowfall, Total Cloud Cover, Mid-Level Cloud Cover, and High-Level Cloud Cover, appear to be strongly stationary in both specifications since their test statistics exceed the relevant critical values at the 1% level. In these cases, adding a trend component does not alter the conclusion that the series is stationary.

Conversely, Gas Price, Temperature, and Shortwave Radiation fail to reject the unit root hypothesis at conventional significance levels under both $ADF(c)$ and $ADF(ct)$. Thus, these three appear to be nonstationary in their current forms, suggesting potential benefits of differencing or transformation if they are to be used in models requiring stationarity. Electricity Price exhibits mixed results: it is significant under the constant-only specification at the 5% level but not under the constant+trend specification, indicating possible partial stationarity or sensitivity to trend. Overall, the ADF tests imply that some weather-related series (e.g., rainfall, snowfall, cloud cover) are level-stationary, while certain price measures and temperature data may require further transformation.

Table 2. ADF Test Results

Variable	$ADF(c)$	p –value	$ADF(ct)$	p –value
Electricity Price	-3,016**	0,0335	-3,024	0,1256
Gas Price	-1,393	0,5854	-1,413	0,8572
Temperature	-1,854	0,3540	-1,853	0,6786
Rain	-11,711***	0,0000	-14,410***	0,0000
Snowfall	-7,778***	0,0000	-7,772***	0,0000
Total Cloud Cover	-3,895***	0,0021	-3,967***	0,0098
Mid-Level Cloudcover	-14,072***	0,0000	-14,065***	0,0000
High-Level Cloud Cover	-15,098***	0,0000	-15,085***	0,0000
Shortwave Radiation	-1,463	0,5516	-1,519	0,8224

Notes: $ADF(c)$ refers to the test specification with constant, and $ADF(ct)$ refers to the specification with constant and trend. The reported test statistic values should be compared with the critical values at the 1%, 5%, and 10% significance levels to assess stationarity. For $ADF(c)$, the critical values are approximately -3,441 (1%), -2,866 (5%), and -2,569 (10%). For $ADF(ct)$, the critical values are approximately -3,973 (1%), -3,418 (5%), and -3,131 (10%). The maximum lag length was set to 12, and the final lag was determined by the significance of the last lagged dependent variable at the 10% level. Statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels is denoted by ***, **, and *, respectively.

Table 2 reports the Zivot–Andrews test, which allows for a single endogenously determined structural break. The results under the Level Break (*c*) and Level + Trend Break (*ct*) models show that Rain, Snowfall, Total Cloud Cover, Mid-Level Cloud Cover, High-Level Cloud Cover, and Electricity Price are statistically significant at least at the 5% level. This outcome suggests these variables become stationary once one accounts for a specific break date. For instance, Electricity Price has break dates around late 2022, and its *p*-values ($< 0,02$) confirm stationarity with a shift.

In contrast, Gas Price, Temperature, and Shortwave Radiation do not exhibit stationarity under either Zivot–Andrews model; their test statistics remain above the critical thresholds, and the corresponding *p* –values indicate that the unit root hypothesis cannot be rejected. While a break date is still computed (e.g., 2022-12-14 for Gas Price), the test statistic is insufficiently large in absolute value to confirm stationarity. Consequently, these variables likely contain a persistent unit root behavior, even when a single structural break is considered.

In the context of Vector Autoregression (VAR) modeling, stationarity is a critical assumption to ensure the validity of the analysis. Given that certain variables, such as Gas Price, Temperature, and Shortwave Radiation, were identified as non-stationary, their first differences were taken before their inclusion in the VAR model. This transformation ensures that all variables in the analysis satisfy the stationarity requirement, facilitating accurate and robust results.

Table 3. Zivot–Andrews Test Results

Variable	ZA(<i>c</i>)	<i>p</i> –value	Break Date	ZA(<i>ct</i>)	<i>p</i> –value	Break Date
Electricity Price	-5,168**	0,0167	2022-12-16	-5,478**	0,0153	2022-07-27
Gas Price	-3,217	0,8330	2022-12-14	-4,340	0,2926	2022-06-28
Temperature	-3,187	0,8459	2022-10-16	-3,422	0,8477	2022-11-12
Rain	-14,600***	0,0000	2022-05-25	-14,589***	0,0007	2022-05-25
Snowfall	-8,284***	0,0000	2022-11-19	-8,597***	0,0009	2022-02-22
Total Cloud Cover	-5,660***	0,0022	2022-09-12	-5,768***	0,0051	2022-09-12
Mid-Level Cloudcover	-14,429***	0,0000	2022-11-18	-15,072***	0,0007	2022-11-18
High-Level Cloud Cover	-15,294***	0,0000	2023-02-24	-15,714***	0,0007	2023-01-06
Shortwave Radiation	-3,668	0,5691	2022-08-14	-2,967	0,9691	2022-08-14

Notes: This table shows the Zivot–Andrews test results under two model specifications: Level Break (*c*) and Level and Trend Break (*ct*). The break date is endogenously determined and reported in the final column for each specification. Critical values for the level-break model (*c*) are approximately -5,276 (1%), -4,811 (5%), and -4,566 (10%), while for the level and trend model (*ct*) they are -5,576 (1%), -5,073 (5%), and -4,827 (10%). Statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels is denoted by ***, **, and *, respectively. A maximum of 12 lags was allowed, with the final lag determined at the 10% significance level for the last lagged dependent variable.

Figure 7 illustrates the decomposition of three non-stationary variables—Gas Price, Temperature, and Shortwave Radiation—into their respective components: original series, trend, and residuals. The decomposition highlights persistent trends and significant variations in the residuals for each series, consistent with the results presented in Tables 2 and 3. For Gas Price, the trend component shows distinct long-term fluctuations, likely influenced by external market dynamics, while the residuals reveal high-frequency variability that further supports non-stationarity. Similarly, Temperature exhibits pronounced seasonal trends that align with climatic cycles and irregular residuals indicative of stochastic influences. Finally, Shortwave Radiation displays distinct periodic trends, reflecting solar radiation patterns, with residuals capturing short-term anomalies.

The persistence of trends and irregularities in the residuals for all three variables supports the conclusion that these series are non-stationary in their current forms. This finding aligns with the Augmented Dickey-Fuller (ADF) test results, which fail to reject the null hypothesis of a unit root for these variables under constant-only and constant-with-trend specifications. Furthermore, the Zivot–Andrews test confirms that even after accounting for structural breaks, the unit root behavior remains for these variables, suggesting that differencing or transformation is necessary to achieve stationarity.

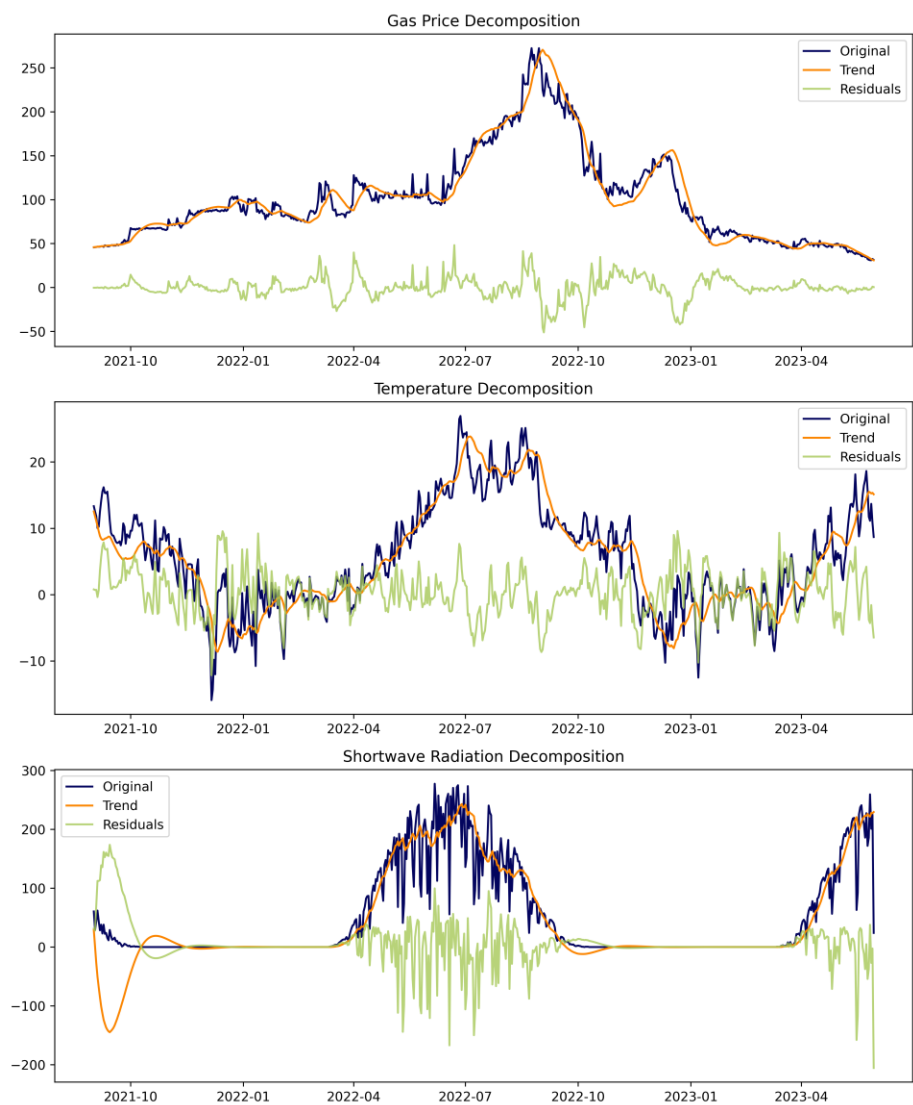


Figure 7. Decomposition of Non-Stationary Variables:
Gas Price, Temperature, and Shortwave Radiation

Figure 8 presents the historical and forecasted electricity prices in euros per megawatt hour (€/MWh), derived using the VAR model. The graph illustrates the historical and forecasted values, providing a comparative perspective on how the model predicts future electricity prices based on previous data. The forecasted prices and a 95% confidence region are displayed in the shaded orange area, highlighting the uncertainty range around the model's predictions.

The historical segment of the plot shows the variations in electricity prices over time, indicating seasonal patterns and volatility, which are crucial for understanding energy

market dynamics. The forecasted values extend into the future and suggest potential trends that decision-makers can use for planning and resource allocation. The wide confidence region in the forecast period signifies the uncertainty in predictions, emphasizing the influence of external factors on electricity prices. In this context, the VAR model’s strength lies in its ability to capture interdependencies between variables, providing insights into price movements and the associated risk.

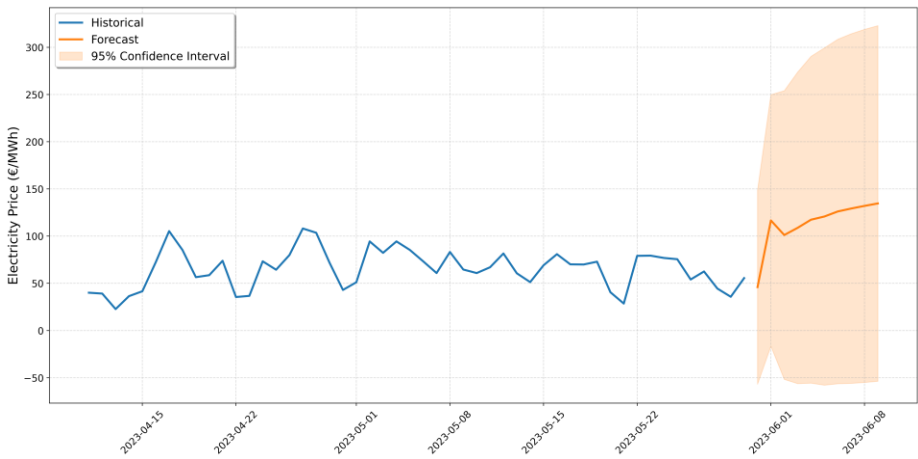


Figure 8. Historical and Forecasted Electricity Prices Using The VAR Model

Figures 16 to 24, presented in the appendix, display the impulse response functions (IRFs) for the variables included in the Vector Autoregression (VAR) model over a 10-step horizon. They illustrate how each variable responds to a shock in another variable over time. The responses are plotted over ten periods following an initial shock, with solid lines representing the estimated impulse response and dashed lines indicating the 95% confidence intervals.

The results reveal significant interactions between electricity prices and external factors such as gas prices, temperature, and shortwave radiation, highlighting the critical role of both market and climatic dynamics in energy pricing. Weather variables like cloud cover (total, mid-level, and high-level) demonstrate hierarchical feedback relationships, influencing each other and interacting with electricity and gas prices. Rain and snowfall, on the other hand, exhibit relatively isolated impacts with limited influence on the broader system.

These IRFs provide valuable insights into the magnitude and duration of shocks, showcasing the complex interdependencies in the energy-climate nexus. The figures collectively enhance the understanding of the temporal adjustments and feedback mechanisms governing electricity prices and related variables.

Figure 9 presents the Forecast Error Variance Decomposition (FEVD) analysis for the Vector Autoregression (VAR) model variables. The FEVD quantifies the proportion of the forecast error variance of each variable that can be attributed to shocks in the other

variables over time. This analysis provides insights into the relative importance of different shocks in explaining the variability of each variable in the model.

The y-axis represents the percentage contribution to the forecast error variance, while the x-axis indicates the forecast horizon (up to four periods). The bars represent the variance decomposition results, showing the contribution of each shock to the forecast error variance of a specific variable. For instance, the variance in electricity prices can be influenced by other factors such as temperature, gas price, and cloud cover.

This analysis is crucial for understanding the extent to which different factors, such as weather and energy market conditions, influence the variability of the forecasted outcomes. It highlights which variables have the most significant impact on the others, allowing for a deeper understanding of the dynamic relationships within the energy and meteorological dataset. This type of analysis is particularly useful for policymakers and energy analysts in identifying key drivers of variability and assessing the interconnectedness of different market and weather factors.

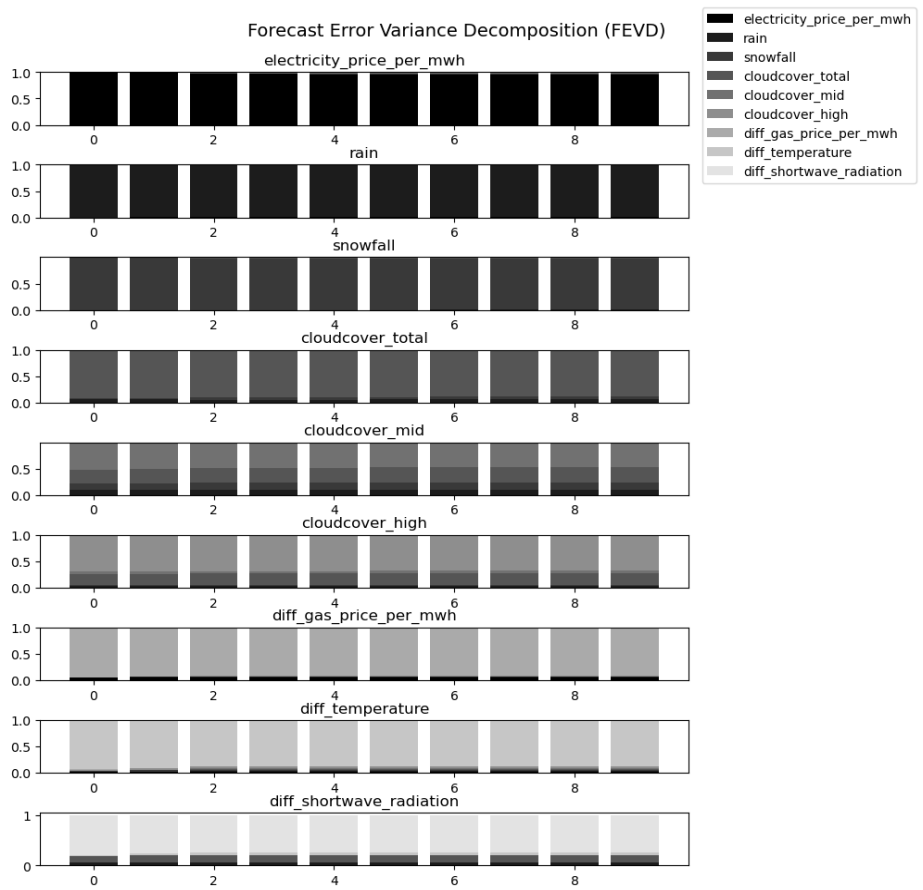


Figure 9. Forecast Error Variance Decomposition (FEVD) for Variables in the VAR Model

In this study, we implemented a Bidirectional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM) model for predicting energy prices based on historical time series data and external variables like weather and market factors. The Bi-LSTM model was constructed using the Keras library. The model consists of a bidirectional LSTM layer followed by dense layers, enabling the network to effectively capture past and future temporal dependencies. The first layer is a Bidirectional LSTM layer with 128 units. Bidirectionality allows the model to process information from both past and future states, improving its ability to understand complex dependencies in the time series data. Following the LSTM layer, the model includes two fully connected dense layers. The first dense layer has 64 units, acting as a feature abstraction layer, while the final dense layer outputs predictions with the required shape.

The hyperparameter selection for the Bi-LSTM model was performed using Bayesian Optimization from the `bayes_opt` Python package (Nogueira, 2014). This library provides a convenient and efficient framework for exploring the hyperparameter space and identifying optimal configurations for complex machine-learning models. Specifically, the Bayesian Optimization framework systematically searched the hyperparameter space, including learning rate (LR), batch size, and the number of epochs. This process identified the best combination of hyperparameters: an LR of approximately 0,022, a batch size of 167, and 97 epochs. The optimization utilized a predefined range for each parameter (e.g., LR: [1e-5, 1e-1], batch size: [16, 264], epochs: [10, 100]) and aimed to minimize the validation loss during training.

The optimized LR was implemented with the Adam optimizer, allowing the model to make stable and incremental weight updates, avoiding overshooting while ensuring convergence. The batch size 167 provided an efficient balance between computational speed and gradient stability. Similarly, 97 epochs were identified as the optimal duration to capture the data's underlying temporal dependencies without overfitting, as confirmed by the stable validation loss curve. These hyperparameters, determined through Bayesian Optimization, were subsequently validated using metrics such as Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), and Root Mean Squared Error (RMSE) on the test set, achieving robust predictive performance.

The model's performance over training epochs was visualized by plotting the training and validation loss curves (Figure 10). This plot provides insights into the convergence of the model. Training Loss is shown in solid blue, representing the model's error on the training set. Test Loss is shown in dashed orange, indicating how well the model generalizes to unseen data. Both loss curves were visualized to ensure the model did not overfit the training data. A stable or decreasing validation loss relative to the training loss indicates good generalization.

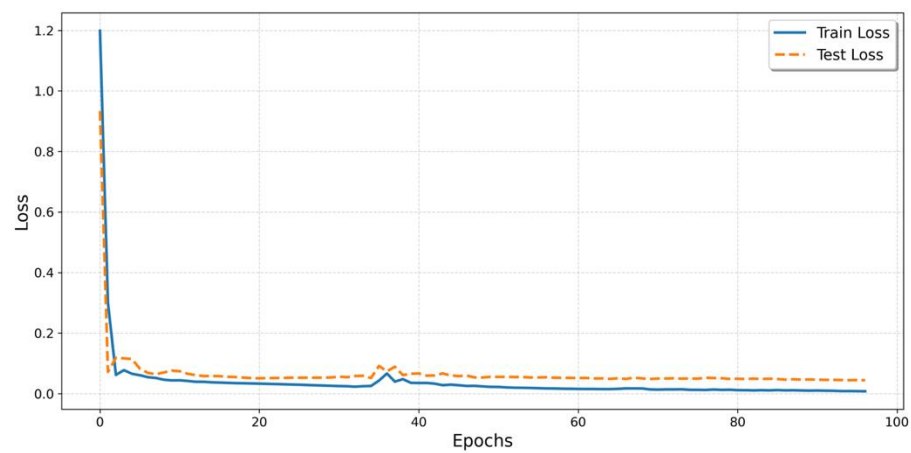


Figure 10. Training and Testing Loss Convergence for the LSTM Model

Figure 11 depicts the training performance of the Bi-LSTM model in forecasting electricity prices, comparing the real electricity prices (blue) and the predicted prices generated by the model (orange) over the training period. This visualization evaluates the model’s ability to learn temporal dependencies and the underlying dynamics of historical electricity price data, which are influenced by factors such as weather conditions, market fluctuations, and past price trends.

The figure highlights the Bi-LSTM model’s capability to closely align with real electricity prices, effectively capturing key trends, seasonal patterns, and significant price spikes during high-demand periods. The model demonstrates robust performance in tracking short-term price variations and long-term dependencies, underscoring its suitability for energy market forecasting. Furthermore, the model successfully predicts major price fluctuations, critical for operational decision-making and risk mitigation in volatile markets.

Although minor discrepancies are observed between the predicted and actual values, these deviations are consistent with the inherent volatility and noise in electricity price data. Such variability is typical in complex time series forecasting tasks. Overall, the results validate the Bi-LSTM model's effectiveness and reliability in accurately modeling and predicting electricity price movements during the training phase.

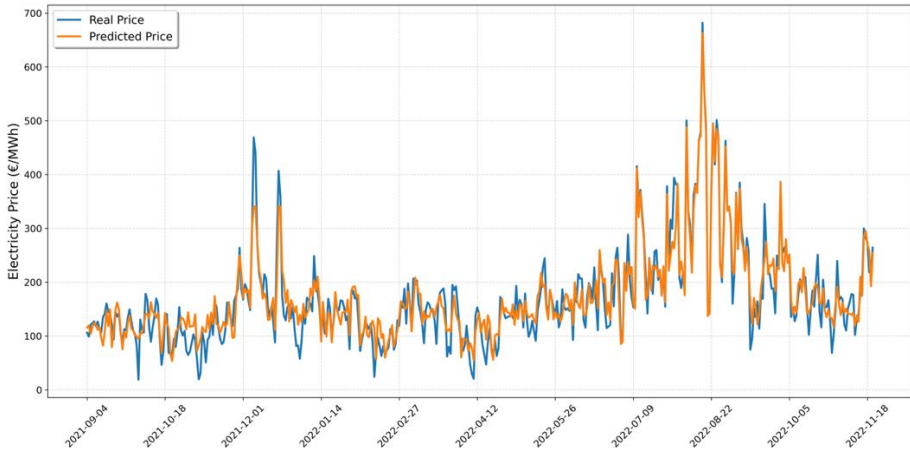


Figure 11. Training Results of the Bi-LSTM Model:
Comparison of Real and Predicted Electricity Prices

Figure 12 illustrates the testing performance of the Bidirectional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM) model, demonstrating its ability to forecast electricity prices on previously unseen data. The figure compares real electricity prices (blue) with the predicted prices generated by the model (orange) over the testing period. This phase evaluates the model's generalization capacity and predictive accuracy, which are critical for practical applications in dynamic energy markets influenced by factors such as weather conditions and market behavior.

During the testing phase, the Bi-LSTM model effectively captures the overall trend and trajectory of electricity prices, including the gradual decline observed in the data. This alignment between real and predicted values highlights the model's ability to generalize and adapt to new, unseen data, further validating its robustness in modeling long-term dependencies.

While the Bi-LSTM model demonstrates strong predictive performance, certain discrepancies are evident during periods of sharp price spikes and dips. These deviations are typical in forecasting volatile markets, where extreme price fluctuations can occur due to sporadic external factors. Despite these challenges, the model maintains a reasonable proximity to actual values, even during periods of significant variability. This indicates the Bi-LSTM model's suitability for forecasting tasks where trend recognition and adaptability are critical for operational decision-making.

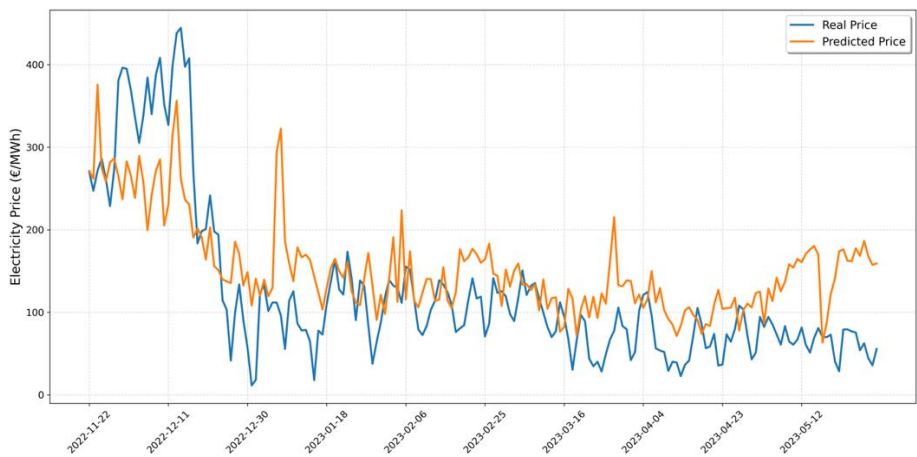


Figure 12. Testing Results of the Bi-LSTM Model:
Real vs. Predicted Electricity Prices

Figure 13 depicts the convergence behavior of the Gated Recurrent Unit (GRU) model during the training and testing phases. The training loss (solid blue) and testing loss (dashed orange) are plotted over 97 epochs, reflecting the optimization process. The loss metric used is Mean Squared Error (MSE), which effectively captures the prediction errors in continuous data, making it highly suitable for regression tasks like energy price forecasting.

The figure shows a sharp decline in training and testing loss during the initial epochs, indicating rapid learning of underlying patterns. After approximately 20 epochs, the losses stabilize, with the training loss gradually decreasing, while the testing loss remains relatively steady. This convergence pattern demonstrates that the model successfully generalizes to unseen data while avoiding overfitting, as evidenced by the consistent testing loss throughout the latter epochs. This highlights the effectiveness of the selected hyperparameters and the model's ability to learn temporal dependencies in the dataset.

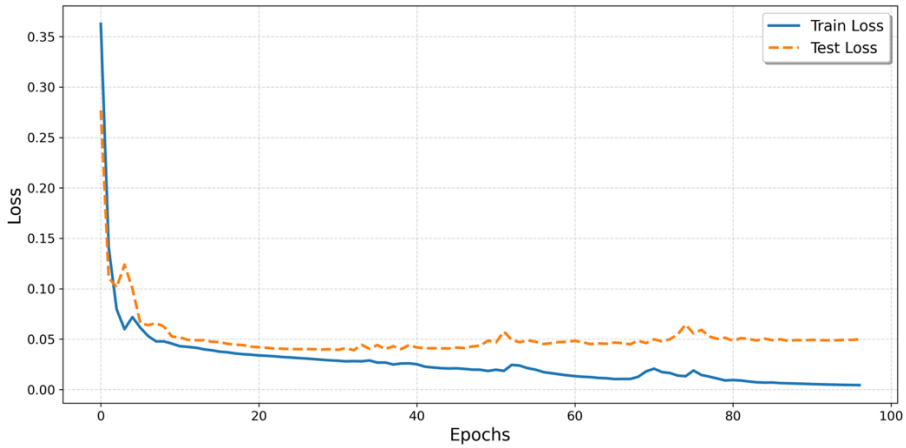


Figure 13. Training and Testing Loss Convergence for the GRU Model

This study developed a Gated Recurrent Unit (GRU) model to forecast energy prices using historical data and additional features such as weather conditions and market indicators. The GRU model was chosen for its capability to capture long-term dependencies, which is essential in energy markets where historical trends and external factors can significantly influence future price movements. The model architecture consists of two sequential GRU layers and fully connected (dense) layers. The first GRU layer contains 128 units, and the second GRU layer contains 64 units. The sequence is transformed into a final state representation that feeds into the dense layers, effectively learning both short-term fluctuations and long-term dependencies.

The dense layers following the GRU layers refine the extracted temporal features and produce the final predictions. The first dense layer consists of 128 units, a feature abstraction layer that reduces the data complexity. The subsequent two dense layers contain 32 units each, further simplifying the learned features and enhancing the model's generalization ability. The final output layer matches the target variable's dimensions, ensuring the model's predictions are compatible with the expected output format.

The hyperparameters for the GRU model were optimized using Bayesian Optimization to ensure an efficient and systematic search for the best configuration. This process explored the hyperparameter space for the learning rate (LR), batch size, and the number of epochs, ultimately selecting the following optimal values: a learning rate of 0,0021, a batch size of 191, and 97 epochs. These values were identified by minimizing the validation loss during training, resulting in a model that balances predictive accuracy and training efficiency.

The selected learning rate, implemented with the Adam optimizer, provides a stable convergence path, allowing for effective gradient updates without overshooting the optimal solution. The batch size of 191 offers a trade-off between computational efficiency and gradient stability, ensuring robust training on the diverse energy price dataset. Additionally, the training duration of 97 epochs was sufficient to capture complex temporal dependencies in the data while minimizing the risk of overfitting.

These hyperparameters, determined through Bayesian Optimization, improved the GRU model's ability to accurately forecast electricity prices, as evidenced by its strong performance across evaluation metrics such as MAE, RMSE, and MAPE.

Figure 14 presents the training performance of the Gated Recurrent Unit (GRU) model in forecasting electricity prices. This plot compares the real electricity prices and the predicted prices generated by the model over the training period. This comparison evaluates how well the GRU model learns the underlying patterns in historical energy price data, influenced by complex factors such as market conditions and weather variables.

In the training phase, the GRU model demonstrates a high alignment between the real and predicted electricity prices. The model captures the overall trend and seasonal fluctuations in the data, including major price peaks and troughs. It effectively learns both short-term and long-term dependencies within the dataset. This alignment is crucial for validating the model's ability to represent the dynamic behavior of electricity prices, which are known for their volatility and susceptibility to external influences.

While the GRU model performs well in capturing the general price movements, slight discrepancies are observed in areas with extreme price spikes. This is a common challenge in energy price forecasting due to the sudden and often unpredictable nature of these fluctuations. Nonetheless, the model maintains a close track of the actual values, which is indicative of robust training performance.

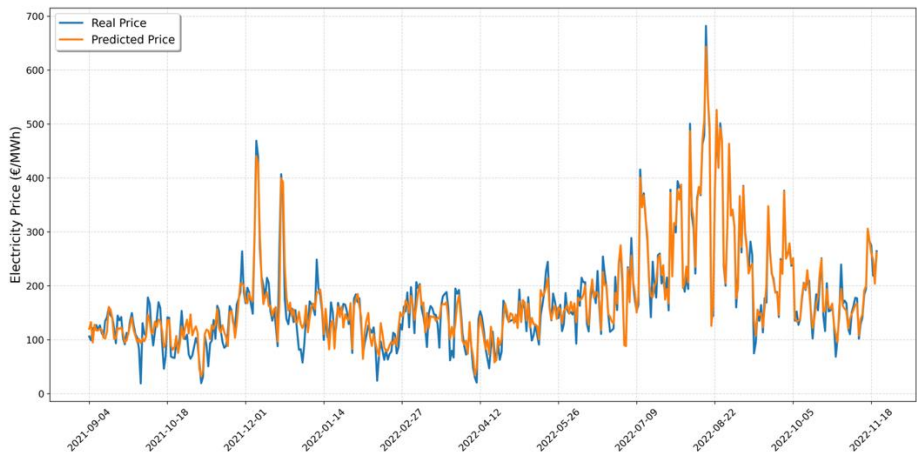


Figure 14. Training Results of the GRU Model:
Comparison of Real and Predicted Electricity Prices

Figure 15 illustrates the testing performance of the Gated Recurrent Unit (GRU) model in forecasting electricity prices, showcasing the comparison between real electricity prices (blue) and the predicted prices (orange) over the testing period. This phase evaluates the model's ability to generalize its learning to unseen data, which is critical for practical forecasting applications in volatile energy markets.

The GRU model effectively captures the overall trends in electricity prices, including the gradual decline observed during the latter part of the testing period. It successfully tracks major price fluctuations and general price trajectories, demonstrating its ability to model both short-term variations and long-term patterns. However, some discrepancies are evident, particularly during extreme price spikes, reflecting the challenges posed by the highly volatile and nonlinear dynamics of electricity markets.

Despite these deviations, the model achieves a reasonable alignment with real prices, maintaining its generalization capabilities. The consistent tracking of real values during stable periods emphasizes the model's robustness and reliability. This performance underscores the GRU model's utility in forecasting tasks, where accuracy and the ability to handle market volatility are paramount for informed decision-making and risk management.

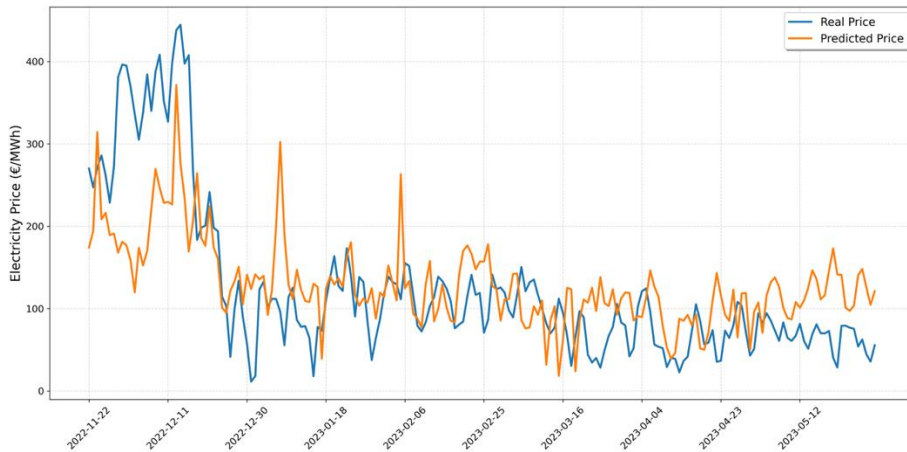


Figure 15. Testing Results of the GRU Model: Comparison of Real and Predicted Electricity Prices

Table 4 provides a multifaceted comparison of Vector Autoregression (VAR), Gated Recurrent Unit (GRU), and Long Short-Term Memory (LSTM) models, evaluated using four distinct performance metrics—Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE), Symmetric Mean Absolute Percentage Error (SMAPE), and Root Mean Squared Logarithmic Error (RMSLE). These metrics collectively offer insights into the models' ability to handle absolute deviations and relative or proportional errors across varying ranges of energy prices.

A key observation in Table 2 is the stark contrast in MAE and RMSE between the deep learning methods (GRU and LSTM) and the VAR baseline. Specifically, the MAE for GRU and LSTM hovers around 0,16–0,17, whereas VAR's MAE stands at approximately 35,57. This disparity implies that recurrent neural models capture price dynamics far more effectively, minimizing large forecast deviations and excelling at overall absolute accuracy. The RMSE values follow a similar pattern, with GRU and LSTM remaining close to 0,22, contrasting sharply with the VAR model's RMSE

surpassing 51,59. These findings underscore the advantage of non-linear sequence models in managing the inherent complexity and volatility of daily energy prices.

Despite their clear superiority in absolute terms, GRU and LSTM show higher SMAPE values (35,50% and 39,11%, respectively) compared to the VAR model’s 24,97%. This outcome indicates that, relative to moderate or lower price points, the deep learning models may introduce more pronounced percentage deviations. A plausible explanation lies in the data’s distribution: periods where energy prices approach certain lower bounds can yield smaller denominators, thus inflating proportional errors. While VAR suffers more in absolute measures, its more uniform percentage error suggests it balances deviations more consistently across different price levels.

When examining RMSLE, both GRU and LSTM outperform VAR considerably, suggesting superior handling of multiplicative or relative errors. Their RMSLE values of approximately 0,12–0,13 demonstrate an enhanced capacity to accommodate significant shifts in the price data, reflecting the flexibility of recurrent neural architectures in modeling non-linear dynamics. By contrast, VAR’s RMSLE of 0,35 implies that large log-scaled discrepancies occur more frequently, further highlighting the limitations of linear approaches in highly variable energy markets.

Table 4. Performance Metrics Comparison of VAR, LSTM, and GRU Models in Electricity Price Forecasting

Model	MAE	RMSE	SMAPE	RMSLE
VAR	35,5669	51,5929	24,97%	0,3479
GRU	0,1639	0,2233	35,50%	0,1275
LSTM	0,1735	0,2184	39,11%	0,1245

Table 2’s results emphasize two important implications for energy price forecasting. First, GRU and LSTM prove especially effective where mitigating large absolute deviations is paramount—such as in budgeting, trading, or bidding contexts that cannot tolerate large swings. Second, while VAR fares better in percentage-based errors (SMAPE), it exhibits significant weaknesses in overall accuracy and log-scale fit, making it less suitable for capturing abrupt or non-linear market shifts. Consequently, for stakeholders prioritizing minimal absolute errors, the deep learning models offer a robust solution, whereas contexts emphasizing proportional stability might still find certain advantages—albeit limited—in the VAR approach.

5. CONCLUSION

This study presents a hybrid framework integrating econometric (VAR) and deep learning models (LSTM and GRU) to address the challenges of electricity price forecasting in highly dynamic and volatile markets. By leveraging the strengths of both methodologies—VAR’s interpretability and the deep learning models’ capability to

capture nonlinear temporal patterns—this approach provides a robust solution for energy price prediction. The inclusion of weather and market variables further enhances the model's accuracy and adaptability, highlighting the importance of incorporating external factors in forecasting frameworks.

The findings highlight the superiority of deep learning models over the VAR approach in terms of absolute error metrics such as MAE and RMSE. The GRU model achieves the best performance with the lowest MAE and RMSE, followed closely by the LSTM model. Both deep learning approaches successfully capture the nonlinear temporal patterns and dependencies inherent in electricity price time series. However, the VAR model demonstrates relatively better performance in terms of SMAPE, indicating its ability to handle proportional errors effectively. Additionally, the RMSLE results underscore the deep learning models' capacity to manage extreme value fluctuations, with LSTM achieving the lowest RMSLE.

Despite the clear advantages of the deep learning models, their limitations in fully capturing sudden price spikes and drops remain a challenge. These extreme fluctuations, often driven by unpredictable market or environmental events, introduce volatility that is inherently difficult to model. While this study demonstrates that GRU and LSTM models possess strong generalization capabilities, a more detailed investigation into the impact of extreme values on their performance is necessary. Understanding these limitations will further enhance their applicability in real-world forecasting scenarios where robustness against extreme volatility is crucial.

The unique contribution of this study lies in its hybrid framework, which combines the interpretative power of econometric models with the predictive accuracy of deep learning models. This dual approach not only enhances the robustness of predictions but also provides a structured and interpretable tool to inform policy-making and strategic decisions in energy markets. Furthermore, the inclusion of weather and market data proves critical in capturing the multifaceted nature of electricity price fluctuations, emphasizing the importance of external variables in improving forecasting accuracy. This aligns with existing hypotheses suggesting that environmental and market factors are key drivers of energy price variability.

In a broader context, these findings underscore the importance of adopting hybrid methodologies to address the challenges posed by complex and volatile data structures in electricity markets. By successfully integrating econometric and deep learning methods, this study contributes a novel framework for energy forecasting with implications for risk management, operational efficiency, and policy development in energy-intensive industries.

Future research directions include refining the hybrid models by incorporating additional factors such as real-time demand-supply imbalances, seasonal variations, or geopolitical influences. Exploring advanced architectures, such as attention mechanisms or transformer-based models, could further enhance predictive accuracy. Moreover, expanding datasets to include high-frequency and real-time market data would provide deeper insights into rapid shifts in energy prices, enabling more responsive and robust forecasting systems tailored for dynamic market environments.

Research and Publication Ethics Statement

This research adheres to established standards of research and publication ethics.

REFERENCES

- Cao, M., Wang, Y., Liu, J., Yin, Z., Guo, X., & Ren, X. (2022). Day ahead electricity price forecasting based on the deep belief network. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2022/3960597>
- Cao, H., Xiao, W., Sun, J., Gan, M. G., & Wang, G. (2024, July). Fusing data-and model-driven methods for RUL prediction in smart manufacturing systems. *2024 43rd Chinese Control Conference (CCC)*, 6945–6949. IEEE.
- Catalão, J. P. S., Mariano, S. J. P. S., Mendes, V. M. F., & Ferreira, L. A. F. M. (2007). Short-term electricity prices forecasting in a competitive market: A neural network approach. *Electric Power Systems Research*, 77(10), 1297–1304. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.09.022>
- Chughatta, K. (2023). Short-term electricity price forecasting using EEMD and GRU-NN. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 7(4), 420–427. <https://doi.org/10.59287/ijanser.772>
- Chung, J., Gulcehre, C., Cho, K., & Bengio, Y. (2014). Empirical Evaluation of Gated Recurrent Neural Networks on Sequence Modeling. *ArXiv*. <https://arxiv.org/abs/1412.3555>
- Dash, S. K., & Dash, P. K. (2019). Short-term mixed electricity demand and price forecasting using adaptive autoregressive moving average and functional link neural network. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(5), 1241–1255. <https://doi.org/10.1007/s40565-019-0535-0>
- Gers, F. A., Schmidhuber, J., & Cummins, F. (2000). Learning to forget: Continual prediction with LSTM. *Neural Computation*, 12(10), 2451–2471. <https://doi.org/10.1162/089976600300015015>
- Geetha, G., Shanthini, C., & Geethanjali, P. (2024). Non-conventional feature-based LSTM model for prediction of bearing performance degradation. *Engineering Research Express*. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad8d33>
- Grifa, M. (2018). Electric energy price forecasting: Descriptive analysis and features selection. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 117(1), 15. <https://doi.org/10.12732/ijpam.v117i1.15>
- Guo, W., & Zhao, Z. (2017). A novel hybrid BND-FOA-LSSVM model for electricity price forecasting. *Information*, 8(4), 120. <https://doi.org/10.3390/info8040120>
- Hamilton, J. D. (2020). *Time series analysis*. Princeton University Press.

- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Hu, G., Fu, S., Zhong, S., Lin, L., Liu, Y., Zhang, S., & Guo, F. (2024). Remaining useful life prediction of mechanical equipment based on time-series auto-correlation decomposition and CNN. *Measurement Science and Technology*. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad5c8c>
- Kaggle. (2024). *Predict energy behavior of prosumers* [Data set]. Retrieved November 4, 2024, from <https://www.kaggle.com/competitions/predict-energy-behavior-of-prosumers/data>
- Kara, A. (2021). A hybrid prognostic approach based on deep learning for the degradation prediction of machinery. *SAUCIS*, 4(2), 216-226. <https://doi.org/10.35377/saucis.04.02.912154>
- Lütkepohl, H. (2005). *New introduction to multiple time series analysis*. Springer.
- Lago, J., De Ridder, F., & De Schutter, B. (2018). Forecasting spot electricity prices: Deep learning approaches and empirical comparison of traditional algorithms. *Applied Energy*, 221, 386-405. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.069>
- Lehna, M., Scheller, F., & Herwartz, H. (2022). Forecasting day-ahead electricity prices: A comparison of time series and neural network models taking external regressors into account. *Energy Economics*, 106, 105742. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105742>
- Liu, X., Shen, J., & Li, Y. (2010). A generalized auto-regressive conditional heteroskedasticity model for system marginal price forecasting based on weighted double Gaussian distribution. *Power System Technology*, 34, 139-144.
- Liang, J., Liu, H., & Xiao, N. (2024). A hybrid approach based on deep neural network and double exponential model for remaining useful life prediction. *Expert Systems with Applications*, 249, 123563. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123563>
- Mandal, P., Senjyu, T., & Funabashi, T. (2006). Neural networks approach to forecast several hour ahead electricity prices and loads in deregulated market. *Energy Conversion and Management*, 47(15-16), 2128-2142. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.11.015>
- Mandal, P., Srivastava, A. K., Senjyu, T., & Negnevitsky, M. (2010). A new recursive neural network algorithm to forecast electricity price for PJM day-ahead market. *International Journal of Energy Research*, 34(6), 507-522. <https://doi.org/10.1002/er.1569>
- Marín, J. B., Orozco, E. T., & Velilla, E. (n.d.). Forecasting electricity price in Colombia: A comparison between neural network, ARMA process and hybrid models.

- Meher, S. (2020). Estimating and forecasting residential electricity demand in Odisha. *Journal of Public Affairs*, 20(3), e2065. <https://doi.org/10.1002/pa.2065>
- Muniain, P., & Ziel, F. (2020). Probabilistic forecasting in day-ahead electricity markets: Simulating peak and off-peak prices. *International Journal of Forecasting*, 36(4), 1193–1210. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.11.006>
- Nogueira, F. (2014). Bayesian Optimization. Retrieved from <https://github.com/fmfn/BayesianOptimization>.
- Peng, L., Liu, S., Liu, R., & Wang, L. (2018). Effective long short-term memory with differential evolution algorithm for electricity price prediction. *Energy*, 162, 1301–1314. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.052>
- Sims, C. A. (1980). Macroeconomics and Reality. *Econometrica*, 48(1), 1–48. <https://doi.org/10.2307/1912017>
- Su, H., Peng, X., Liu, H., Quan, H., Wu, K., & Chen, Z. (2022). Multi-step-ahead electricity price forecasting based on temporal graph convolutional network. *Mathematics*, 10(14), 2366. <https://doi.org/10.3390/math10142366>
- Sun, A., Miao, X., Xu, K., & Jia, C. (2024). An adaptive method for predicting bearing remaining useful life across various degradation stages. *Measurement Science and Technology*, 36(1), 016154. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad903e>
- Uğurlu, U., Öksüz, İ., & Taş, O. (2018). Electricity price forecasting using recurrent neural networks. *Energies*, 11(5), 1255. <https://doi.org/10.3390/en11051255>
- Wang, J., Du, Y., & Wang, J. (2020). LSTM based long-term energy consumption prediction with periodicity. *Energy*, 197, 117197. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117197>
- Wang, D., Gryshova, I., Kyzym, M., Salashenko, T., Khaustova, V., & Shcherbata, M. (2022). Electricity price instability over time: Time series analysis and forecasting. *Sustainability*, 14(15), 9081. <https://doi.org/10.3390/su14159081>
- Wang, Y., Lu, K., Dong, R., Fan, Y., & Jiang, X. (2024). Review of rolling bearings performance degradation trend prediction. *Noise & Vibration Worldwide*, 55(11), 585–604. <https://doi.org/10.1177/09574565241282690>
- Xie, X., Li, M., & Zhang, D. (2021). A multiscale electricity price forecasting model based on tensor fusion and deep learning. *Energies*, 14(21), 7333. <https://doi.org/10.3390/en14217333>
- Xuan, H., Nepal, R., & Jamasb, T. (2020). Electricity market integration, decarbonization and security of supply: Dynamic volatility connectedness in the Irish and Great Britain markets.

- Yan, L., Yan, Z., Li, Z., Ma, N., Li, R., & Qin, J. (2023). Electricity market price prediction based on quadratic hybrid decomposition and THPO algorithm. *Energies*, *16*(13), 5098. <https://doi.org/10.3390/en16135098>
- Yao, M., Xie, W., & Mo, L. (2021). Short-term electricity price forecasting based on BP neural network optimized by SAPSO. *Energies*, *14*(20), 6514. <https://doi.org/10.3390/en14206514>
- Zareipour, H., Canizares, C., & Bhattacharya, K. (2010). Economic impact of electricity market price forecasting errors: A demand-side analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, *25*(1), 254–262. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2030380>
- Zhang, J., & Cheng, C. (2008, October 6–7). Day-ahead electricity price forecasting using artificial intelligence. In *Proceedings of the Electric Power Conference* (pp. 1–5). Vancouver, BC, Canada. <https://doi.org/10.1109/EPC.2008.4763350>
- Zhang, J., Wei, Y., Li, D., Tan, Z., & Zhou, J. (2018). Short term electricity load forecasting using a hybrid model. *Energy*, *158*, 774–781. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.012>
- Zhong, B. (2023). Deep learning integration optimization of electric energy load forecasting and market price based on the ANN–LSTM–transformer method. *Frontiers in Energy Research*, *11*, 1292204. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1292204>
- Zhou, S., Zhou, L., Mao, M., Tai, H., & Wan, Y. (2019). An optimized heterogeneous structure LSTM network for electricity price forecasting. *IEEE Access*, *7*, 108161–108173. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932999>

APPENDIX

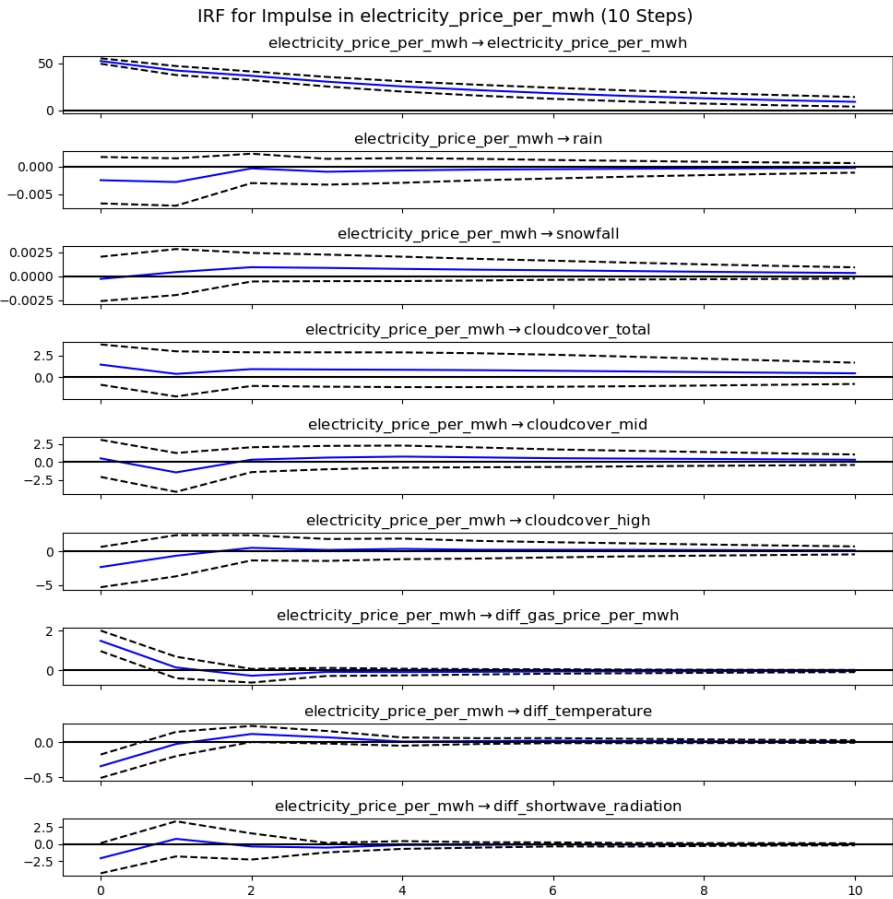


Figure 16. Impulse Response Function (IRF) for Electricity Price

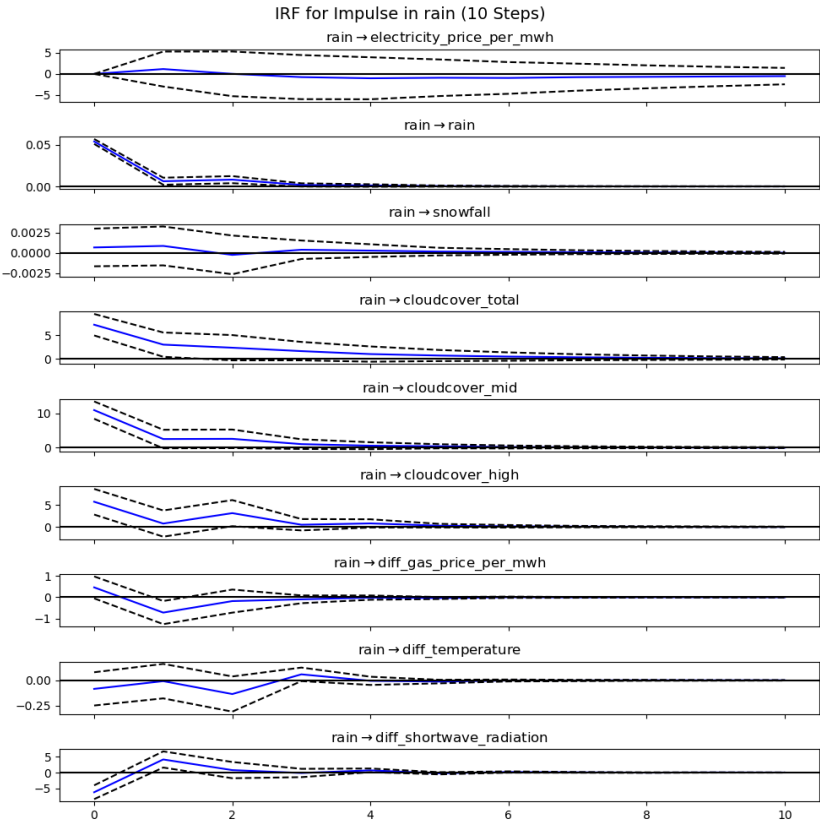


Figure 17. Impulse Response Function (IRF) for Rain

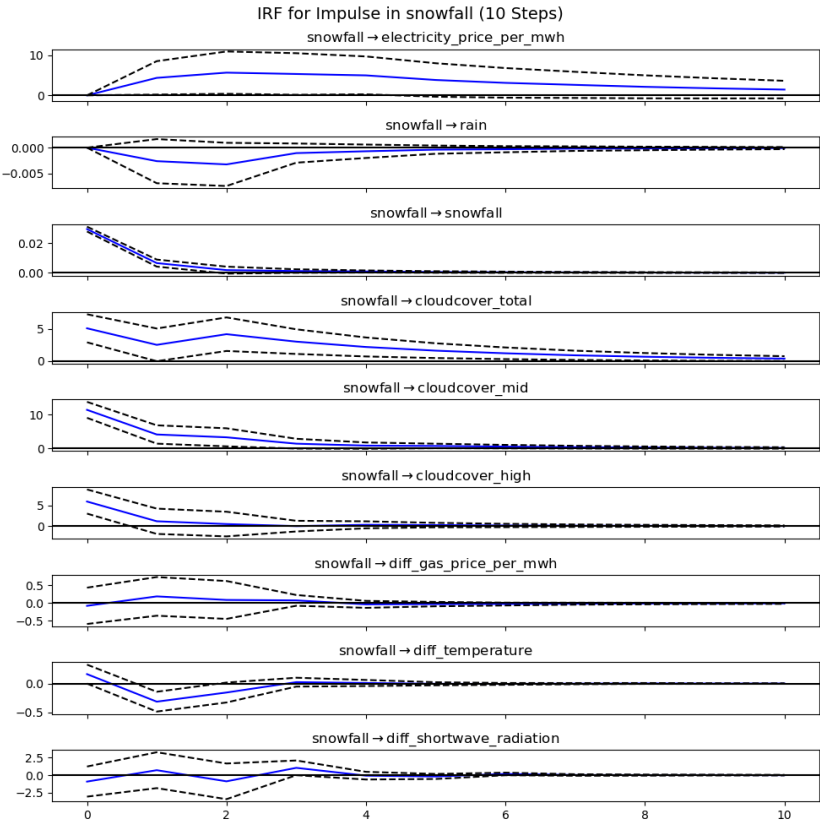


Figure 18. Impulse Response Function (IRF) for Snowfall

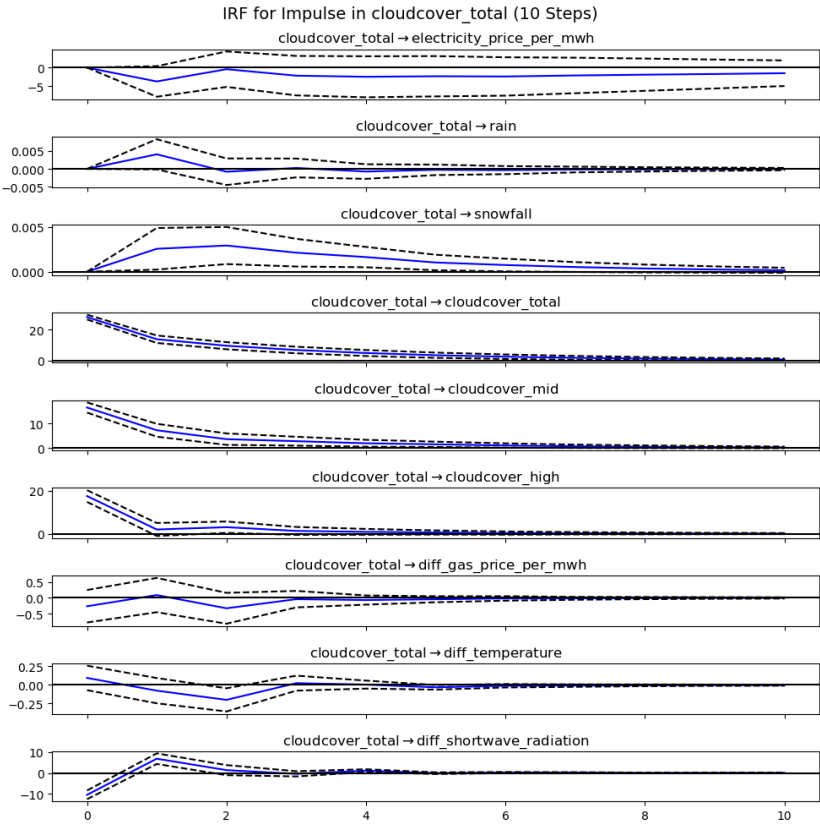


Figure 19. Impulse Response Function (IRF) for Total Cloud Cover

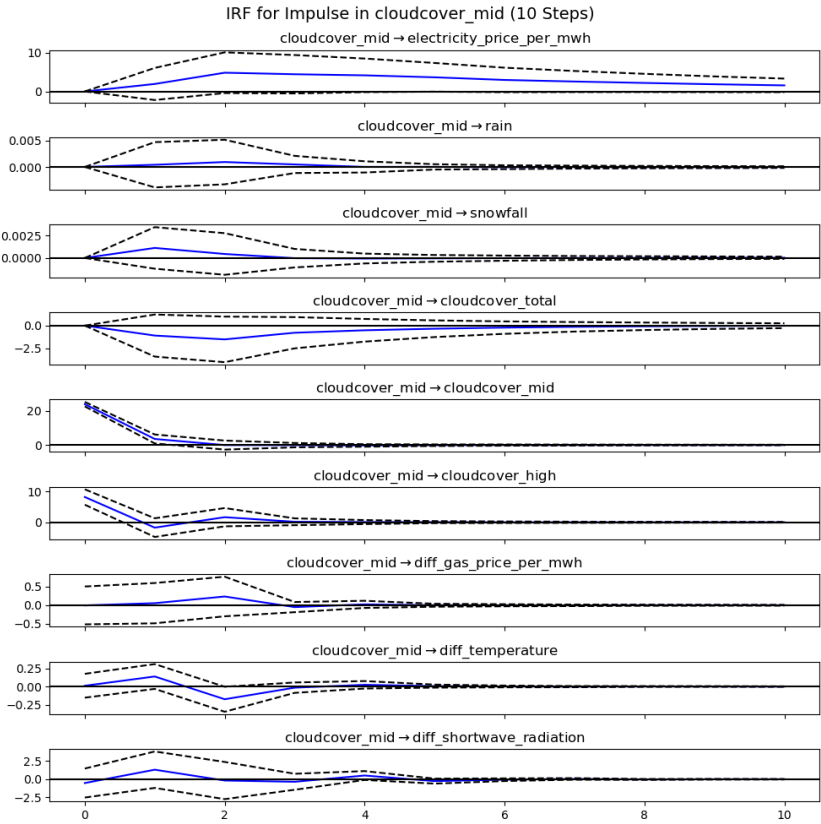


Figure 20. Impulse Response Function (IRF) for Mid-Level Cloud Cover

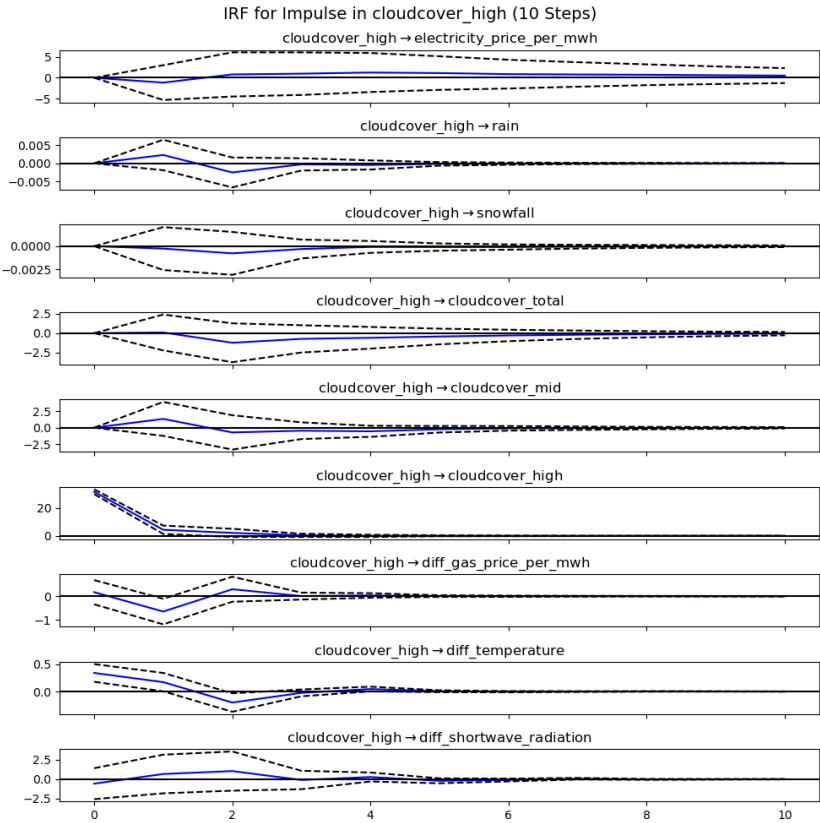


Figure 21. Impulse Response Function (IRF) for High-Level Cloud Cover

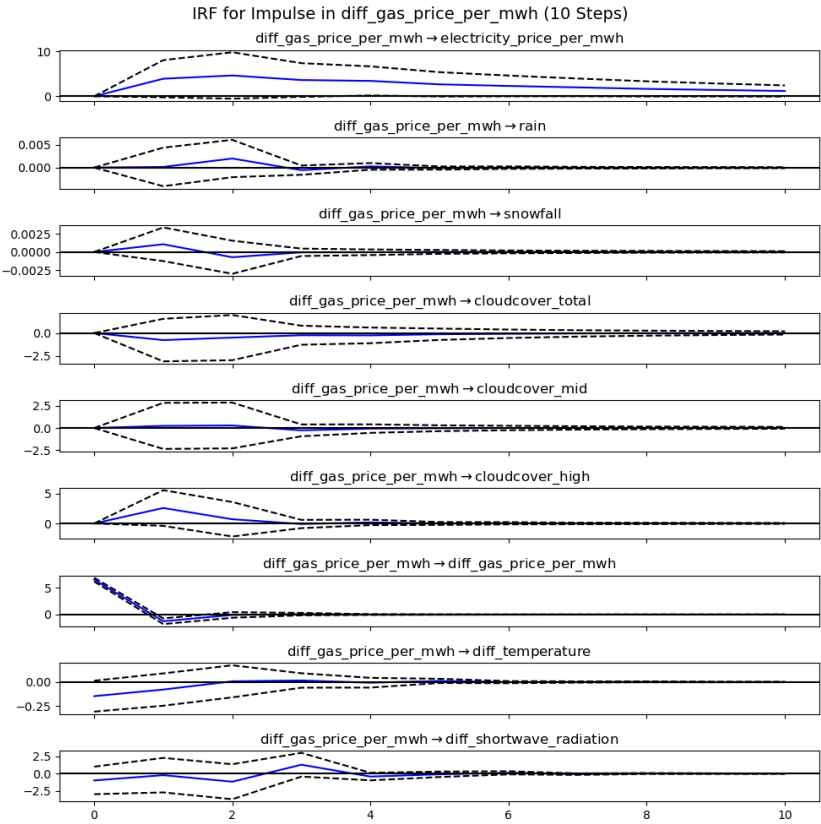


Figure 22. Impulse Response Function (IRF) for Gas Price (Differenced)

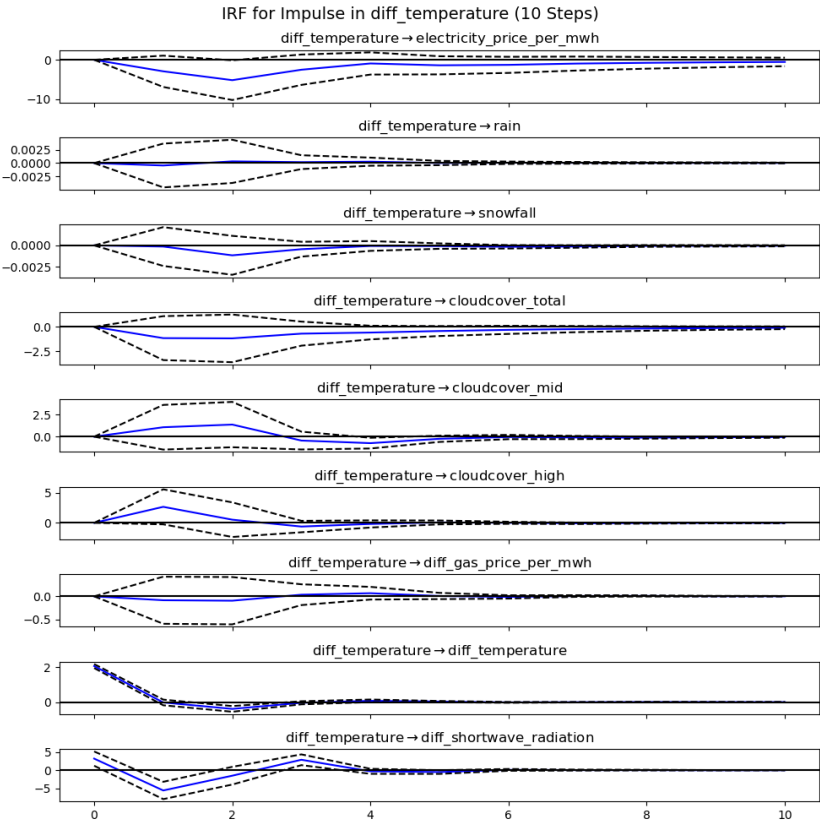


Figure 23. Impulse Response Function (IRF) for Temperature (Differenced)

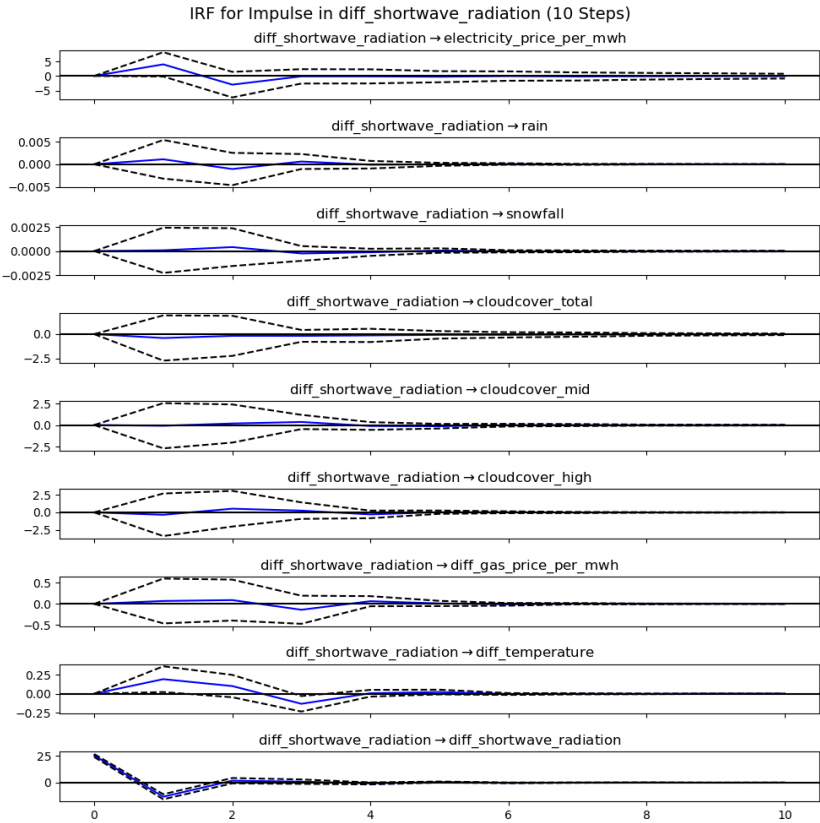


Figure 24. Impulse Response Function (IRF) for Shortwave Radiation (Differenced)



Research Article / Araştırma Makalesi

PERFORMANCE COMPARISON OF SMOTE-BASED MACHINE LEARNING MODELS ON UNBALANCED DATASETS: A STUDY ON DATE AND PISTACHIO FRUITS

SMOTE TABANLI MAKİNE ÖĞRENME Sİ MODELLERİNİN DENGESİZ VERİ KÜMELERİ ÜZERİNDE PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI: HURMA VE ANTEP FISTIĞI MEYVELERİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Fatih BAL¹

Fatih KAYAALP²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1597150>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
fatihbal@klu.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
06.12.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
20.03.2025

Accepted
(Kabul Tarihi)
25.03.2025

Abstract

Creating balanced datasets is a significant challenge that substantially affects the performance of machine learning models in the classification of agricultural products. In this research, we tried to overcome this challenge by using an unbalanced dataset containing information on 7 date palm (*Phoenix dactylifera* L.) and 2 pistachio (*Pistacia vera* L.) cultivars. The aim of the study is to compare the classification performance of machine learning models on an unbalanced dataset and a balanced dataset using the SMOTE technique. Initially, classification was performed on the unbalanced dataset using machine learning approaches. Among the machine learning models applied on the unbalanced dataset, the Linear-SVM model showed the highest accuracy rate with an accuracy rate of 92,62%. In the data set extended by applying the SMOTE technique, the RBF-SVM model again showed the highest accuracy rate with 95,55% accuracy rate. In summary, our study highlights the difficulties in machine learning-based agricultural crop classification due to data unbalances. Utilizing the SMOTE technique for oversampling was effective in overcoming this obstacle and improving classification accuracy.

Keywords: Machine learning, SMOTE, fruit classification, oversampling.

Öz

Dengeli veri kümeleri oluşturmak, tarımsal ürünlerin sınıflandırılmasında makine öğrenimi modellerinin performansını önemli ölçüde etkileyen önemli bir zorluktur. Yapılan bu çalışmada, 7 hurma (*Phoenix dactylifera* L.) ve 2 Antep fıstığı (*Pistacia vera* L.) çeşidine ait bilgileri içeren dengesiz bir veri kümesi kullanarak bu zorluğun üstesinden gelinmeye çalışılmıştır. Çalışmanın ana hedefi, makine öğrenmesi modellerinin dengesiz veri kümesi ve SMOTE tekniği ile dengelenmiş veri kümesi üzerindeki sınıflandırma başarılarını karşılaştırmaktır. Başlangıç olarak, dengesiz veri kümesi üzerinde makine öğrenimi yaklaşımları kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Dengesiz veri kümesinde uygulanan makine öğrenmesi modelleri içerisinde %92,62 doğruluk oranı ile en yüksek doğruluk oranını Linear-SVM modeli göstermiştir. SMOTE tekniği uygulanarak genişletilen veri kümesinde ise %95,55 doğruluk oranı ile en yüksek doğruluk oranını RBF-SVM modeli göstermiştir. Özetle, çalışmamız makine öğrenimi tabanlı tarımsal ürün sınıflandırmasında veri dengesizliklerinden kaynaklanan zorlukların altını çizmektedir. Aşırı örnekleme için SMOTE tekniğinden yararlanmak, bu engelin üstesinden gelmede ve sınıflandırma doğruluğunu artırmada etkili olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Makine öğrenmesi, SMOTE, meyve sınıflandırma, aşırı örnekleme.

¹ Kırklareli University, Faculty of Engineering, Department of Software Engineering, Kırklareli, Türkiye.
fatihbal@klu.edu.tr

² Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Düzce, Türkiye.
fatihkayaalp@duzce.edu.tr

1. INTRODUCTION

Dates (*Phoenix dactylifera L.*) are the fruit of the date palm tree. Being the dominant species of the Phoenix genus, these plants belong to the Aceraceae family, commonly known as the palm family, holding significant importance (Echegaray et al., 2023). The encompass around 200 types and over 2500 species worldwide (Koklu et al., 2021). Dates hold great agricultural significance in numerous parts of the world, particularly in the Middle East, North Africa, and Pakistan (Yıldız, 2019). Kirmizi Pistachio (*Pistacia vera L.*), also known as Antep Fistigi, is a variety of nut commonly grown in Mediterranean and Middle Eastern countries (Çağlar et al., 2017). It is a small tree or shrub that produces a greenish-yellow fruit, which is the actual nut. Enclosed within a hard, woody shell, the fruit splits open upon ripening to reveal the nut inside. The nut is oval or oblong-shaped, displaying a greenish-brown color with a wrinkled surface. Siirt Pistachio (*Pistacia vera L.*) native to the Siirt and Sanliurfa provinces in Turkey (Aydın, 2018), is another type of nut. It is also referred to as Siirt Pistachio or simply Siirt Pist. Although it bears similarities to Antep Fistigi, it is considered a distinct cultivar with a unique flavor profile. Like many other fruits, *date* and *pistachio* can be classified using machine learning (ML) techniques based on their genetic varieties. For instance, genetic variety features such as fruit eccentricity, roundness, compactness, solidity etc., can be utilized for fruit classification. The classification process primarily relies on using images of the fruits as the training dataset. Features are extracted from these images, and a classifier is trained using the features to classify the fruits. Machine learning (ML) techniques can be utilized to perform this classification task. To select the most suitable method, it is crucial to test the dataset. Additionally, factors such as dataset size, number of features, and data characteristics also influence the method selection.

This study aims to reduce the negative effects of classifying unbalanced datasets. The unbalanced dataset used in this study exhibits an unbalanced distribution of images of different fruit types. In machine learning, unbalanced datasets lead to problems such as poor generalization, reduced efficiency and inaccuracy. To remove the unbalance and achieve a balanced data distribution, the SMOTE oversampling technique was applied. The use of the SMOTE oversampling technique aims to balance the dataset by equalizing the number of samples from minority classes with the number of samples from the class with the highest number. The main objective of this research is to improve the classification and subclassification accuracy of ML models when working with unbalanced data sets. To study and improve the classification performance of machine learning models on both unbalanced and balanced datasets, the study consists of two phases. In the first phase, we investigate the performance of machine learning methods on unbalanced datasets. In the second stage, the performance of machine learning models on the balanced dataset after applying SMOTE is analyzed.

For the purpose of this study, data on the genetic characteristics of dates and pistachios were collected from various sources. In order to classify and compare these data, the performances of seven different machine learning models such as Decision Tree, Random Forest, Logistic Regression, Support Vector Machine, Multi-Layer Perceptron, K-Nearest Neighbor and Naive Bayes were examined. Performance measures such as accuracy, balanced accuracy, precision, sensitivity, specificity, F1-

score and ROC analysis of all models were calculated and compared to evaluate the effectiveness of ML models.

In the context of agricultural product classification, this study is one of the studies that analyze in detail the effect of imbalanced datasets on classification performance and how SMOTE balances this effect. Examining the effect of SMOTE on subclasses in a multi-class problem and verifying data integrity with JSD differentiates this study from the existing literature. While it is common in literature to use SMOTE for one-class or two-class datasets, this study performs a detailed analysis on the classification of 9 different fruit varieties.

Within the scope of the study, the research on similar studies is described in the second section. In the third section, the dataset used and the numerical and percentage distribution of the data according to the classes are given. The working principle of the SMOTE technique proposed in the study and the classification performances of the ML methods examined are also explained under this heading. Hyperparameter optimization is also presented in this section. In the fourth section, the criteria used to measure the classification performance of ML methods are explained. The classification performance results of ML methods are presented in detail in this section. In the fifth section, the results are evaluated. The architecture of the proposed model is summarized in Figure 1.

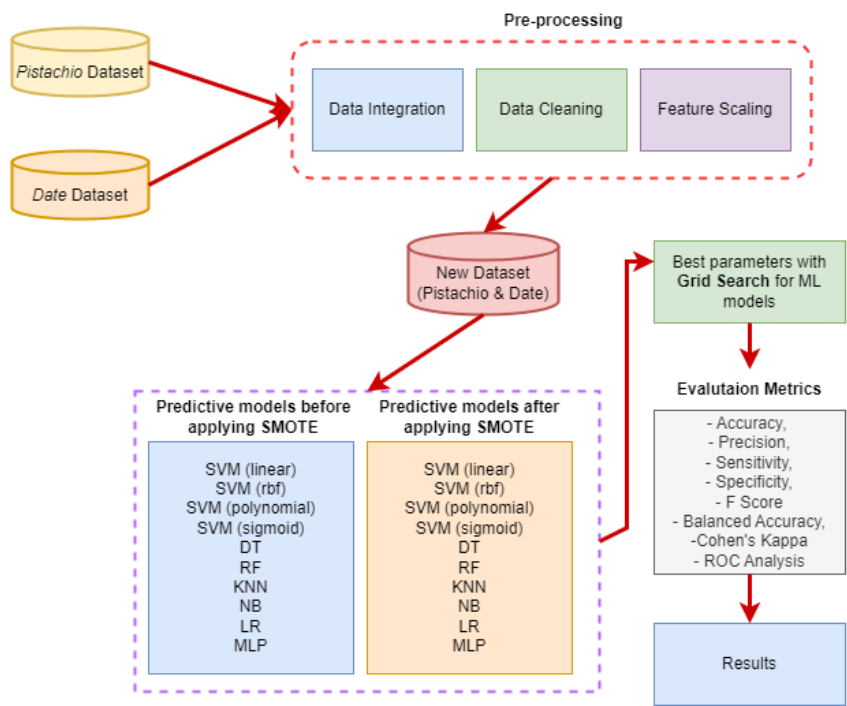


Figure 1. The Architecture of the Proposed Model for This Study.

2. LITERATURE REVIEW

Similar studies and applications are analyzed in this section of the study. The focus was on the performance of ML methods based on SMOTE. In a study conducted by Chemchem et al., wheat yield dataset was predicted using classical ML methods and ML methods combined with SMOTE over-sampling. The ML methods used in the study were Support Vector Machine (SVM), k-Nearest Neighbor (KNN), Gradient Boosting, Adaptive Boosting (AdaBoost), Decision Tree (DT), Random Forest (RF), Multi-Layer Perceptron (MLP), and Naïve Bayes (NB). The best result among the classical ML methods was achieved with RF, which had an accuracy ratio of 99,40%. Similarly, the best result for the combined SMOTE sampling based ML methods was also obtained with RF, measuring 99,22% (Chemchem et al., 2019). Xiao et al. studied corn disease identification using an improved Gradient Boosting Decision Tree (GBDT) method. They generated synthetic data by applying SMOTE sampling to the corn disease dataset. The performance of GBDT method was compared with other ML methods, such as Logistic Regression (LR), Linear SVM, Radial Basis Function (RBF) SVM, DT, and NB. The accuracy ratio of the GBDT method was measured as 92.51% (Xiao et al., 2019). In another study, Recurrent Neural Networks (RNN), Long Short-Term Memory (LSTM), Gated Recurrent Unit (GRU) were applied to tomato powdery mildew disease. The best accuracy among methods was achieved with RNN for the unbalanced dataset, measuring 89,80%. For the unbalanced dataset, both LSTM and GRU methods achieved the same accuracy of 56% (Varshney et al., 2021). A study conducted by Divakar et al., aimed to detect plant disease using a deep learning method. The unbalanced apple disease dataset was balanced using SMOTE over-sampling. The study examined the performance of several pre-trained CNN models for the apple disease classification. Among these models, DenseNet achieved the highest accuracy ratio of 92,88% (Divakar et al., 2021). Wang et al. proposed the prediction of chronic obstructive pulmonary disease (COPD) using unbalanced data. After evaluating the performance of classical ML methods, SMOTE over-sampling was applied to the unbalanced dataset. Among the classical ML methods, natural gradient boosting (NGBoost) achieved the highest accuracy rate of 91,1%. After applying SMOTE sampling, Extreme Gradient Boosting (XGBoost) achieved an accuracy rate of 80,5% (Wang et al., 2023). An application was developed by Bhardwaj et al., for the prediction of wine quality using ML methods. They generated 2381 samples from 12 original samples using the SMOTE method. RF, XGBoost, AdaBoost, KNN, and DT methods were used for the study. The best accuracy among the methods was achieved by AdaBoost and RF, both with an accuracy ratio of 100% (Bhardwaj et al., 2022). In another study conducted by Umer et al., the analysis of scientific paper citation was performed using textual features and SMOTE re-sampling techniques. ML models such as Extra Tree Classifier (ETC), DT, LR, AdaBoost, SVM, and RF were utilized in the study. The best accuracy ratio was achieved by ETC with 98,28% (Umer et al., 2021). Çelik et al., conducted a study on text classification using re-sampling techniques with SMS data. LR, KNN, SVM, DT, RF, XGBoost, and ANN models were used in the study. The dataset included spam, advertisement, and normal SMS data. LR yielded the best results when the SMOTE technique was applied to the SMS data. The accuracy ratio of LR was 80,07% (Çelik, 2020).

The summary of literature has presented the performances of classical ML methods using SMOTE techniques. The accuracy ratios of all examined studies were checked.

In this current study, ML methods based on SMOTE sampling were developed to classify different types of *dates* and *pistachios*.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. Materials

The data used for this study are the data shared by (Koklu et al., 2021). There are 34 genetic varieties of 7 different date fruits, which include Kirmizi Pistachio (*K_PISTA*), Siirt Pistachio (*S_PISTA*), Barhee (*Berhi*), Deglet Nour (*Deglet*), Sukkary (*Dokol*), Rotab Mozafati (*Iraqi*), Ruthana (*Rotana*), Safawi (Safavi) and Sagai (*Sogay*), resulting in a total of 3046 date and pistachio fruit data. The number of data points and the percentage of the classes for date and pistachio fruits in the unbalanced dataset are given in Table 1. The list of features used for genetic varieties of fruits is given in Table 2. The plot showing the unbalanced distribution of the dataset is displayed in Figure 2. To examine the performance of ML methods, 80% of the data is allocated for training, and 20% is reserved for testing.

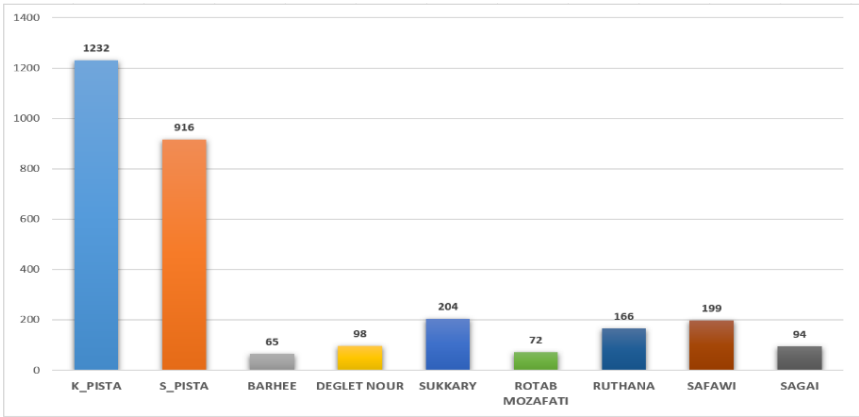


Figure 2. The Data Distributions of *Dates* and *Pistachios* on the Unbalanced Dataset.

Table 1. Number of Fruit Species Data in the Unbalanced Dataset.

Fruit Names	Total Data Number	The Percentage of the Data
Barhee	65	0,021339
Deglet Nour	98	0,032173
Sukkary	204	0,066973
Rotab Mozafati	72	0,023637
Ruthana	166	0,054497
Safawi	199	0,065331
Sagai	94	0,030860
Kirmizi Pistachio (K PISTA)	1232	0,404464
Siirt Pistachio (S PISTA)	916	0,300722

<i>TOTAL</i>	<i>3046</i>	<i>1,000000</i>
---------------------	--------------------	------------------------

Table 2. The Feature Names of Fruits’ Genetic Varieties

Major Axis	Skew RR	Kurtosis RR
Minor Axis	Skew RG	Kurtosis RG
Eccentricity	Skew RB	Kurtosis RB
Equivalent Diameter	Roundness	Mean RR
StdDev RR	Compactness	Mean RG
StdDev RG	Shape Factor 1	Mean RB
StdDev RB	Shape Factor 2	Extent
Solidity	Shape Factor 3	Aspect Ratio
Perimeter	Shape Factor 4	

3.2. Hyperparameter Tuning of ML Methods

Optimizing hyperparameters in a machine learning (ML) algorithm is an essential part of the training process and is considered a fundamental practice for achieving effective implementation (Belete & Huchaiah, 2022). There are several hyperparameter optimization (HPO) algorithms. Some of these include Grid Search, Random Search, Bayesian Search, and Genetic Algorithms. In this study, the Randomized Search algorithm (RSA) has been used. The main purpose of RSA is to sample a certain number of value configurations in the hyperparameter space. This technique allows better exploration of the hyperparameter space when the number of combinations can be very large (Sher et al., 2023). RSA reduces the computational burden associated with combinations of values in the hyperparameter space and reaches the optimum values by random sampling (Anugerah Simanjuntak et al., 2024). This random sampling helps to avoid local optima that trap deterministic methods such as Grid Search (Boyd et al., 2024).

Significant changes were observed in the performance measures of the models after hyperparameter optimization. Especially for SVM, C and Gamma parameters significantly affected the accuracy rates by determining the decision boundaries of the model. The RBF kernel function gave the most successful result on the multi-class imbalanced dataset. In the Random Forest model, the number of trees and the splitting criterion (Gini/Entropy) are important factors, and it was observed that the Gini criterion gave better results after SMOTE. In the KNN model, the number of neighbors, distance criterion (Manhattan) and weighting (Distance) choices increased the success of the model. The number of hidden layers and the activation function (Tanh) were critical variables in the MLP model. The analysis shows that hyperparameter optimization plays an important role in improving model accuracy and generalization ability.

In this study, since the combination of values in the hyperparameter space is large, the optimal hyperparameters are determined by Random Search. Additionally, cross validation was applied during the HPO of all ML models, and a cross-validation value of 5 was chosen. HPO was conducted on a machine equipped with 64 GB RAM, and NVIDIA GeForce RTC 3060 graphics cards, and running on the Ubuntu operating system.

3.3. Proposed Method

Classifying unbalanced datasets has long been a significant challenge in machine learning. One effective approach to convert unbalanced datasets into balanced ones is through the application of the SMOTE technique. The Synthetic Minority Over-Sampling Technique is a widely adopted statistical method to handle class unbalance in machine learning (Özdemir et al., 2021). This technique was first introduced by (Chawla et al., 2002). and was inspired by a method developed by Ha and Bunke in 1997 (Ha & Bunke, 1997), which was successful in handwriting recognition tasks. Rather than using traditional data augmentation techniques like image rotation, as proposed by Ha & Bunke, SMOTE focuses on augmenting each individual sample from the minority class. The SMOTE method helps balance class distributions by generating synthetic instances for the minority class (Yavaş et al., 2020). These synthetic samples are created through interpolation between existing minority class samples and incorporated into the balanced dataset. This technique helps to balance the class distribution and reduces the model’s bias toward the majority class. The steps of the SMOTE method are outlined in Table 3, and its formula (1) is provided below.

$$x_{new} = x_i + (x_j - x_i) * \beta \tag{1}$$

SMOTE technique has some disadvantages. One of them is that the synthetic data is also produced within the majority class region (Sağlam & Cengiz, 2022). Another issue is the creation of new instances that do not actually exist, solely based on existing instances (Özdemir et al., 2021). Finally, it can lead to a distortion of the true class distribution. In this study, the over-sampling method was chosen to preserve the samples in the balanced dataset. The dataset used in this study consists of unbalanced data with different classes. Referring to Table 1, *K_PISTA* accounts for 40% of the dataset, while *Barhee* of Date only represents 2%. In the balanced dataset, the class with the highest number of data points is Kirmizi Pistachio (*K_PISTA*), which has 1232 data points.

Table 3. The Working Principles of SMOTE Technique.

Process	Definition
P1:	The <i>k</i> nearest neighbors are looking for every feature belonging to minority class.
P2:	Taken the difference between a feature belonging to the minority class and its <i>k</i> nearest neighbor
P3:	A random number β is chosen between 0 and 1. Then, multiply this number by the value found in STEP P2 .
P4:	New features are obtained using Equation 1 (Yavaş et al., 2020).
P5:	Steps 1, 2, 3 and 4 are repeated to generate number of features.

After implementing SMOTE, the total number of data points in the balanced dataset decreased from 3046 to 2250. The values for all classes were adjusted to align with the class that had the highest count, which is *K_PISTA*. The balance achieved in the dataset after applying the SMOTE technique is shown in Table 4. Additionally, Figure 3

presents a plot depicting the balanced distribution of the dataset following the application of SMOTE.

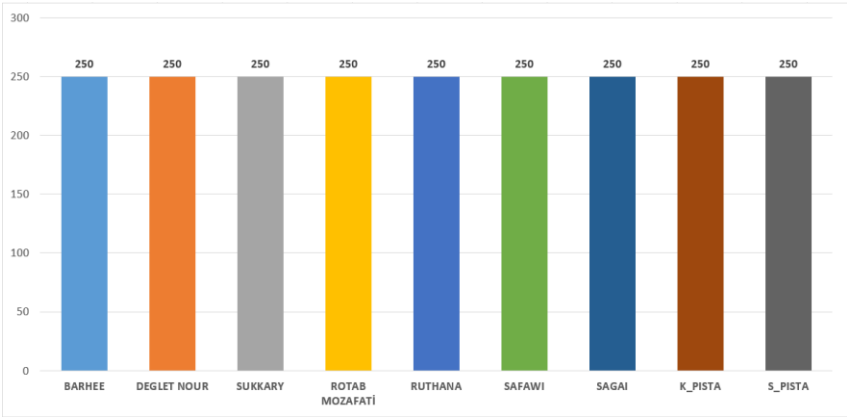


Figure 3. The Data Distributions of *Date* and *Pistachio* Dataset After Applying SMOTE Technique.

This data distribution leads to misleading results during classification with machine learning models. To obtain more accurate results in the classification, the data distribution of the dataset should be balanced.

Table 4. Number of Fruit Species Data in the Dataset After Applying SMOTE.

Fruit Names	Total Data Number	The Percentage of the Data
Barhee	250	0,111111
Deglet Nour	250	0,111111
Sukkary	250	0,111111
Rotab Mozafati	250	0,111111
Ruthana	250	0,111111
Safawi	250	0,111111
Sagai	250	0,111111
Kirmizi Pistachio (K_PISTA)	250	0,111111
Siirt Pistachio (S_PISTA)	250	0,111111
TOTAL	2250	1,000000

There are several methods to achieve data balance in the dataset, and one of them is the SMOTE technique. After applying SMOTE, the similarity relationship between the original and synthetic data was analyzed using Jensen-Shannon Divergence (JSD). JSD is an explicit measure of the similarity between two probability distributions characterized by their symmetric and bounded properties (Menéndez et al., 1997). The distributions between synthetic and original data are shown in Figure 4 with the T-distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE) algorithm. The original and synthetic data overlap in some regions. However, in some regions the synthetic data appears to have different distributions than the original data. The red dots appear to be

clustered separately from the blue dots, which may indicate that the synthetic data contains deviations from the original distribution or forms new patterns. These deviations were analyzed with Jensen-Shannon Divergence Distance (JSD) and the deviation values are shown in Table 5.

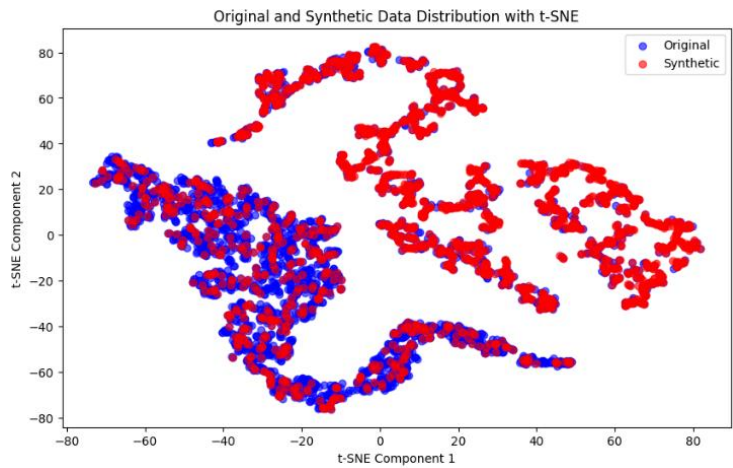


Figure 4. Representing the Distributions Between Synthetic and Original Data With t-SNE.

Those with a JSD distance greater than 0,3 between the synthetic and original data were not included in the training of the models because they showed significant separation. Values greater than 0,3 are marked with “*” symbol in Table 5.

Table 5. Jensen-Shannon Distance of Synthetic Data Generated With SMOTE to the Original Data.

Feature Names	Jensen-Shannon Divergence Distance	Feature Names	Jensen-Shannon Divergence Distance
Perimeter	0,2568	Mean RR*	0,3589
Major Axis	0,3420	Mean RG*	0,3588
Minor Axis*	0,3527	Mean RB*	0,3574
Eccentricity	0,2781	StdDev RR	0,2522
Equivalent Diameter*	0,3513	StdDev RG	0,1502
Extent	0,1166	StdDev RB	0,1852
Aspect Ratio	0,0021	Skew RR	0,2093
Roundness	0,3173	Skew RG	0,2613
Compactness	0,2953	Skew RB	0,2149
Shapefactor 1	0,0021	Kurtosis RR	0,0975
Shapefactor 2	0,3443	Kurtosis RG	0,1629
Shapefactor 3	0,2976	Kurtosis RB	0,1589
Shapefactor 4	0,2243	Solidity	0,2354

3.3.1. Support Vector Machine

Support Vector Machine (SVM) is a supervised machine learning method initially proposed by Vapnik (Cortes & Vapnik, 1995). It is designed to tackle quadratic optimization challenges and is widely employed for classification purposes (Cortes & Vapnik, 1995). The main goal of SVM is to create a decision boundary that effectively divides the various classes. This boundary is represented by a hyperplane, which is placed to maximize the margin between the different classes. The support vectors, which are the data points nearest to this decision boundary, are critical in determining the class separation. One key advantage of SVM is its efficient use of memory during the classification phase, as it works with a subset of the training data. The hyperparameter settings for the SVM model are listed in Table 6.

Table 6. The Best Parameter for SVM Model

ML Models	The Best Hyperparameter for the Unbalanced Dataset	The Best Hyperparameter after applying SMOTE Technique
RBF-SVM	C: 8180,247659224931 Gamma: 6,952230531190703 Class Weight: None Decision Function Shape: Ovo Optimization Time: 62,45651459693909 seconds	C: 8180,247659224931 Gamma: 6,952230531190703 Class Weight: None Decision Function Shape: Ovo Optimization Time: 22,32699489593506 seconds
Linear-SVM	C: 359,5227379674209 Gamma: 542,6447347075766 Class Weight: None Decision Function Shape: Ovo Optimization Time: 30,011558771133423 seconds	C: 113,63644767419068 Gamma: 6,952230531190703 Class Weight: Balanced Decision Function Shape: Ovr Optimization Time: 9,646587371826172 seconds
Polynomial-SVM	C: 7282,263486118596 Gamma: 632,3059305935794 Class Weight: Balanced Decision Function Shape: Ovo Optimization Time: 1075,8052697181702 seconds	C: 6334,137565104235 Gamma: 803,6721768991144 Class Weight: Balanced Decision Function Shape: Ovr Optimization Time: 7,240705251693726 seconds
Sigmoid-SVM	C: 3745,501188473625 Gamma: 731,994041811405 Class Weight: None Decision Function Shape: Ovo Optimization Time: 30,27118468284607 seconds	C: 3745,501188473625 Gamma: 731,994041811405 Class Weight: None Decision Function Shape: Ovo Optimization Time: 14,745770692825317 seconds

3.3.2. Random Forest

Random Forest (RF) is a supervised machine learning technique introduced by Breiman to solve classification and regression challenges (Breiman, 2001). It utilizes ensemble learning by creating a collection of decision trees, which are generated randomly and aggregated together. This method improves the model's classification performance by utilizing the combined insights from all the trees. The hyperparameter values for the RF model are provided in Table 7.

Table 7. The Best Parameters for RF Model.

ML Model	The Best Hyperparameter for the Unbalanced Dataset	The Best Hyperparameter after applying SMOTE Technique
Random Forest	N Estimators: 230 Maximum Depth: 17 Minimum Samples Leaf: 6 Minimum Samples Split: 4 Max Features: Sqrt Bootstrap: True Criterion: Entropy Class Weight: None Maximum Samples: 0,9997459059575176 CCP Alpha: 0,0013671964826997285 Optimization Time: 93,80823493003845 seconds	N Estimators: 165 Maximum Depth: 17 Minimum Samples Leaf: 3 Minimum Samples Split: 2 Max Features: Log2 Bootstrap: True Criterion: Gini Class Weight: Balanced Maximum Samples: 0,9699893371393026 CCP Alpha: 0,001545661652886743 Optimization Time: 68,85771036148071 seconds

3.3.3. K-Nearest Neighbor

The K-Nearest Neighbor (KNN) classifier is a method used to categorize samples by assigning them to the class of their closest, previously labeled neighbors (Cover & Hart, 1967). It relies on two key factors: distance and neighborhood (K) number. The distance measures the proximity between the predicted point and other points, while K determines the number of nearest neighbors considered for the prediction. The hyperparameter values of the KNN model are presented in Table 8.

Table 8. The Best Parameter for KNN Model.

ML Model	The Best Hyperparameter for the Unbalanced Dataset	The Best Hyperparameter after applying SMOTE Technique
K-Nearest Neighbor	N Neighbors: 15 Weights: Distance Metric: Manhattan Algorithm: Brute Optimization Time: 2,3644299507141113 seconds	N Neighbors: 11 Weights: Distance Metric: Manhattan Algorithm: Kd_Tree Optimization Time: 2,491448163986206 seconds

3.3.4. Decision Tree

Decision trees, consisting of root nodes, intermediate nodes, branches and leaves (Bakan & Kanbay, 2024), are a supervised machine learning algorithm that divides similar groups into smaller subsets (Quinlan, 1986). DTs are one of the easy-to-construct and understand models. A tree structure consists of leaf nodes labelled with different classes and internal nodes connected to two or more child nodes, forming a test node (Quinlan, 1996). The hyperparameter values of the DT model are presented in Table 9.

Table 9. The Best Parameter for DT Model.

ML Model	The Best Hyperparameter for the Unbalanced Dataset	The Best Hyperparameter after applying SMOTE Technique
Decision Tree	Maximum Depth: 13 Minimum Samples Leaf: 4 Minimum Samples Split: 15 Max Features: Log2 Criterion: Entropy Class Weight: None Splitter: Best Maximum Leaf Nodes: 12 CCP Alpha: 0,028181963210002724 Optimization Time: 1,9292397499084473 seconds	Maximum Depth: 11 Minimum Samples Leaf: 10 Minimum Samples Split: 16 Max Features: None Criterion: Gini Class Weight: Balanced Splitter: Best Maximum Leaf Nodes: 16 CCP Alpha: 0,0039236219609223855 Optimization Time: 6,359211444854736 seconds

3.3.5. Naïve Bayes

Naive Bayes (NB) is a straightforward probabilistic classifier based on Bayes' theorem (Aggarwal & Kaur, 2013). NB assumes that all features in a data set are independent. It is called “*naïve*” because of this assumption. However, this assumption is often not true in real world data. In a Naive Bayes classifier, the class label represents the hypothesis, while the feature values serve as the evidence. The classifier aims to determine the class label with the highest likelihood based on the given feature values. The hyperparameter settings for the NB model are in Table 10.

Table 10. The Best Parameter for NB Model.

ML Model	The Best Hyperparameter for the Unbalanced Dataset	The Best Hyperparameter after applying SMOTE Technique
Naïve Bayes	Var Smoothing: None Priors: 0,0007455074367977082 Optimization Time: 0,6440117359161377 seconds	Var Smoothing: None Priors: 0,004592489919658672 Optimization Time: 0,5791840553283691 seconds

3.3.6. Multi-Layer Perceptron

A Multilayer Perceptron (MLP) is a type of neural network model consisting of several layers of artificial neurons, commonly known as perceptron's. The input data is fed into the network and passed through multiple hidden layers before reaching the output layer (Shubhangi & Pratibha, 2021). Each layer performs a non-linear transformation on the input, allowing the network to capture complex and non-linear relationships between the input and output. The hyperparameter settings for the MLP model are provided in Table 11.

Table 11. The Best Parameter for MLP Model.

ML Model	The Best Hyperparameter for the Unbalanced Dataset	The Best Hyperparameter after applying SMOTE Technique
Multi-Layer Perceptron	Hidden Layer Sizes: (194, 138) Activation Function: Tanh Solver: Adam Alpha: 0,024598491974895578 Learning Rate: Invscaling Maximum Iteration: 100 Optimization Time: 510,3250524997711 seconds	Hidden Layer Sizes: (50, 105) Activation Function: Tanh Solver: Lbfgs Alpha: 0,09248643902204486 Learning Rate: Adaptive Maximum Iteration: 100 Optimization Time: 110,45194363594055 seconds

3.3.7. Logistic Regression

Logistic regression (LR) was introduced by David Cox in 1958 (Cox, 1958). LR is a classification technique typically used when the dependent variable has two possible outcomes (Prasetyo & Harlili, 2016). It is a straightforward and efficient algorithm that is easy to implement and can efficiently handle particularly large datasets with minimal computational effort. To prevent overfitting, LR can be regularized by adding a penalty term to the cost function. While it is primarily used for binary classification, LR can also be adapted for multi-class classification problems using methods such as One-vs-All or SoftMax Regression. The hyperparameter settings for the LR model are shown in Table 12.

Table 12. The Best Parameter for MLP Model.

ML Model	The Best Hyperparameter for the Unbalanced Dataset	The Best Hyperparameter after applying SMOTE Technique
Logistic Regression	C: 8,075401551640624 Penalty: L1 Solver: Saga Maximum Iteration: 1000 Optimization Time: 77,50988411903381 seconds	C: 8,075401551640624 Penalty: L1 Solver: Saga Maximum Iteration: 1000 Optimization Time: 60,024758100509644 seconds

4. RESULTS

This section of the study presents the evaluation metrics and descriptions of the model's classification performances, including the classification performance results of the models before and after applying SMOTE.

4.1. Evaluation Metrics

In this section of the paper, the performance measures and results of the proposed model are presented in detail. The confusion matrix, accuracy, balanced accuracy, sensitivity, specificity, precision, F-score, Cohen's kappa score, and ROC accuracy score have been calculated for all models. A confusion matrix (Townsend, 1971) is depicted in Figure 5.

		ACTUAL	
		YES	NO
PREDICTED	YES	TP (True Positive)	FP (False Positive)
	NO	FN (False Negative)	TN (True Negative)

Figure 5. Confusion Matrix.

Accuracy (A): It measures the number of actual data instances over the total number of data instances.

$$A = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2)$$

Precision (P): It measures how many of the positive predictions are made correctly.

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

Sensitivity (S): It measures the number of positive cases predicted from all positive predictions.

$$S = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

Specificity (SP): It measures how many negative predictions are made correctly.

$$SP = \frac{TN}{TN + FP} \quad (5)$$

F1-Score (F): It measures harmonic average precision and sensitivity.

$$F = 2 * \frac{P * R}{P + R} \quad (6)$$

Balanced Accuracy (BA): It measures arithmetic meaning of sensitivity and specificity.

$$BA = \frac{R + S}{2} \quad (7)$$

ROC Accuracy Score (ROC AUC): It measures the area under the curve and compares the relationship via Precision and specificity.

Cohen's Kappa (K): It is a statistical method that measures the agreement between two values.

As a result of hyperparameter optimization, significant improvements in model performance were observed. For example, optimizing C and Gamma values in the RBF-SVM model improved accuracy from 92,62% to 95,55%. Similarly, optimizing the number of trees and splitting criterion in the Random Forest model resulted in a 4,5% increase in accuracy. The Linear-SVM model, which performed the best before SMOTE, was the least affected by data imbalance. However, the increase in the accuracy of the RBF-SVM model after SMOTE shows that it can better model non-linear relationships.

4.2. Results of Unbalanced Dataset

In this part of the study, the performance evaluations of ML models are included. A, P, S, SP and F results for the unbalanced dataset in all models are given in Table 13. BA, ROC AUC and K scores are given in Table 14. Among the models, Linear-SVM emerged as the top performer. The confusion matrix of Linear-SVM is presented in Figure 6. The ROC curve for all presented is shown in Figure 7 and the sub classification results are presented in Table 15.

Table 13. The Performance Evaluations of the Unbalanced Dataset.

ML Methods	A	P	S	SP	F
RBF SVM	0,9163	0,9186	0,9163	0,9672	0,9167
Linear SVM	0,9262	0,9265	0,9262	0,9715	0,9260
POLY SVM	0,9016	0,9034	0,9016	0,9655	0,9016
Sigmoid SVM	0,4327	0,1873	0,4327	0,5672	0,2614
RF	0,8983	0,8979	0,8983	0,9618	0,8976
DT	0,8229	0,7926	0,8229	0,9393	0,8050
KNN	0,9094	0,9104	0,9098	0,9679	0,9085
NB	0,8688	0,8784	0,8688	0,9548	0,8701
MLP	0,9032	0,9036	0,9032	0,9644	0,9026
LR	0,9260	0,9257	0,9262	0,9702	0,9253

Table 14. Other Performance Evaluations of the Unbalanced Dataset.

ML Methods	BA	ROC AUC	K
RBF SVM	0,9057	0,9463	0,8845
Linear SVM	0,8853	0,9370	0,8978
POLY SVM	0,8536	0,9194	0,8642
Sigmoid SVM	0,1111	0,5000	0,0000
RF	0,8464	0,9154	0,8594
DT	0,6823	0,8279	0,7547
KNN	0,8398	0,9131	0,8753
NB	0,8234	0,9019	0,8197
MLP	0,8500	0,9290	0,8663
LR	0,8947	0,9416	0,8978

Table 13 and Table 14 shows that Linear-SVM has the highest accuracy rate (92,62%). It is also the most successful model overall with the highest sensitivity (92,62%), specificity (97,15%) and Cohen's Kappa value (89,78%). The RBF-SVM model is also very successful and shows the second-best performance with an accuracy of 91,63%. The ROC AUC value (94,63%) is one of the highest. The sigmoid SVM model gave the worst result. With an accuracy of 43,27% and an ROC AUC of 50,00%, it behaves almost like a random prediction model. The Decision Tree (DT) model performed relatively poorly. Its accuracy is 82,29%, which is significantly lower than the other models.

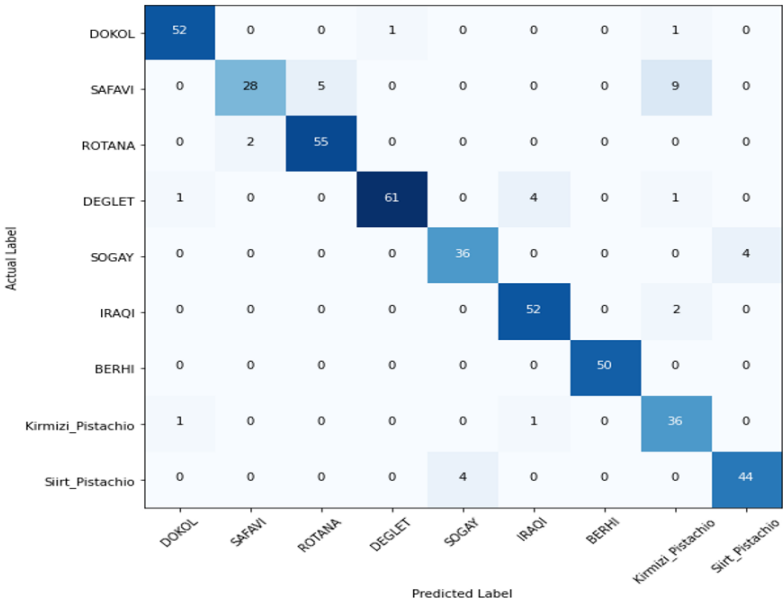


Figure 6. The Confusion Matrix of the Best ML Model (Linear-SVM) in the Unbalanced Dataset.

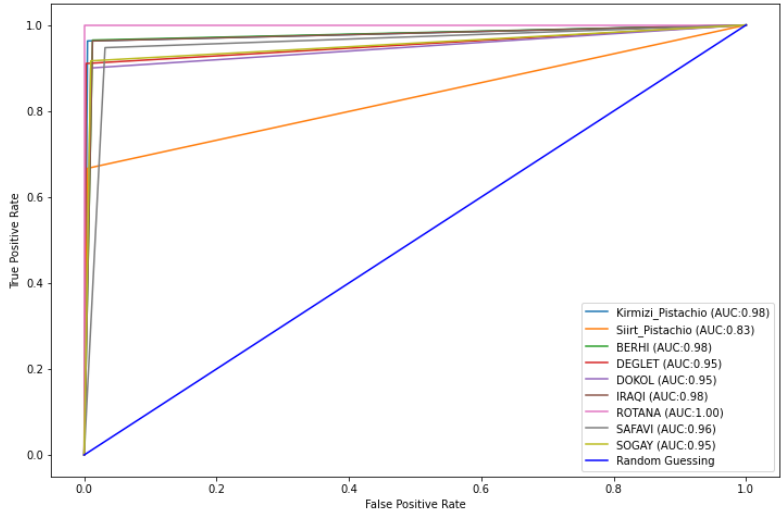


Figure 7. The ROC Curve of the Best ML Model (Linear-SVM) in the Unbalanced Dataset.

When Table 15 is analyzed, the precision and sensitivity rates are relatively low in some classes such as Deglet and Sagay. This is since some classes contain fewer samples than others due to the unbalanced dataset. The Safavi and Rotana classes were classified with 100% accuracy. However, this may also be due to the small number of samples. Overall, the Linear SVM model subclassified fruit types quite successfully. However, it can be said that the model was affected by the imbalanced dataset due to low sensitivity rates in some classes.

Table 15. Sub-classification Results for the Best ML Model on the Unbalanced Dataset.

Class	P	S	SP	F	Test Case
Berhi	0,7500	0,9000	0,9950	0,8181	10
Deglet	0,7647	0,7222	0,9932	0,7428	18
Dokol	0,9215	0,9791	0,9928	0,9494	48
Iraqi	0,9285	0,8125	0,9983	0,8666	16
Rotana	1,0000	0,9655	1,0000	0,9824	29
Safavi	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	43
Sagay	0,7857	0,7333	0,9949	0,7586	15
K PISTA	0,9465	0,9393	0,9595	0,9429	264
S PISTA	0,9053	0,9161	0,9638	0,9107	167
<i>The Average Result</i>	<i>0,9265</i>	<i>0,9262</i>	<i>0,9715</i>	<i>0,9260</i>	<i>610</i>

Cross Validation is a method that tests how the model performs on different datasets by dividing the dataset into different subsets to evaluate the generalization ability of the models. In this study, 5 and 10-fold datasets were identified. Table 16 shows the cross-validation (CV) results of the machine learning models tested on the unbalanced

dataset. The Linear SVM model is the best performing model with both CV 5 (91,31%) and CV 10 (91,47%) accuracy rates. Since the standard deviation values are low, the model performs consistently across different data partitions. The RBF SVM model has an accuracy of 85,40% in CV 5, which increases to 88,03% in CV 10, but the standard deviation value ($\pm 0,0274$) is slightly high. This means that the model may be inconsistent across different datasets. The DT, RF, NB and MLP models show good generalization ability, although the accuracy is low. The most unsuccessful model was the Sigmoid SVM model.

Table 16. Cross Validation Scores of Models on Unbalanced Dataset.

ML Methods	Cross Validation Scores	
	Accuracy	
	CV 5	CV 10
RBF SVM	0,8540 Std: $\pm 0,0245$	0,8803 Std: $\pm 0,0274$
Linear SVM	0,9131 Std: $\pm 0,0152$	0,9147 Std: $\pm 0,0262$
POLY SVM	0,9049 Std: $\pm 0,0168$	0,9131 Std: $\pm 0,0344$
Sigmoid SVM	0,4327 Std: $\pm 0,0032$	0,4327 Std: $\pm 0,0080$
RF	0,8704 Std: $\pm 0,0158$	0,8786 Std: $\pm 0,0304$
DT	0,8114 Std: $\pm 0,0200$	0,8049 Std: $\pm 0,0297$
KNN	0,8622 Std: $\pm 0,0203$	0,8622 Std: $\pm 0,0375$
NB	0,8639 Std: $\pm 0,0133$	0,8622 Std: $\pm 0,0329$
MLP	0,8737 Std: $\pm 0,0152$	0,8786 Std: $\pm 0,0245$
LR	0,8967 Std: $\pm 0,0152$	0,8950 Std: $\pm 0,0396$

4.2. Results of Balanced Dataset

Table 17 shows the A, P, S, SP and F results of all models in the balanced data set after SMOTE is applied. BA, ROC AUC and K scores are given in Table 18. Among the models, RBF SVM emerged as the top performer. The confusion matrix of RBF SVM is presented in Figure 8. The ROC curve for best models is presented in Figure 9 and the classification report is presented in Table 19.

Table 17. The Performance Evaluations of the Balanced Dataset.

ML Methods	A	P	S	SP	F
RBF SVM	0,9555	0,9558	0,9555	0,9947	0,9555
Linear SVM	0,9333	0,9347	0,9333	0,9923	0,9330
POLY SVM	0,9511	0,9514	0,9511	0,9944	0,9510
Sigmoid SVM	0,0844	0,0071	0,0844	0,9155	0,0131
RF	0,9355	0,9366	0,9355	0,9924	0,9355
DT	0,8911	0,8960	0,8911	0,9873	0,8920
KNN	0,9377	0,9392	0,9377	0,9928	0,9380
NB	0,8844	0,8876	0,8844	0,9863	0,8852
MLP	0,9266	0,9285	0,9266	0,9903	0,9267
LR	0,9377	0,9389	0,9377	0,9929	0,9376

Table 18. Other Performance Evaluations of the Balanced Dataset.

ML Methods	BA	ROC AUC	K
RBF SVM	0,9527	0,9736	0,9498
Linear SVM	0,9267	0,9592	0,9247
POLY SVM	0,9479	0,9709	0,9448
Sigmoid SVM	0,1111	0,5000	0,0000
RF	0,9318	0,9619	0,9272
DT	0,8882	0,9373	0,8771
KNN	0,9329	0,9626	0,9297
NB	0,8787	0,9322	0,8695
MLP	0,9217	0,9504	0,9172
LR	0,9329	0,9626	0,9297

Looking at the results in Table 17, in general, the performance of all models has improved significantly. RBF-SVM achieved the highest accuracy rate (95,55%), so it can be considered the most successful model. POLY-SVM also has a very high accuracy rate (95,11%). Models such as Linear SVM, Random Forest and KNN also performed strongly (93%+ accuracy). The previously unsuccessful Sigmoid SVM again performed poorly (8,44% accuracy), even after SMOTE. As seen in Table 19, after SMOTE was applied, the models applied to the balanced dataset showed a significant improvement in all metrics. SMOTE generates synthetic examples for minority classes, allowing the model to generalize better to less common classes. A small performance degradation was observed for the Red Pistachio and Siirt Pistachio classes. This may be since these classes had quite a lot of examples before SMOTE and the synthetic examples after SMOTE did not fully preserve the class distinction. Sensitivity in the minority of classes increased significantly, making the model less biased.

Table 19. Sub-Classification Results for the Best ML Model After Applying SMOTE.

Class	P	S	SP	F	Test Case
Berhi	1,0000	0,9629	1,0000	0,9811	54
Deglet	0,9069	0,9285	0,9901	0,9176	42
Dokol	0,9642	0,9473	0,9949	0,9557	57
Iraqi	0,9705	0,9850	0,9947	0,9777	67
Rotana	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	54
Safavi	0,9800	0,9800	0,9975	0,9800	50
Sagay	0,9743	1,0000	0,9975	0,9870	38
K_PISTA	0,8750	0,8750	0,9878	0,8750	40
S_PISTA	0,8958	0,8958	0,9875	0,8958	48
The Average Result	0,9558	0,9555	0,9947	0,9555	450

According to Table 15 and Table 19, while the F1-Score of the Barhee class was 0,8181 before SMOTE was applied, it increased to 0,9811 after SMOTE. The main reason for this increase is that there were few examples of the Barhee class before SMOTE was applied and the model did not generalize this class well. When synthetic examples were added after SMOTE, the model was trained with more data and was able to classify

more successfully for this class. Precision increased by 33%, indicating that the false positive rate decreased and the model better identified the Barhee class. The same is true for Deglet Nour and Sagai. The increase in the F1-Score of the Barhee, Deglet Nour and Sagai classes can be attributed to the high similarity of the synthetic samples with the original data. According to the JSD analysis, there was no significant difference between synthetic and original examples for this class. Therefore, the model successfully learned the added synthetic examples and significantly improved its accuracy in this class. Looking at the cross-validation analysis to understand whether the high performance improvement, especially in these classes, is due to overlearning, it is seen that the model performs consistently across different data partitions. This suggests that the model does not overlearn and that the performance improvement is due to the improvement of the data distribution after SMOTE.

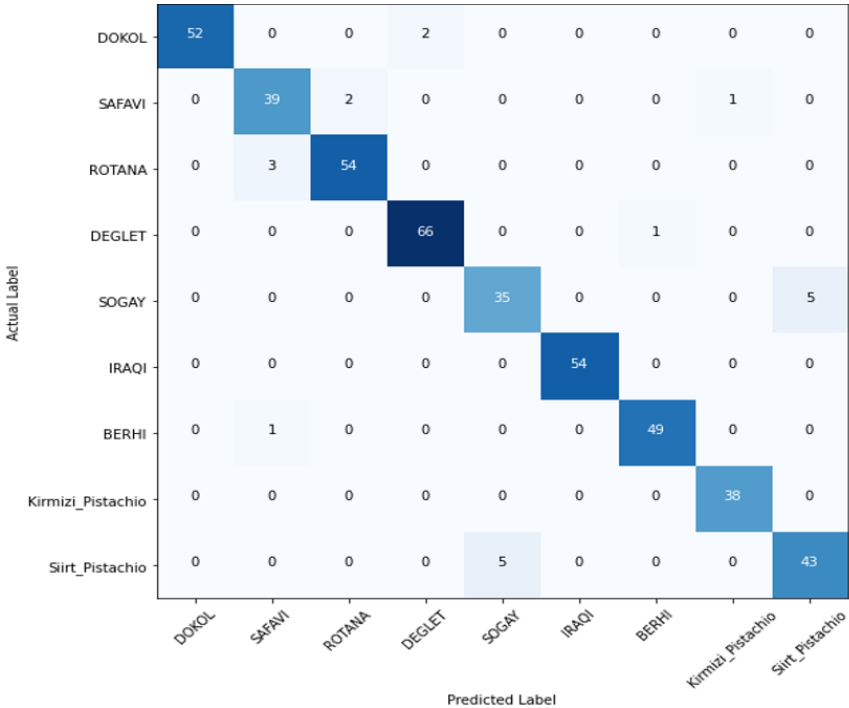


Figure 8. The Confusion Matrix of the Best ML Model After Applying SMOTE Technique.

The CV performance of the models on the balanced dataset was analyzed and the results are given in Table 18. Accuracy rates increased for Linear SVM, RBF SVM, POLY SVM and LR. This shows that the models can generalize better and give more consistent results in different data distributions. A significant decrease was observed in Sigmoid SVM. This indicates that the model is not suitable for the data. The CV 10 result of the MLP has decreased. This indicates that the model performs more variably against different data partitions and may have a higher variance.

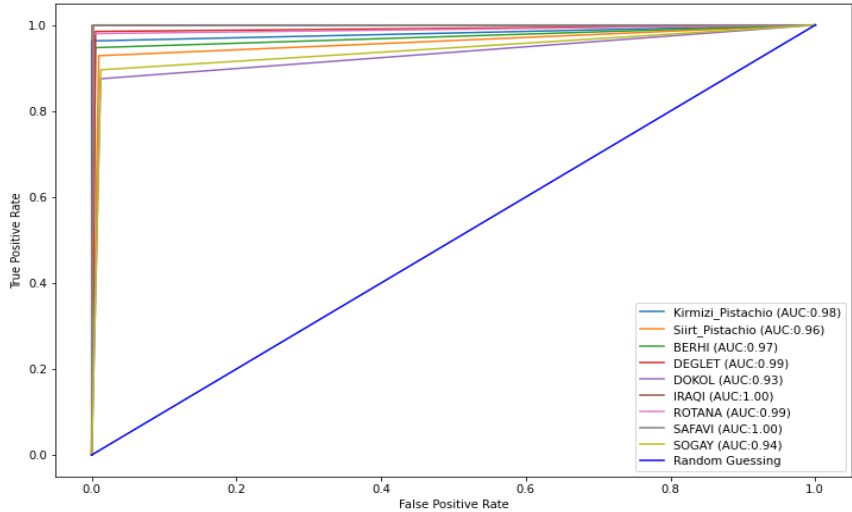


Figure 9. The ROC Curve of the Best ML Model After Applying SMOTE Technique.

Table 18. Cross Validation Scores of Models on Balanced Dataset.

ML Methods	Cross Validation Scores	
	Accuracy	
	CV 5	CV 10
RBF SVM	0,9022 Std: ± 0,0215	0,9066 Std: ± 0,0407
Linear SVM	0,9088 Std: ± 0,0163	0,9111 Std: ± 0,0371
POLY SVM	0,8933 Std: ± 0,0206	0,8955 Std: ± 0,0466
Sigmoid SVM	0,1488 Std: ± 0,0054	0,1488 Std: ± 0,0101
RF	0,8955 Std: ± 0,0166	0,8888 Std: ± 0,0281
DT	0,8155 Std: ± 0,0268	0,8200 Std: ± 0,0481
KNN	0,9000 Std: ± 0,0121	0,9111Std: ± 0,0314
NB	0,8755 Std: ± 0,0177	0,8866 Std: ± 0,0321
MLP	0,8777 Std: ± 0,0365	0,7644 Std: ± 0,0488
LR	0,9111 Std: ± 0,0272	0,9199 Std: ± 0,0361

5. CONCLUSION

This study investigated the performance of SMOTE-based machine learning models to address the imbalanced dataset problem. The experiments revealed that when imbalanced datasets are used, machine learning models show biases in certain classes and classification performance decreases. When the SMOTE technique is applied, however, the representation of minority classes increases, thereby improving the overall accuracy and sensitivity of the models to unbalance.

The results showed that the best performance was achieved by the RBF-SVM model with an accuracy of 95,55% on the dataset with SMOTE. The model that showed the

highest performance without SMOTE was Linear-SVM with an accuracy of 92,62%. However, the sigmoid SVM model performed poorly on both datasets. These results suggest that techniques to address data imbalance, such as SMOTE, can improve the performance of classification models on multiclass agricultural datasets.

The findings reveal that SMOTE-based data organization techniques offer a critical improvement for machine learning models working with imbalanced datasets. However, some drawbacks of SMOTE should also be considered; in particular, the new synthetic data may not be fully compatible with the original dataset, which may negatively affect the learning process in some models. Therefore, future work should complement the analysis with a comprehensive analysis of different variations of SMOTE, including hybrid oversampling methods or other balancing techniques.

Overall, this study has demonstrated that data imbalance removal is a critical element to improve the classification performance of machine learning models on agricultural products. In the future, a comparative study of different data imbalance removal approaches and their application on different types of agricultural datasets can increase the added value of the study.

Authors' Contribution

Corresponding author Fatih Bal contributes to the abstract, data collection and construction of the dataset, and designing the model for the study. Fatih Kayaalp contributes to the maturity of the study, introduction, literature review, and the preparation of the study's flow.

Available Materials

The date dataset is available in (Rıdvan Saraçoğlu, İlker Ali Özkan, 2021) and the pistachio dataset is available in (Koklu et al., 2021).

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest between the authors.

Research and Publication Ethics Statement

The study complied with research and publication ethics.

REFERENCES

- Aggarwal, S., & Kaur, D. (2013). Naive Bayes Classifier with Various Smoothing Techniques for Text Documents. *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*, 4(4). <http://ijcttjournal.org/Volume4/issue-4/IJCTT-V4I4P187.pdf>

- Anugerah Simanjuntak, Rosni Lumbantoruan, Kartika Sianipar, Rut Gultom, Mario Simaremare, Samuel Situmeang, & Erwin Panggabean. (2024). Research and Analysis of IndoBERT Hyperparameter Tuning in Fake News Detection. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi*, 13(1), 60–67. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v13i1.8532>
- Aydın, B. S. Y. (2018). Siirt Yöresi Fıstık Yetiştiricilerinin Sulama Eğilimlerinin Belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 119–127.
- Bakan, Z., & Kanbay, F. (2024). Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Eğitim Başarısına Etki Eden Faktörlerin Modellenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 23(45), 27–41. <https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1442084>
- Belete, D. M., & Huchaiah, M. D. (2022). Grid search in hyperparameter optimization of machine learning models for prediction of HIV/AIDS test results. *International Journal of Computers and Applications*, 44(9), 875–886. <https://doi.org/10.1080/1206212X.2021.1974663>
- Bhardwaj, P., Tiwari, P., Olejar, K., Parr, W., & Kulasiri, D. (2022). A machine learning application in wine quality prediction. *Machine Learning with Applications*, 8, 100261. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2022.100261>
- Boyd, C., Brown, G. C., Kleinig, T. J., Mayer, W., Dawson, J., Jenkinson, M., & Bezak, E. (2024). Hyperparameter selection for dataset-constrained semantic segmentation: Practical machine learning optimization. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 25(12). <https://doi.org/10.1002/acm2.14542>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(5–32). <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Çağlar, A., Tomar, O., Vatansever, H., & Ekmekçi, E. (2017). Antepfıstığı (*Pistacia vera* L.) ve İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri. *Akademik Gıda*, 436–447. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.370408>
- Çelik, G. K. Ö. (2020). Yeniden Örneklemme Teknikleri Kullanarak SMS Verisi Üzerinde Metin Sınıflandırma Çalışması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 36(3).
- Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 321–357. <https://doi.org/10.1613/jair.953>
- Chemchem, A., Alin, F., & Krajecki, M. (2019). Combining SMOTE Sampling and Machine Learning for Forecasting Wheat Yields in France. *2019 IEEE Second International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Engineering (AIKE)*, 9–14. <https://doi.org/10.1109/AIKE.2019.00010>
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273–297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>

- Cover, T., & Hart, P. (1967). Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Transactions on Information Theory*, 13(1), 21–27. <https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1053964>
- Cox, D. R. (1958). The Regression Analysis of Binary Sequences. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 20(2), 215–242.
- Divakar, S., Bhattacharjee, A., & Priyadarshini, R. (2021). Smote-DL: A Deep Learning Based Plant Disease Detection Method. *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/I2CT51068.2021.9417920>
- Echegaray, N., Gullón, B., Pateiro, M., Amarowicz, R., Misihairabgwi, J. M., & Lorenzo, J. M. (2023). Date Fruit and Its By-products as Promising Source of Bioactive Components: A Review. *Food Reviews International*, 39(3), 1411–1432. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1934003>
- Ha, T. M., & Bunke, H. (1997). Off-line, handwritten numeral recognition by perturbation method. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(5), 535–539. <https://doi.org/10.1109/34.589216>
- Koklu, M., Kursun, R., Taspinar, Y. S., & Cinar, I. (2021). Classification of Date Fruits into Genetic Varieties Using Image Analysis. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2021/4793293>
- Menéndez, M. L., Pardo, J. A., Pardo, L., & Pardo, M. C. (1997). The Jensen-Shannon divergence. *Journal of the Franklin Institute*, 334(2), 307–318. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(96\)00063-4](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(96)00063-4)
- Özdemir, A., Polat, K., & Alhudhaif, A. (2021). Classification of imbalanced hyperspectral images using SMOTE-based deep learning methods. *Expert Systems with Applications*, 178, 114986. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114986>
- Prasetio, D., & Harlili, D. (2016). Predicting football match results with logistic regression. *2016 International Conference On Advanced Informatics: Concepts, Theory And Application (ICAICTA)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICAICTA.2016.7803111>
- Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1(1), 81–106. <https://doi.org/10.1007/BF00116251>
- Quinlan, J. R. (1996). Learning decision tree classifiers. *ACM Computing Surveys*, 28(1), 71–72. <https://doi.org/10.1145/234313.234346>
- Rıdvan Saraçoğlu İlker Ali Özkan, M. K. (2021). Classification of Pistachio Species Using Improved K-NN Classifier. *Journal of Nutrition and Internal Medicine*, 23(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.23751/pn.v23i2.9686>

- Sağlam, F., & Cengiz, M. A. (2022). A novel SMOTE-based resampling technique through noise detection and the boosting procedure. *Expert Systems with Applications*, 200, 117023. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117023>
- Sher, M., Minallah, N., Ahmad, T., & Khan, W. (2023). Hyperparameters analysis of long short-term memory architecture for crop classification. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13(4), 4661. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp4661-4670>
- Shubhangi, D. C., & Pratibha, A. K. (2021). Asthma, Alzheimer's and Dementia Disease Detection based on Voice Recognition using Multi-Layer Perceptron Algorithm. *2021 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSES)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICSES52305.2021.9633923>
- Townsend, J. T. (1971). Theoretical analysis of an alphabetic confusion matrix. *Perception & Psychophysics*, 9(1), 40–50. <https://doi.org/10.3758/BF03213026>
- Umer, M., Sadiq, S., Missen, M. M. S., Hameed, Z., Aslam, Z., Siddique, M. A., & NAPPI, M. (2021). Scientific papers citation analysis using textual features and SMOTE resampling techniques. *Pattern Recognition Letters*, 150, 250–257. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.07.009>
- Varshney, T., Chug, A., & Singh, A. P. (2021). Deep Learning Models for Prediction of Tomato Powdery Mildew Disease. *2021 8th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 1036–1041. <https://doi.org/10.1109/SPIN52536.2021.9566132>
- Wang, X., Ren, H., Ren, J., Song, W., Qiao, Y., Ren, Z., Zhao, Y., Linghu, L., Cui, Y., Zhao, Z., Chen, L., & Qiu, L. (2023). Machine learning-enabled risk prediction of chronic obstructive pulmonary disease with unbalanced data. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 230, 107340. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107340>
- Xiao, T., Liu, H., & Cheng, Y. (2019). Corn Disease Identification Based on improved GBDT Method. *2019 6th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, 215–219. <https://doi.org/10.1109/ICISCE48695.2019.00051>
- Yavaş, M., Güran, A., & Uysal, M. (2020). Covid-19 Veri Kümesinin SMOTE Tabanlı Örnekleme Yöntemi Uygulanarak Sınıflandırılması. *European Journal of Science and Technology*, 258–264. <https://doi.org/10.31590/ejosat.779952>
- Yıldız, M. S. N. (2019). Hurma Ağacının (Phoenix dactylifera L.) İklim ve Toprak İstekleri. *International Journal of Engineering, Design and Technology*, 1(2), 64–70.



TAGUCHI METHOD-BASED MAN-HOUR OPTIMIZATION FOR BOEING 777 A-CHECK INTERVAL

BOEING 777 A-BAKIM ARALIĞI İÇİN TAGUCHI METODU TABANLI
ADAM-SAAT OPTİMİZASYONU

Cahit BİLGİ¹

Can EYÜPOĞLU²

Abdullah BÜLBÜL³

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1633385>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
caneyupoglu@gmail.com

Received
(Geliş Tarihi)
04.02.2025

Revised
(Revizyon Tarihi)
28.02.2025

Accepted
(Kabul Tarihi)
15.04.2025

Abstract

Aircraft maintenance is critical for safety and operational efficiency. For the Boeing 777, A-checks are conducted every 1000 flight hours (FH), resulting in five checks per aircraft annually, with significant downtime and labor costs. This study proposes a Taguchi method-based man-hour optimization model extending the A-check interval to 1500 FH and reducing the number of annual checks while maintaining safety and regulatory compliance. The analysis carried out in this study revealed significant benefits of this interval extension. Annual downtime for the 12-aircraft fleet decreased from 60 to 40 days, allowing 20 additional operational days and generating \$1 million in extra revenue. Labor costs were also reduced, with annual man-hours dropping from 1586 to 1153 per aircraft, saving 5196 hours fleet-wide. This optimization translates to \$416,000 in labor cost savings annually, with a total financial benefit of \$1416 million. Redistributing tasks between A- and L-checks further enhanced efficiency. Tasks such as lubrication and minor inspections were consolidated, and comprehensive cabin cleaning at 1500 FH was supplemented with intermediate cleaning at 500 FH to maintain passenger experience. These adjustments balanced the workload without affecting turnaround time or safety. This optimization demonstrates the potential for significant cost savings and operational improvements in aviation maintenance. Extending the A-check interval increased fleet availability, reduced labor requirements, and ensured compliance with regulatory standards. The findings highlight the importance of strategic maintenance planning and the potential for similar optimizations across other aircraft types and fleets.

Keywords: Optimization, aviation, aircraft maintenance, Taguchi method.

Öz

Uçak bakımı, emniyet ve operasyonel verimlilik açısından kritik öneme sahiptir. Boeing 777'de A-bakımları her 1000 uçuş saatinde (Flight Hours-FH) bir yapılmakta, bu da uçak başına yılda beş bakım yapılmasına neden olmakta ve önemli arıza süreleri ve işçilik maliyetleri ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma, Taguchi yöntemi tabanlı bir adam-saat optimizasyon modeli önererek A-bakım aralığını 1500 FH'ye çıkarmakta ve emniyet ile mevzuata uygunluğu koruyan yıllık bakım sayısını azaltmaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen analiz, bu aralığın uzatılmasının önemli faydalarını ortaya koymuştur. Yıllık arıza süresi 12 uçaklık filo için 60 günden 40 güne düşerek 20 ek operasyonel gün ve 1 milyon dolar ekstra gelir elde edilmesini sağlamaktadır. İşçilik maliyetleri de azalmış, uçak başına yıllık adam-saat 1586'dan 1153'e düşerek filo genelinde 5196 saat tasarruf sağlanmıştır. Bu optimizasyon, yıllık 416.000 dolarlık işgücü maliyeti tasarrufu ve toplamda 1416 milyon dolarlık mali fayda anlamına gelmektedir. Görevlerin A- ve L-bakımları arasında yeniden dağıtılması verimliliği daha da artırmıştır. Yağlama ve küçük denetimler gibi görevler birleştirilmiş ve yolcu deneyimini korumak için 1500 FH'deki kapsamlı kabin temizliği 500 FH'deki ara temizlik ile desteklenmiştir. Bu ayarlamalar, geri dönüş süresini veya güvenliği etkilemeden iş yükünü dengelemiştir. Bu optimizasyon, havacılık bakımında önemli maliyet tasarrufu ve operasyonel iyileştirme potansiyelini ortaya koymaktadır. A-bakım aralığının uzatılması filonun kullanılabilirliğini artırmış, işgücü gereksinimlerini azaltmış ve düzenleyici standartlara uygunluğu sağlamıştır. Bulgular, stratejik bakım planlamasının önemini ve diğer uçak tipleri ve filolarında da benzer optimizasyonların yapılma potansiyelini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Optimizasyon, havacılık, uçak bakımı, Taguchi metodu.

¹ İstanbul University-Cerrahpaşa, Vocational School of Technical Sciences, Department of Aircraft Technology, İstanbul, Türkiye.
cahit.bilgi@iuc.edu.tr

² National Defence University, Turkish Air Force Academy, Department of Computer Engineering, İstanbul, Türkiye.
can.eypuglu@msu.edu.tr, caneyupoglu@gmail.com

³ İstanbul University-Cerrahpaşa, Vocational School of Technical Sciences, Department of Civil Aviation Cabin Services, İstanbul, Türkiye.
abdullah.bulbul@iuc.edu.tr

1. INTRODUCTION

Aircraft maintenance is a cornerstone of the aviation industry, ensuring the safety, reliability, and efficiency of flight operations (Tyagi et al., 2023; Pop et al., 2023). Broadly, maintenance tasks are divided into periodic (scheduled) and non-periodic (unscheduled) maintenance (Sarhani et al., 2016). Periodic maintenance is meticulously planned and conducted at predefined intervals, encompassing routine inspections, system tests, and component replacements (Fu & Avdelidis, 2023; Karaoğlu et al., 2023). Non-periodic maintenance, on the other hand, is reactive, addressing unexpected issues such as component failures or damage due to external factors (Baptista et al., 2017; Ab-Samat & Kamaruddin, 2014; Lin et al., 2015).

Scheduled maintenance tasks are further categorized into A-, B-, C-, D-, E-, and F-checks based on their complexity (Pimapunsi & Weeranant, 2018) and frequency (Ahmadi et al., 2010). A-checks are performed most frequently, focusing on basic inspections, lubrication, and minor system adjustments (Ghobbar, 2010; Rao et al., 2017). B-checks are slightly more detailed and carried out every few months (Deng et al., 2020; van der Weide et al., 2022). C-checks involve comprehensive inspections and are performed every 18-24 months, requiring significant downtime (Kulkarni et al., 2017; Şentürk et al., 2010). D-checks, also known as heavy maintenance checks, are the most extensive, often involving complete disassembly of the aircraft and occurring every 6-10 years (Deng et al., 2021; Albakkoush et al., 2021; Mofokeng & Marnewick, 2017). E-checks are especially about heavy electrical maintenance. F-checks are fabricating level maintenance (Bowers et al., 2022; Yilmaz et al., 2010; Vieira & Loures, 2016).

Optimizing maintenance processes has become a critical focus for the aviation industry due to the substantial costs and operational implications associated with these tasks (Papakostas et al., 2010; Sriram & Haghani, 2003; Verhagen et al., 2023). Maintenance accounts for a significant portion of an airline's operating expenses, particularly in labor-intensive tasks (Korba et al., 2023). The need for optimization stems from the dual objectives of reducing costs and enhancing operational efficiency, all while maintaining strict adherence to safety and regulatory standards (Kabashkin et al., 2024).

Operators usually organize maintenance tasks for Boeing 777 aircraft into larger A-checks or more comprehensive basic checks at intervals of 500 FH, 200 FC, and around 60 days (Boeing, 2016, 2022). The maintenance program for Boeing 777 aircraft covers approximately 2000 tasks and 125 separate task intervals (Boeing, 2022). An average of 80-120 man-hours are required to complete them (Boeing, 2013). Emirates Airlines, headquartered in Dubai and owning 10% of the world's Boeing 777 fleet, began transitioning its Boeing 777 fleet of 154 aircraft to Boeing's optimized maintenance program (OMP) in early 2019 and performs all A-checks under this program. With this optimization, on-time takeoff and flight safety performance were determined to be at least 99,5%-99,6%. It also increased the availability and planned reliability of the aircraft (Boeing, 2008; Broderick, 2020).

For applicability of various methods for optimization of industrial processes, engineering design, and maintenance tasks, there are different decision-making and optimization techniques, such as machine learning (Karaoğlu et al., 2022), gray

relational analysis (GRA) (Mattila & Virtanen, 2014), genetic algorithms (Saranga & Kumar, 2006), and Taguchi (Esangbedo et al., 2024) methods. These methods are the techniques for achieving goals such as quality improvements, cost management, and efficiency increase. GRA can be more effective in multi-criteria decision-making (MADM) problems and reduces the alternatives and their performance attributes to a single value, providing an advantage in the optimization of multiple goals (Esangbedo et al., 2024; Mattila et al., 2014). Machine learning is a powerful tool used in classification, prediction, and optimization problems in data analysis where the number of experiments and samples is high, especially when there is a correlation between the experimental results (Jaafaru & Agbelie, 2022; Karaoglu et al., 2022). Genetic algorithms can be a suitable solution for especially complex design and optimization problems. Inspired by the evolutionary processes of the universe, genetic algorithms suggest a large number of possible solutions in the design area and continuously improve them (Saranga & Kumar, 2006; Yang & Yang, 2012). The Taguchi method provides significant advantages, especially in quality improvement, variation control, and robust design. Compared to other methods, it enables obtaining more information with fewer experiments and producing more stable and high-quality products. However, it may have some limitations in more complex cases, such as multi-objective optimization; however, it is a very effective method in single-target improvement processes. Therefore, the Taguchi method is the most accurate one for estimating multiple variations with a small number of experiments, such as man-sat optimization in aircraft maintenance (Eltoukhy et al., 2020; Esangbedo et al., 2024; Zhang et al., 2024).

One of the most effective methodologies for achieving optimization in maintenance is the Taguchi method, a robust statistical tool designed to improve process efficiency (van der Weide et al., 2022; Shandookh et al., 2024). The Taguchi method employs an orthogonal array design to systematically evaluate the impact of various factors on maintenance outcomes (Sukthomya & Tannock, 2005; Azadeh et al., 2016). This approach identifies optimal conditions that minimize costs and maximize efficiency by analyzing key variables such as task intervals, labor distribution, and fleet size (Azadeh et al., 2016; Zhang et al., 2024). Its application in aviation maintenance not only ensures compliance with stringent safety requirements but also supports data-driven decision-making to streamline operations (Zio et al., 2019).

The benefits of optimization extend beyond cost savings (Duvignau et al., 2021). Enhanced maintenance processes lead to improved fleet availability, reduced downtime, and increased operational capacity (Şentürk et al., 2010; Regattieri et al., 2015). For instance, extending the intervals between maintenance tasks can significantly reduce the frequency of checks, translating into fewer disruptions to flight schedules (Shaukat et al., 2020; Al-Thani et al., 2016). Additionally, redistributing tasks across different maintenance checks ensures a balanced workload, preventing bottlenecks and maintaining service quality (Zhang et al., 2024; Regattieri et al., 2015; Shaukat et al., 2020; Al-Thani et al., 2016).

The labor-intensive nature of aviation maintenance means that man-hour costs form a substantial part of an airline's operational expenses (Beliën et al., 2012; Martone et al., 2024). In major maintenance hubs, man-hour costs range from \$80 to \$120, depending on the workforce's skill level and region. In the fleet of Boeing 777s, optimizing the

allocation of man-hours and reducing the number of A-checks generate substantial cost savings without compromising safety or performance.

The current system generates 60 days of downtime annually across the fleet, directly impacting operational revenue. The potential benefits of extending the A-check interval are significant. For a 12-aircraft fleet, this optimization reduces annual man-hours by 5196, saves \$416.000 in labor costs, and generates an additional \$1 million in operational revenue through increased fleet availability. These findings highlight the critical role of strategic maintenance planning in achieving cost efficiency and operational excellence in the aviation sector.

This paper aims to contribute to the growing literature on aviation maintenance optimization by presenting a case study on the extension of the Boeing 777 A-check interval. The Taguchi method was optimized for the Boeing 777 fleets consisting of 12 and 24 aircraft for the L-check maintenance cards to be performed at 1000 FH and 1500 FH A-check maintenance intervals using the signal-to-noise (S/N) formulation. Thus, maintenance intervals were increased without compromising flight safety standards, the number of task cards was reduced, the aircraft ground time was reduced, maintenance expenses were reduced, and transmission revenues increased as the aircraft were kept in flight for longer periods. This method provides efficiency, cost reduction, and improved aircraft availability. The findings demonstrate the applicability of this approach and provide a roadmap for similar applications across other aircraft types and fleets. Besides, this study highlights the transformative potential of innovative maintenance strategies in modern aviation by integrating regulatory compliance, operational efficiency, and cost-effectiveness. The rest of the study was organized as follows: Section 2 explains the proposed approach. In Section 3, the experimental results of the proposed approach are given and discussed. Finally, Section 4 summarizes the conclusions of the study.

2. METHODS

2.1. Current A-Check Interval (1000 FH)

Conducted approximately every 74 days based on a daily utilization rate of 13,5 FH. Each check requires a one-day downtime with three shifts. Each aircraft undergoes five A-checks annually, totaling 60 checks across the 12 aircraft fleet. This results in 60 days of annual downtime for the fleet.

2.2. Proposed A-Check Interval (1500 FH)

Aircraft manufacturers such as Boeing prepare a maintenance planning document (MPD) that includes mandatory basic maintenance when producing aircraft. Then, airlines that have the relevant aircraft in their fleet prepare a customized maintenance planning document (CMPD). Airline maintenance is specific to their aircraft and is carried out by the CMPD. For this study, conducted every 111 days, maintaining the same one-day check duration. Annual A-checks per aircraft drop to 3,3, reducing the fleet-wide total to 40 checks. This reduces downtime to 40 days annually, recovering

20 operational days for the fleet. The man-hour graph according to cards’ reference intervals before applying the technique proposed in this study is shown in Figure 1.

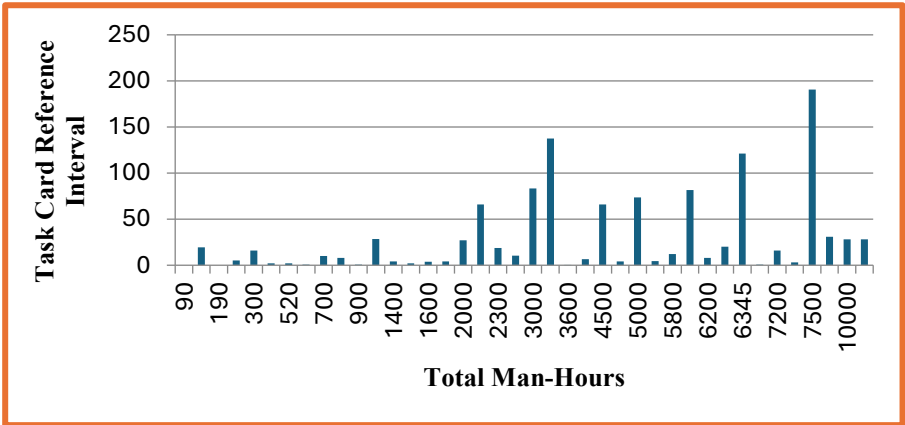


Figure 2. Distribution Chart of Maintenance Cards According to Reference Intervals

2.3. Optimization Methodology

Task data from Boeing’s maintenance manuals and airline-specific records were analyzed to identify tasks with intervals of over 1000 FH. These tasks were consolidated into a single 1500 FH A-check. The optimization is calculated as follows:

Savings (Man Hours) = (Current Interval Hours–Proposed Interval Hours) × Tasks/Hour (1)

For each task, man-hour savings were projected based on rescheduled intervals. Tasks deemed critical to safety or operations were excluded from rescheduling. Regulatory guidelines (Federal Aviation Administration, European Union Aviation Safety Agency) and manufacturer recommendations were strictly followed. Intermediate cleaning tasks were introduced every 500 FH to maintain cabin standards. Comprehensive cleaning remained at the proposed 1500 FH interval. The distribution chart of maintenance cards according to reference intervals is shown in Figure 2. A flowchart showing the proposed approach step by step and making it easy to follow is given in Figure 3.

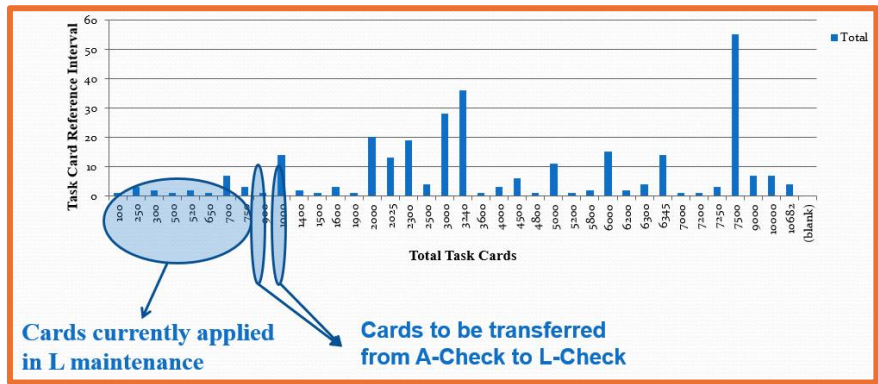


Figure 2. Distribution Chart of Maintenance Cards According to Reference Intervals

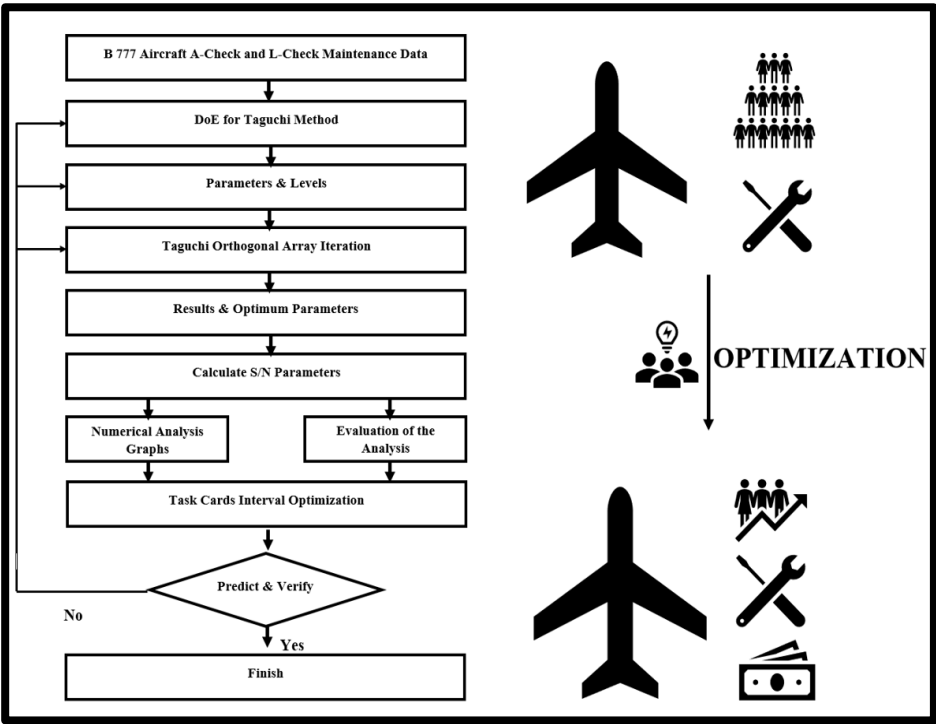


Figure 3. Boeing 777 Aircraft Optimization Flowchart

2.4. Taguchi Model for Man-Hour Optimization

The Taguchi method relies on designing experiments (Design of Experiments-DoE) to analyze the impact of different factors and determine optimal conditions. For this study, the following factors and levels were identified:

- I: A-check interval (1000 FH and 1500 FH).
- T: Task distribution (standard and optimized).
- H_{task} : Average man-hours per task card (standard and reduced).
- F: Fleet size (e.g., 12, 24 aircraft).
- Two levels are selected for each factor (e.g., A-check interval: 1000 FH and 1500 FH).
- An L_8 orthogonal array (Table 1) is suitable for this analysis, as it evaluates four factors at two levels each. This design ensures a balanced and efficient experimental structure.

Table 1. L_8 Orthogonal Array

Experiment	I (A-Check Interval)	T (Task Distribution)	H_{task} (Task Time)	F (Fleet Size)
1	1000 FH	Standard	2 hours	12 aircraft
2	1000 FH	Optimized	1.5 hours	24 aircraft
3	1500 FH	Standard	2 hours	24 aircraft
4	1500 FH	Optimized	1.5 hours	12 aircraft
5	1000 FH	Optimized	2 hours	24 aircraft
6	1000 FH	Standard	1.5 hours	12 aircraft
7	1500 FH	Optimized	2 hours	12 aircraft
8	1500 FH	Standard	1.5 hours	24 aircraft

The Taguchi method uses the S/N ratio to identify optimal conditions. For this study, the “smaller-is-better” criterion is applied, calculated as:

$$\frac{S}{N} = -10x \log_{10}(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2)$$

(2)

where y_i represents the observed response values in each experimental run and n denotes the number of observations or repetitions conducted under the same experimental conditions. In this study, these responses correspond to man-hour savings ($MH_{savings}$) and cost savings ($C_{savings}$) measured across different experimental trials.

Each response value was obtained through controlled experimental trials, ensuring accuracy in evaluating maintenance efficiency improvements. The calculated S/N ratios according to y_i and n values in Table 2 provide insights into the optimal parameter settings that minimize variability while maximizing performance gains. Using the formulas in the given Equations 1-4, the S/N values in Table 2 were solved in the Wolfram Mathematica program. Further discussion on interpreting these results and their impact on maintenance optimization is provided in subsequent sections.

Table 2. Calculated S/N Values

Experiment No.	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	n	S/N Ratio
1	145	150	148	152	149	5	-43,25
2	138	140	142	141	139	5	-42,88
3	155	160	158	162	159	5	-44,05
4	132	135	134	137	136	5	-41,92
5	165	168	170	166	169	5	-44,85
6	140	144	142	146	143	5	-42,98
7	150	152	154	151	153	5	-43,75

For each experiment, $MH_{savings}$ and $C_{savings}$ are calculated using the following formulas:

$$MH_{savings} = \left(\frac{1}{I_{current}} - \frac{1}{I_{proposed}} \right) \times T \times H_{task} \times F \quad (3)$$

where T is defined as either "standard" or "optimized". However, in Equation 3, T is multiplied by H_{task} indicating that T should be numerical rather than categorical. $T_{Standard}$ is 1, and $T_{Optimized}$ is 0,75. These values indicate that the optimized task distribution reduces workload efficiency by 25%, leading to lower required man-hours per task.

$$C_{savings} = MH_{savings} \times C_{MH} \quad (4)$$

The final parameter selection was based on a combination of cost efficiency, operational feasibility, and regulatory compliance. While maximizing cost savings was a key objective, safety, workload balance, and adherence to aviation authorities' regulations were critical constraints. The final selection criteria included maximizing fleet availability while ensuring minimal maintenance disruptions, reducing total labor costs without overloading any maintenance interval, maintaining regulatory and manufacturer compliance for operational safety, and demonstrating a significant return on investment through tangible cost savings.

2.5. Experiment Design and Parameter Selection

The Taguchi method uses the orthogonal array approach to optimize processes with minimal experimental work while capturing significant variability. In this study, an L8 orthogonal array was initially considered, allowing multiple factors to be evaluated at two levels each. However, since 7 aircraft were taken to A-check maintenance during the calendar period in which the Boeing 777 A-check optimization study was conducted, only 7 aircraft could be tested.

The selection of 7 experiments was determined by the need to analyze key factors such as A-check intervals, task distribution strategies, fleet size changes, and man-hour savings. More experiments could have been conducted, but simply taking the experimental aircraft from flight to maintenance before the A-check maintenance service would both reduce operating revenues and increase maintenance costs. The use of a structured orthogonal array allowed meaningful results to be obtained with a

limited number of trials, consistent with industry best practices for experimental optimization.

3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

The conducted experiments provide useful insights into which factor combinations yield optimal savings while maintaining safety and regulatory compliance. The Taguchi method helps determine how changes in these factors impact total maintenance efficiency. The key takeaway is identifying an optimal balance where extending the A-check interval does not compromise safety but instead enhances fleet availability while reducing labor and cost expenditures.

Annual man-hours for A-checks decreased from 1586 to 1153 per aircraft, resulting in a fleet-wide savings of 5196 man-hours annually. Task redistribution eased workload during L-checks, with minor operational checks (e.g., General Visual Inspection tasks) added to L-checks without affecting TAT. The distributions of man hours according to the maintenance interval for A-check 1000 FH and A-check 1500 FH are shown in Figures 4 and 5, respectively. The man-hour graph in case of equalization of maintenance is demonstrated in Figure 6. Making 1000 FH reference cards in L0004 (In addition to the current situation) is shown in Figure 7. Lastly, the man-hour graph in case of equalization of maintenance is demonstrated in Figure 8.

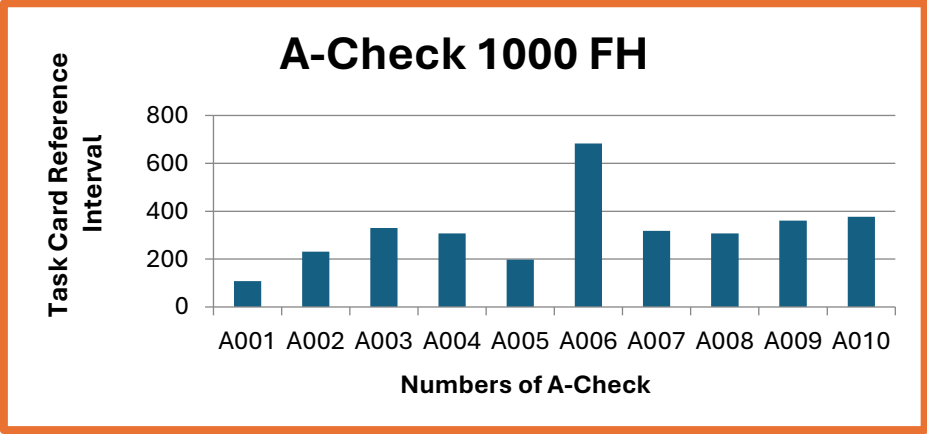


Figure 4. Distribution of Man Hours According to Maintenance Interval (1000 FH)

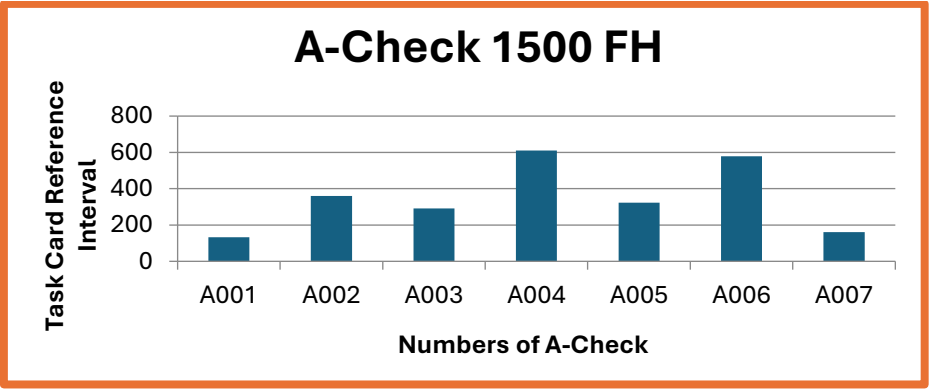


Figure 5. Distribution of Man Hours According to Maintenance Interval (1500 FH)

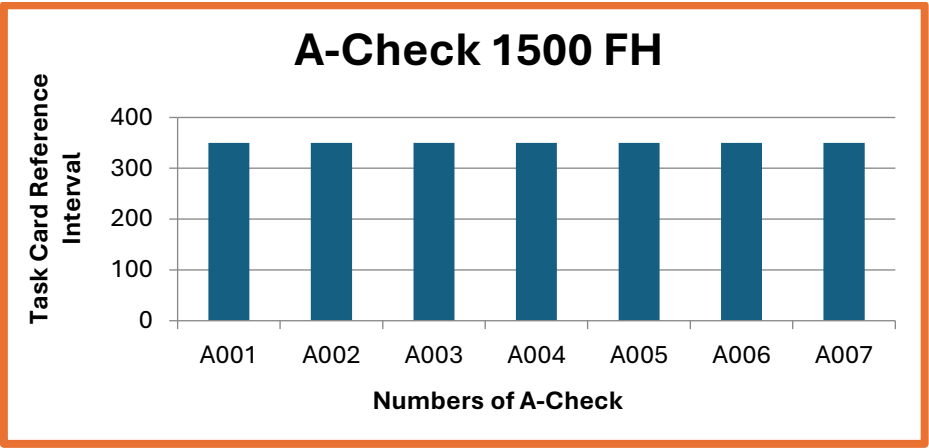


Figure 6. Man-Hour Graph in Case of Equalization of a Maintenance

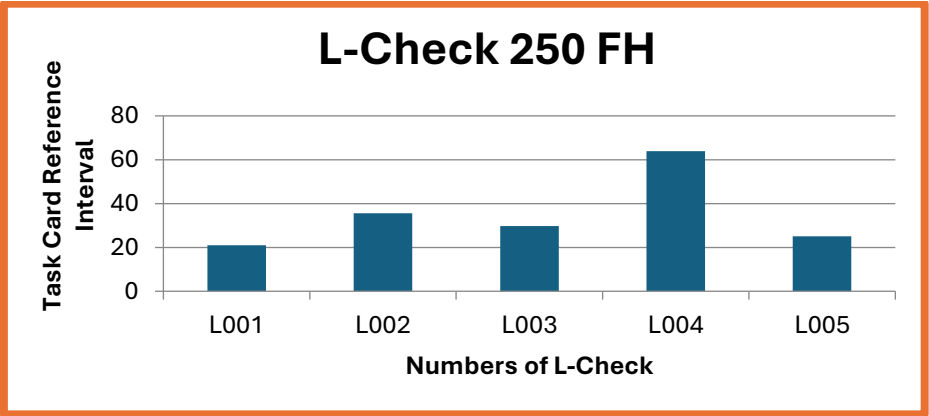


Figure 7. Making 1000 FH Reference Cards in L0004 (Addition to Current Situation)

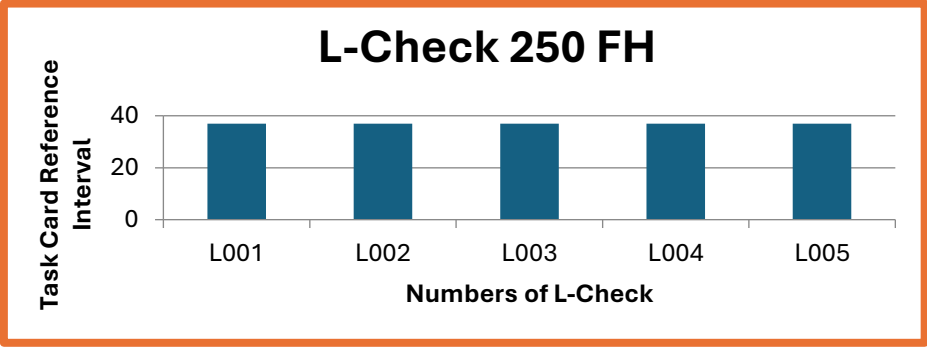


Figure 8. Man-Hour Graph in Case of Equalization of a Maintenance

The downtime was reduced from 60 to 40 days per year, providing 20 additional operational days for the fleet. Increased fleet availability generated \$1 million in additional operational revenue per year. Annual labor cost savings of \$416.000 based on an average man-hour cost of \$80. Financial benefits of \$1.416 million per year (including operational revenue and labor cost savings). Slot availability improved for other fleet maintenance. Workload was balanced during A- and L-checks without compromising safety.

The experiments conducted using the Taguchi method systematically evaluated the impact of differ-ent parameter combinations, including A-check interval (1000 FH vs. 1500 FH), task distribution (standard vs. optimized), man-hours per task card (standard vs. reduced), and fleet size (12 vs. 24 aircraft). Pre- and post-optimization results are given in Table 3. The experimental results demon-strated that the optimal scenario—extending A-checks to 1500 FH while balancing workload be-tween A- and L-checks—achieved maximum efficiency gains. The redistribution of tasks ensured that minor operational checks (such as general visual inspections) were added to L-checks without affecting turnaround time.

Table 3. Pre- and Post-Optimization Results

Parameter	Before Optimization (1000 FH)	After Optimization (1500 FH)
Annual A-Checks per Aircraft	5	3,3
Annual Fleet-Wide A-Checks	60	40
Annual Downtime (Days)	60	40
Man-Hours per Aircraft	1586	1153
Total Fleet-Wide Man-Hours Saved	-	5196
Annual Cost Savings (\$)	-	416.000
Additional Operational Revenue (\$)	-	1.000.000

4. CONCLUSION

Extending the A-check interval for Boeing 777 aircraft from 1000 FH to 1500 FH significantly reduced maintenance costs, increased operational efficiency, and improved fleet availability. The study highlights the importance of methodical task reassignment and integration of intermediate checks to maintain service standards. These findings highlight the importance of ongoing optimization in aviation maintenance, suggesting potential for broader application across aircraft types and maintenance strategies.

Future research can explore the integration of predictive maintenance techniques, leveraging machine learning and data analytics to enhance decision-making in maintenance scheduling. Additionally, further studies can examine the long-term effects of extended maintenance intervals on aircraft reliability and component lifespan. The applicability of this optimization framework to other aircraft models and operational environments can also be investigated, ensuring a more comprehensive understanding of its benefits and limitations. Collaborations between airlines, regulatory bodies, and maintenance providers can facilitate the development of adaptive maintenance schedules tailored to specific fleet requirements. These advancements can contribute to the evolution of more efficient, cost-effective, and data-driven maintenance strategies in the aviation industry.

Authors' Contribution

The authors confirm that they equally contributed to this paper.

Acknowledgments

We would like to thank the referees who contributed to the article with their valuable comments.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement of Research and Publication Ethics

Research and publication ethics were observed in the study.

REFERENCES

- Ab-Samat, H., & Kamaruddin, S. (2014). Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches: A review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 20(2), 98-121.
- Ahmadi, A., Söderholm, P., & Kumar, U. (2010). On aircraft scheduled maintenance program development. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 16(3), 229-255.

- Al-Thani, N. A., Ahmed, M. B., & Haouari, M. (2016). A model and optimization-based heuristic for the operational aircraft maintenance routing problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 72, 29-44.
- Albakkoush, S., Pagone, E., & Salonitis, K. (2021). An approach to airline MRO operators planning and scheduling during aircraft line maintenance checks using discrete event simulation. *Procedia Manufacturing*, 54, 160-165.
- Azadeh, A., Gharibdousti, M. S., Firoozi, M., Baseri, M., Alishahi, M., & Salehi, V. (2016). Selection of optimum maintenance policy using an integrated multi-criteria Taguchi modeling approach by considering resilience engineering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84, 1067-1079.
- Baptista, M., de Medeiros, I. P., Malere, J. P., Nascimento Jr, C., Prendinger, H., & Henriques, E. M. (2017). Comparative case study of life usage and data-driven prognostics techniques using aircraft fault messages. *Computers in Industry*, 86, 1-14.
- Beliën, J., Cardoen, B., & Demeulemeester, E. (2012). Improving workforce scheduling of aircraft line maintenance at Sabena Technics. *Interfaces*, 42(4), 352-364.
- Boeing. (2008). 777 family maintenance analysis & budget. *Aircraft Commerce*, 60, 12-23.
- Boeing. (2013). Assessing the 777's long-term base maintenance costs. *Aircraft Commerce*, 87, 28-42.
- Boeing. (2016). *Boeing 777-300ER Maintenance Interval*. <https://www.boeing-me.com/en/products-and-services/zzbucket/777>
- Boeing. (2022). *777-200/-300 Airplane Characteristics for Airport Planning*. https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/777_2_2er_3.pdf
- Bowers, M. R., Bichescu, B. C., Bryan, N., Polak, G. G., Gilbert, K., & Keene, D. (2022). The maintenance conversion scheduling problem: Models and insights. *Naval Research Logistics*, 69(7), 1027-1044.
- Broderick, S. (2020). *Emirates Customizes 777 Checks Using Own Data*. <https://aviationweek.com/air-transport/emirates-customizes-777-checks-using-own-data>
- Deng, Q., Santos, B. F., & Curran, R. (2020). A practical dynamic programming based methodology for aircraft maintenance check scheduling optimization. *European Journal of Operational Research*, 281(2), 256-273.

- Deng, Q., Santos, B. F., & Verhagen, W. J. (2021). A novel decision support system for optimizing aircraft maintenance check schedule and task allocation. *Decision Support Systems*, 146, 113545.
- Duvignau, R., Heinisch, V., Göransson, L., Gulisano, V., & Papatriantafyllou, M. (2021). Benefits of small-size communities for continuous cost-optimization in peer-to-peer energy sharing. *Applied Energy*, 301, 117402.
- Eltoukhy, A. E. E., Wang, Z. X., Chan, F. T. S., Chung, S. H., Ma, H. L., & Wang, X. P. (2020). Robust Aircraft Maintenance Routing Problem Using a Turn-Around Time Reduction Approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 50(12), 4919-4932.
- Esangbedo, M. O., & Samuel, B. O. (2024). Application of machine learning and grey Taguchi technique for the development and optimization of a natural fiber hybrid reinforced polymer composite for aircraft body manufacture. *Oxford Open Materials Science*, 4(1), itae004.
- Fu, S., & Avdelidis, N. P. (2023). Prognostic and Health Management of Critical Aircraft Systems and Components: An Overview. *Sensors*, 23(19), 8124.
- Ghobbar, A. A. (2010). Aircraft Maintenance Engineering. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd, 1-13.
- Jaafaru, H., & Agbelie, B. (2022). Bridge maintenance planning framework using machine learning, multi-attribute utility theory and evolutionary optimization models. *Automation in Construction*, 141, 104460.
- Kabashkin, I., Perekrestov, V., Tyncherov, T., Shoshin, L., & Susanin, V. (2024). Framework for Integration of Health Monitoring Systems in Life Cycle Management for Aviation Sustainability and Cost Efficiency. *Sustainability*, 16(14), 6154.
- Karaoğlu, U., Mbah, O., & Zeeshan, Q. (2023). Applications of machine learning in aircraft maintenance. *Journal of Engineering Management and Systems Engineering*, 2(1), 76-95.
- Korba, P., Šváb, P., Vereš, M., & Lukáč, J. (2023). Optimizing aviation maintenance through algorithmic approach of real-life data. *Applied Sciences*, 13(6), 3824.
- Kulkarni, A., Yadav, D. K., & Nikraz, H. (2017). Aircraft maintenance checks using critical chain project path. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 89(6), 879-892.
- Lin, Z. L., Huang, Y. S., & Fang, C. C. (2015). Non-periodic preventive maintenance with reliability thresholds for complex repairable systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 136, 145-156.

- Martone, F., Zazzaro, G., Inverno, M., De Luca, S., Mainieri, F., & Romano, G. (2024). A Supporting Framework for Aircraft MRO Operations: Capacity Planning, Tasks Traceability and Disembarked Items Tracking. In *2024 34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)* (pp. 1-19).
- Mattila, V., & Virtanen, K. (2014). Maintenance scheduling of a fleet of fighter aircraft through multi-objective simulation-optimization. *Simulation*, 90(9), 1023-1040.
- Mofokeng, T. J., & Marnewick, A. (2017, June). Factors contributing to delays regarding aircraft during A-check maintenance. In *2017 IEEE Technology & Engineering Management Conference (TEMSCON)* (pp. 185-190). IEEE.
- Papakostas, N., Papachatzakis, P., Xanthakis, V., Mourtzis, D., & Chrysosolouris, G. (2010). An approach to operational aircraft maintenance planning. *Decision Support Systems*, 48(4), 604-612.
- Pimapunsi, K., & Weeranan, D. (2018). Solving complexity and resource-constrained project scheduling problem in aircraft heavy maintenance. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(11), 8998-9004.
- Pop, G. I., Titu, A. M., & Pop, A. B. (2023). Enhancing Aerospace Industry Efficiency and Sustainability: Process Integration and Quality Management in the Context of Industry 4.0. *Sustainability*, 15(23), 16206.
- Rao, M. V., Chaitanya, M. S. R. K., & Vidhu, K. P. (2017). Aircraft servicing, maintenance, repair & overhaul—the changed scenarios through outsourcing. *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, 7(5), 249-270.
- Regattieri, A., Giazzi, A., Gamberi, M., & Gamberini, R. (2015). An innovative method to optimize the maintenance policies in an aircraft: General framework and case study. *Journal of air transport management*, 44, 8-20.
- Saranga, H., & Kumar, U. D. (2006). Optimization of aircraft maintenance/support infrastructure using genetic algorithms—level of repair analysis. *Annals of Operations Research*, 143, 91-106.
- Sarhani, M., Ezzinbi, O., El Afia, A., & Benadada, Y. (2016, May). Particle swarm optimization with a mutation operator for solving the preventive aircraft maintenance routing problem. In *2016 3rd International Conference on Logistics Operations Management (GOL)* (pp. 1-6). IEEE.
- Shandookh, A. A., Ogaili, A. A. F., & Al-Haddad, L. A. (2024). Failure analysis in predictive maintenance: Belt drive diagnostics with expert systems and Taguchi method for unconventional vibration features. *Heliyon*, 10(13), e34202.
- Shaukat, S., Katscher, M., Wu, C. L., Delgado, F., & Larrain, H. (2020). Aircraft line maintenance scheduling and optimisation. *Journal of Air Transport Management*, 89, 101914.

- Sriram, C., & Haghani, A. (2003). An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(1), 29-48.
- Sukthomya, W., & Tannock, J. D. (2005). Taguchi experimental design for manufacturing process optimisation using historical data and a neural network process model. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 22(5), 485-502.
- Şentürk, C., Kavsaoglu, M. S., & Nikbay, M. (2010, September). Optimization of aircraft utilization by reducing scheduled maintenance downtime. In *10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference* (p. 9143).
- Tyagi, A., Tripathi, R., & Bouarfa, S. (2023). Learning from past in the aircraft maintenance industry: An empirical evaluation in the safety management framework. *Heliyon*, 9(11), e21620.
- van der Weide, T., Deng, Q., & Santos, B. F. (2022). Robust long-term aircraft heavy maintenance check scheduling optimization under uncertainty. *Computers & Operations Research*, 141, 105667.
- Verhagen, W. J., Santos, B. F., Freeman, F., van Kessel, P., Zarouchas, D., Loutas, T., ... & Heiets, I. (2023). Condition-Based Maintenance in Aviation: Challenges and Opportunities. *Aerospace*, 10(9), 762.
- Vieira, D. R., & Loures, P. L. (2016). Maintenance, repair and overhaul (MRO) fundamentals and strategies: An aeronautical industry overview. *International Journal of Computer Applications*, 135(12), 21-29.
- Yang, Z., & Yang, G. (2012). Optimization of Aircraft Maintenance plan based on Genetic Algorithm. *Physics Procedia*, 33, 580-586.
- Yilmaz, O., Gindy, N., & Gao, J. (2010). A repair and overhaul methodology for aeroengine components. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(2), 190-201.
- Zhang, Q., Chung, S. H., Ma, H. L., & Sun, X. (2024). Robust aircraft maintenance routing with heterogenous aircraft maintenance tasks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 160, 104518.
- Zio, E., Fan, M., Zeng, Z., & Kang, R. (2019). Application of reliability technologies in civil aviation: Lessons learnt and perspectives. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(1), 143-158.



SYNTHESIS, EVALUATION OF ANTIFUNGAL ACTIVITY AND DRUG-LIKENESS OF BENZOYL THIOUREA DERIVATIVES

BENZOİL TİYOÜRE TÜREVLERİNİN SENTEZİ, ANTİFUNGAL
AKTİVİTESİNİN VE İLAÇ OLABİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Şule EROL GÜNAL¹

Engin KAPLAN²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1588118>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
sule.gunal@iuc.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
20.11.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
14.03.2025

Accepted
(Kabul Tarihi)
18.03.2025

Abstract

Herein, we report the synthesis of a series of 2-bromobenzoyl-substituted thiourea derivatives. The structures of the synthesized thioureas were characterized by spectroscopic methods. These derivatives, together with 2-fluorobenzoyl thioureas synthesized previously, have been evaluated for their potential antifungal activity. Compounds 2d and 2f showed antifungal activity against *Candida albicans*. Compound 2f also demonstrated activity against *C. parapsilosis*. Drug-likeness properties of the compounds were also estimated, and it was found that all compounds showed good drug-likeness properties.

Keywords: Benzoyl thioureas, antifungal activity, drug-likeness properties, in silico SwissADME.

Öz

Bu çalışmada, bir dizi 2-bromobenzoil tiyüüre türevleri sentezlenmiştir. Sentezlenen tiyüürelerin yapıları spektroskopik yöntemlerle tanımlanmıştır. Bu türevler, daha önce sentezlenen 2-florobenzoil tiyüürelerle birlikte, potansiyel antifungal aktiviteleri açısından değerlendirilmiştir. Bileşik 2d ve 2f, *Candida albicans*'a karşı antifungal aktivite göstermiştir. Bileşik 2f ayrıca *C. parapsilosis*'e karşı aktivite göstermiştir. Bileşiklerin ilaç olabilirlik özellikleri de tahmin edilmiş ve tüm bileşiklerin iyi ilaç olabilirlik özellikleri gösterdiği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Benzoil tiyüüreler, antifungal aktivite, ilaç olabilirlik özellikleri, in silico SwissADME.

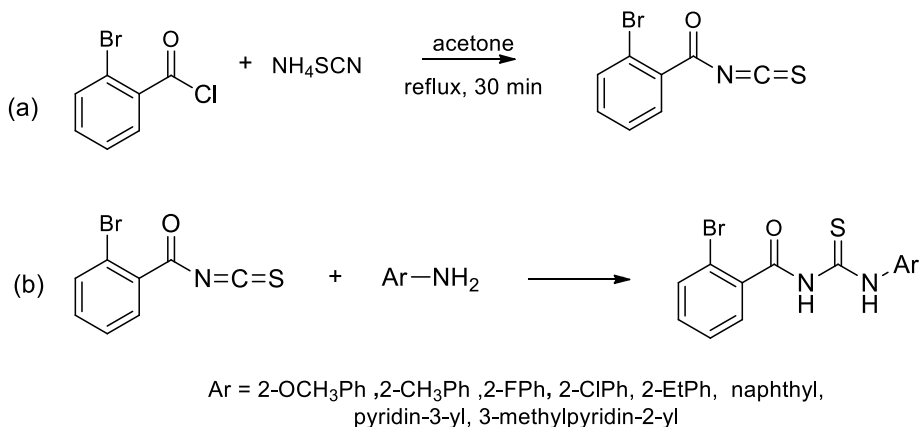
¹ İstanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Pharmacy, Department of Pharmaceutical Chemistry, İstanbul, Türkiye.
sule.gunal@iuc.edu.tr

² İstanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Pharmacy, Department of Pharmaceutical Microbiology, İstanbul, Türkiye.
engin.kaplan@iuc.edu.tr

1. INTRODUCTION

Thioureas have been the subject of considerable interest because of their wide range of biological activities such as anticancer, antimicrobial, anti-inflammatory, antioxidant, antituberculosis and antimalarial activities (Agili, 2022; Anna et al., 2023; Dey et al. 2023; Hroch et al. 2017; Riccardo et al., 2021; Shivakumara & Sridhar, 2021; Shulgau et al. 2024; Strzyga et al., 2021). Thioureas are also used as starting compounds in the synthesis of many heterocyclic compounds. Moreover, their ability to form complexes with metal ions enhances their utility in the field of drug design and development (Canudo-Barreras et al., 2021; Seo et al., 2023). It was reported that copper complexes of some thioureas showed anticancer activity (Yaqeen & Rafid, 2023).

Since the fluorine is the most electronegative atom, the incorporation of fluorine atom into compounds changes properties of compounds which are important in drug design (Ali & Zhou, 2023; Han et al., 2020; O'Hagan, 2010). There are many fluorine-containing drugs like Lipitor, Linezolid and Sitagliptin on the market (Ali & Zhou, 2023; Han et al., 2020; O'Hagan, 2010; Rizzo et al., 2023; Shah & Westwell, 2007). Consequently, the synthesis of fluorine-containing compounds has always been a subject of interest. In a previous study, we synthesized a series of 2-fluorobenzoyl substituted thioureas (2a-f) (Erol Günal, 2023). In the present study, 2-bromobenzoyl substituted thioureas (1a-h) were synthesized (Scheme 1 and Table 1) and both 2-bromo and 2-fluoro benzoyl substituted thioureas (1a-h and 2a-f) were evaluated for their antifungal activities. Furthermore, their drug-likeness properties were predicted using in silico SwissADME tool (Daina et al. 2017).



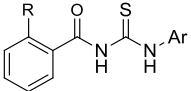
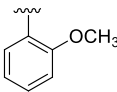
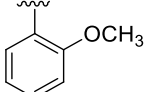
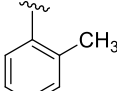
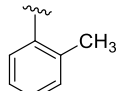
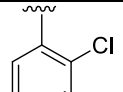
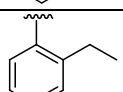
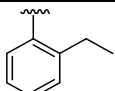
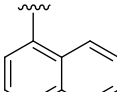
Scheme 1. Synthesis of 2-bromobenzoyl Substituted Thioureas

2. RESULTS AND DISCUSSION

2.1. Synthesis

2-Bromobenzoyl chloride was reacted with ammonium thiocyanate to afford 2-bromobenzoyl isothiocyanate, which was subsequently reacted with aniline derivatives to give 2-bromo benzoyl thioureas (1a-h) (Scheme 1 and Table 1). The structures of the synthesized thioureas were confirmed by ^1H NMR, ^{13}C NMR and IR spectroscopy. As an example, the ^1H NMR, ^{13}C NMR and IR spectra of compound 1b are given in Figure 1, Figure 2 and Figure 3, respectively.

Table 1. Structures and Names of the Studied Compounds

					
compound	R	Ar	compound	R	Ar
1a	Br		2a	F	
1b	Br		2b	F	
1c	Br		2c	F	
1d	Br		2d	F	
1e	Br		2e	F	
1f	Br		2f	F	
1g	Br				
1h	Br				

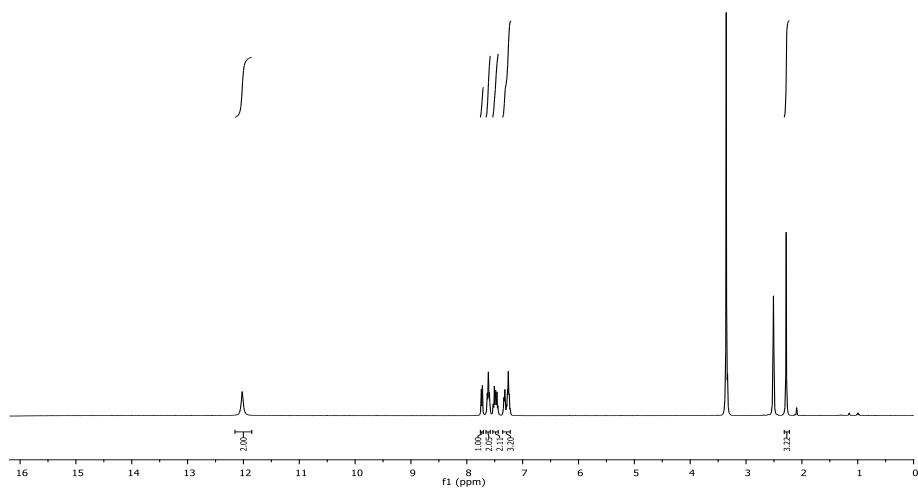


Figure 1. ¹H NMR Spectrum of Compound 1b

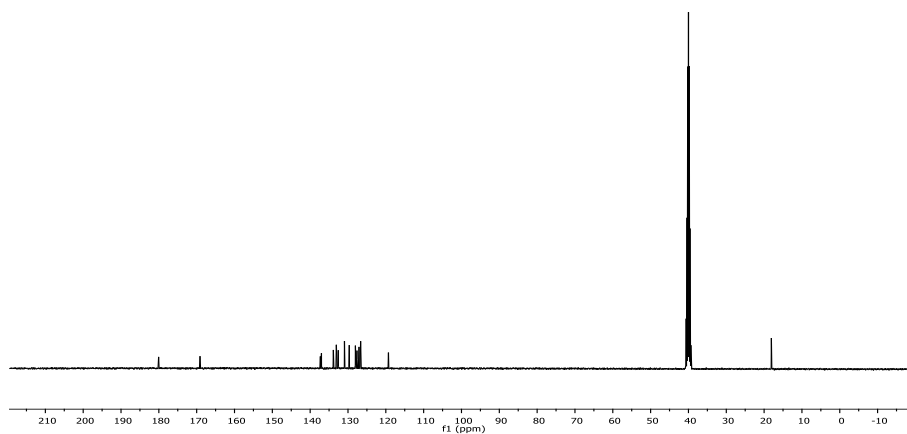


Figure 2. ¹³C NMR Spectrum of Compound 1b

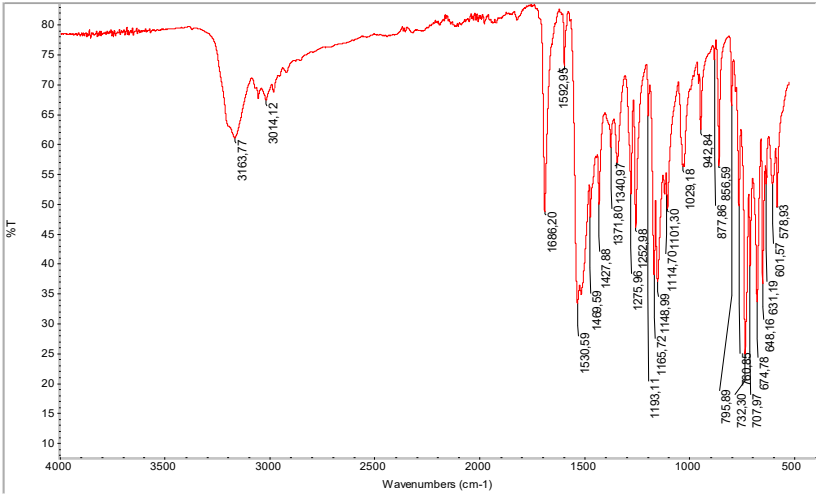


Figure 3. IR Spectrum of Compound 1b

2.2. Antifungal Activity

The compounds were evaluated *in vitro* against fungal species of *C. albicans*, *C. parapsilosis* and *C. glabrata*. The MIC values of the studied compounds were given in Table 2. Among 2-fluorobenzoyl substituted thioureas compound 2d showed the best antifungal activity with MIC value of 125 µg/mL against *C. albicans*. Compound 2f also showed antifungal activity (125 µg/mL) against *C. albicans* and *C. parapsilosis*. 2-Bromobenzoyl substituted thioureas did not show sufficient antifungal activity.

Table 2. Antifungal Activity of the Compounds (MIC in µg/mL)

Compd.	<i>C. albicans</i> (ATCC 14053)	<i>C. parapsilosis</i> (ATCC 22019)	<i>C. glabrata</i> (ATCC 15126)
1a	>500	>500	>500
1b	>500	>500	>500
1c	>500	>500	>500
1d	>500	>500	>500
1e	>500	>500	>500
1f	>500	>500	>500
1g	>500	>500	>500
1h	>500	>500	>500
2a	>500	>500	>500
2b	>500	>500	>500
2c	>500	>500	>500
2d	125	>500	>500
2e	>500	>500	>500
2f	125	125	>500
Fluconazole	0,49	0,25	3,90

2.3. Drug-likeness Properties

We calculated the physicochemical properties of all compounds using SwissADME. The results are given in Table 3. All compounds comply with the five Lipinski rules and possess good drug-likeness properties. The BOILED-Egg model (Daina&Zoete, 2016), which is a graphical method developed for studying the drug permeation in the brain or intestines, was also studied (Figure 4). All compounds have high GI (Gastrointestinal) absorption. Compounds except 1a, 1f, 1g, 1h, 2a, 2e and 2f showed BBB (Blood-Brain Barrier) permeation. (Figure 4 and Table 4) Furthermore, skin permeation was predicted as Log Kp (Table 4). A more negative value of Log Kp represents less skin permeability (Potts et al. 1992).

Table 3. Predicted ADME Properties of the Compounds (1a-h and 2a-f)

Comp.	MW ^a	HA ^b	C _{sp3} ^c	RB ^d	HBA ^e	HBD ^f	MR ^g	TPS ^h	Log P _{o/w} ⁱ	Log S ^j	Lipinski's violation
1a	365,24	21	0,07	6	2	2	90,25	82,45	3,39	-5,29	0
1b	349,25	20	0,07	5	1	2	88,72	73,22	3,69	-5,00	0
1c	353,21	20	0	5	2	2	83,71	73,22	3,94	-4,86	0
1d	369,66	20	0	5	1	2	88,77	73,22	4,04	-5,78	0
1e	363,27	21	0,12	6	1	2	93,53	73,22	3,95	-5,28	0
1f	385,28	23	0	5	1	2	101,26	73,22	4,54	-5,85	0
1g	336,21	19	0	5	2	2	81,55	86,11	2,78	-4,25	0
1h	350,23	20	0,07	5	2	2	86,52	86,11	3,09	-4,54	0
2a	304,34	21	0,07	6	3	2	82,51	82,45	3,19	-4,54	0
2b	288,34	20	0,07	5	2	2	80,98	73,22	3,49	-4,25	0
2c	308,76	20	0	5	2	2	81,02	73,22	3,84	-5,02	0
2d	302,37	21	0,12	6	2	2	85,79	73,22	3,74	-4,53	0
2e	275,3	19	0	5	3	2	73,81	86,11	2,58	-3,50	0
2f	289,33	20	0,07	5	3	2	78,77	86,11	2,89	-3,80	0

^aMolecular weight in g/mol.

^bNumber of heavy atoms

^cFraction of C_{sp3}

^dNumber of rotatable bonds

^eNumber of hydrogen bond acceptors

^fNumber of hydrogen bond donors

^gMolar Refractivity

^hTopological polar surface area (Å²)

ⁱLogarithm of partition coefficient between n-octanol and water

^jLogarithm of solubility

Table 4. GI (Gastrointestinal) Absorption, BBB (Blood-Brain Barrier) Permeation and logKp Values of Compounds (1a-h and 2a-f)

Compound	GI absorption	BBB permeant	log Kp (cm/s)	Compound	GI absorption	BBB permeant	log Kp (cm/s)
1a	High	No	-4,97	2a	High	No	-5,02
1b	High	Yes	-5,19	2b	High	Yes	-5,23
1c	High	Yes	-5,39	2c	High	Yes	-4,63
1d	High	Yes	-4,57	2d	High	Yes	-5,01
1e	High	Yes	-4,96	2e	High	No	-5,93
1f	High	No	-4,77	2f	High	No	-5,76
1g	High	No	-5,89				
1h	High	No	-5,71				

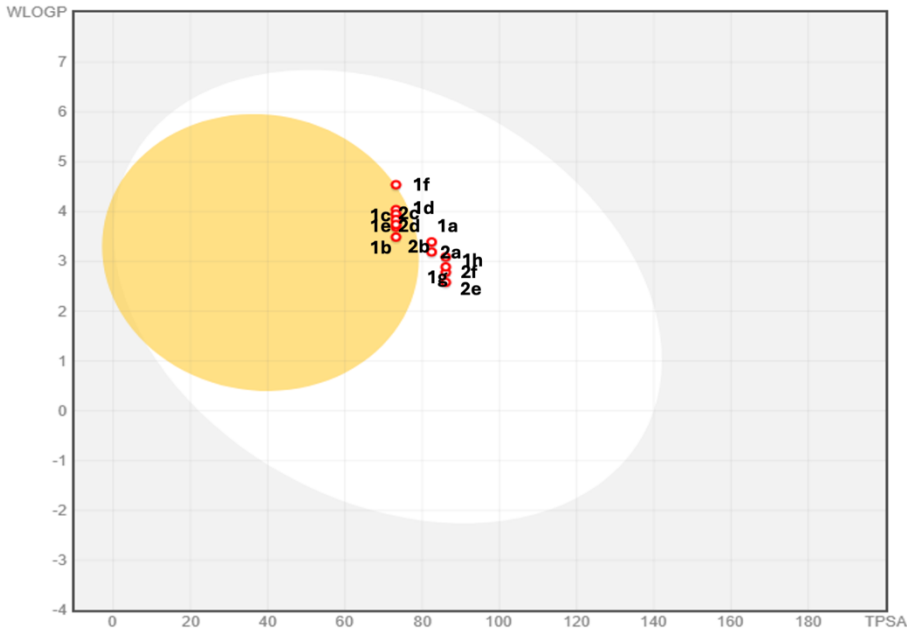


Figure 4. BOILED-Egg Model of Studied Compounds (The white part represents the HIA absorption region, the yellow part represents the BBB permeation region and the grey part represents the low absorption and limited brain permeation region)

3. METHODS

3.1. Materials and Instrumentation

All chemicals were purchased from Sigma-Aldrich. The ^1H and ^{13}C NMR spectra of all the were obtained using a Varian-Mercury VX-400 MHz-BB. FTIR spectroscopy analyses were carried out on a Thermo Fisher Nicolet 380 instrument. Melting points were determined using the Electrothermal 9100 apparatus. Strains used were obtained from the American Type Culture Collection (ATCC).

3.2. General Procedure for the Preparation of Compounds

Ammonium thiocyanate (0,38 g, 5 mmol, 1eq) and 2-bromobenzoyl chloride (1,10 g, 5 mmol, 1eq) were refluxed in 15 mL of acetone for 20 minutes. The solution was filtered and used for the next step. The appropriate aniline derivative (5mmol, 1eq) was added to the filtrate and refluxed for 4 hours. The solution was cooled and a precipitate formed. The precipitate was filtered and purified by recrystallisation from ethanol. (Erol Günal, 2023).

3.2.1. 1-(2-bromobenzoyl)-3-(2-methoxyphenyl) thiourea (1a).

Yield: 0,79 g. White solid. (72%). mp:90-92°C. ^1H NMR (400 MHz, DMSO- d_6): δ 12,80 (s, 1H), 12,02 (s, 1H), 8,69 (d, $J = 7,8$ Hz, 1H), 7,72 (d, $J = 7,7$ Hz, 1H), 7,62 (dd, $J = 7,3, 1,5$ Hz, 1H), 7,53 – 7,38 (m, 2H), 7,29 – 7,21 (m, 1H), 7,20 – 7,13 (m, 1H), 7,01 (m, 1H), 3,91 (s, 3H). ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO- d_6): δ 177,70, 169,1, 150,8, 136,9, 133,0, 132,5, 129,7, 128,0, 127,3, 127,1, 123,0, 120,3, 119,3, 111,8, 56,6. FTIR (ν_{max} , cm^{-1}): 3164 (NH), 1628 (C=O), 1263 (C=S). Calculated for $\text{C}_{15}\text{H}_{13}\text{BrN}_2\text{O}_2\text{S}$: C, 49,33; H, 3,59; N, 7,67; S, 8,78. Found: C, 49,57; H, 3,68; N, 7,57; S, 8,59.

3.2.2. 1-(2-bromobenzoyl)-3-(2-tolyl) thiourea (1b).

Yield: 0,73 g. White solid. (70%). mp:158-160 °C. ^1H NMR (DMSO- d_6 , 400 MHz): δ 12,02 (s, 2H), 7,73 (d, $J = 7,8$ Hz, 1H), 7,59 (m 2H), 7,48 (m, 2H), 7,37 – 7,12 (m, 3H), 2,28 (s, 2H). ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO- d_6): δ 180,06, 169,11, 137,30, 137,01, 133,87, 133,08, 132,56, 130,93, 129,66, 128,04, 127,63, 127,09, 126,66, 119,30, 18,08. FTIR (ν_{max} , cm^{-1}): 3163 (NH), 1686 (C=O), 1252 (C=S). Calculated for $\text{C}_{15}\text{H}_{13}\text{BrN}_2\text{OS}$: C, 51,59; H, 3,75; N, 8,02; S, 9,18. Found: C, 51,69; H, 3,69; N, 8,12; S, 9,36.

3.2.3. 1-(2-bromobenzoyl)-3-(2-fluorophenyl) thiourea (1c).

Yield: 0,69 g. White solid. (65 %). mp:144-146 °C. ^1H NMR (DMSO- d_6 , 400 MHz): δ 12,29 (s, 1H), 12,20 (s, 1H), 8,05 (t, $J = 7,8$ Hz, 1H), 7,73 (dd, $J = 7,7, 1,2$ Hz, 1H), 7,63 (dd, $J = 7,3, 1,7$ Hz, 1H), 7,56 – 7,44 (m, 2H), 7,41 – 7,33 (m, 2H), 7,32 – 7,21 (m, 1H). ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO- d_6): δ 180,21, 169,21, 136,81, 133,10, 132,67, 129,72, 128,79, 128,72, 128,05, 127,46, 126,54, 126,43, 124,80, 124,77, 119,30, 116,32, 116,13. FTIR (ν_{max} , cm^{-1}): 3152 (NH), 1681 (C=O), 1204 (C=S). Calculated for $\text{C}_{14}\text{H}_{10}\text{BrFN}_2\text{OS}$: C, 47,61; H, 2,85; N, 7,93; S, 9,08. Found: C, 47,55; H, 2,95; N, 7,13; S, 8,98.

3.2.4. 1-(2-bromobenzoyl)-3-(2-chlorophenyl) thiourea (1d).

Yield: 0,76 g. White solid. (68 %). mp:138-140 °C. ^1H NMR (DMSO- d_6 , 400 MHz): δ 12,40 (s, 1H), 12,22 (s, 1H), 8,07 (d, J = 8,0 Hz, 1H), 7,74 (d, J = 7,8 Hz, 1H), 7,66 – 7,51 (m, 2H), 7,51 – 7,23 (m, 4H). ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO- d_6): δ 180,18, 169,22, 136,79, 135,72, 133,12, 132,69, 130,04, 129,71, 128,74, 128,69, 128,32, 128,06, 127,81, 119,31. FTIR (ν_{max} , cm^{-1}): 3132 (NH), 1685 (C=O), 1244 (C=S). Calculated for $\text{C}_{14}\text{H}_{10}\text{BrClN}_2\text{OS}$: C, 45,49; H, 2,73; N, 7,58; S, 8,67. Found: C, 45,29; H, 2,57; N, 7,68; S, 8,49.

3.2.5. 1-(2-bromobenzoyl)-3-(2-ethylphenyl) thiourea (1e).

Yield: 0,78 g. White solid. (72%) mp:118-120 °C. ^1H NMR (DMSO- d_6 , 400 MHz): δ 12,09 (s, 1H), 12,07 (s, 1H), 7,73 (d, J = 7,7 Hz, 1H), 7,66 – 7,44 (m, 4H), 7,41 – 7,20 (m, 3H), 2,63 (q, J = 7,5 Hz, 2H), 1,19 (t, J = 7,5 Hz, 3H). ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO- d_6): δ 180,53, 169,28, 139,50, 136,99, 136,63, 133,08, 132,58, 129,64, 129,34, 128,05, 127,92, 127,76, 126,64, 119,29, 24,60, 14,84. FTIR (ν_{max} , cm^{-1}): 3147 (NH), 1677 (C=O), 1277 (C=S). Calculated for $\text{C}_{16}\text{H}_{15}\text{BrN}_2\text{OS}$: C, 52,90; H, 4,16; N, 7,71; S, 8,83. Found: C, 52,76; H, 4,27; N, 7,91; S, 8,66.

3.2.6. 1-(2-bromobenzoyl)-3-(1-naphthyl) thiourea (1f).

Yield: 0,81 g. White solid. (70 %). mp:176-178 °C. ^1H NMR (DMSO- d_6 , 400 MHz): δ 12,44 (s, 1H), 12,18 (s, 1H), 8,04 (d, J = 7,8 Hz, 1H), 7,96 (t, J = 7,7 Hz, 2H), 7,83 (d, J = 7,3 Hz, 1H), 7,76 (d, J = 7,8 Hz, 1H), 7,71 (d, J = 7,3 Hz, 1H), 7,68 – 7,57 (m, 3H), 7,51 (ddd, J = 13,7, 11,1, 6,7 Hz, 2H). ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO- d_6): δ 181,11, 169,27, 137,08, 134,59, 134,24, 133,11, 132,61, 129,78, 129,08, 128,91, 128,05, 127,97, 127,29, 126,86, 125,98, 125,14, 122,55, 119,36. FTIR (ν_{max} , cm^{-1}): 3167 (NH), 1682 (C=O), 1247 (C=S). Calculated for $\text{C}_{18}\text{H}_{13}\text{BrN}_2\text{OS}$: C, 56,11; H, 3,40; N, 7,27; S, 8,32. Found: C, 56,02; H, 3,55; N, 7,367; S, 8,52.

3.2.7. 1-(2-bromobenzoyl)-3-(pyridin-3-yl) thiourea (1g).

Yield: 0,60 g. White solid. (60%) mp:182-186°C. ^1H NMR (400 MHz, DMSO- d_6): δ 12,24 (s, 1H), 12,15 (s, 1H), 8,75 (d, J = 2,3 Hz, 1H), 8,48 (dd, J = 4,7, 1,3 Hz, 1H), 8,12 (d, J = 8,1 Hz, 1H), 7,73 (dd, J = 7,8, 1,1 Hz, 1H), 7,62 (dd, J = 7,4, 1,7 Hz, 1H), 7,56 – 7,35 (m, 3H). ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO- d_6): δ 180,47, 168,84, 147,66, 146,86, 136,89, 135,41, 133,24, 133,14, 132,66, 129,72, 128,07, 123,88, 119,31. FTIR (ν_{max} , cm^{-1}): 3152 (NH), 1680 (C=O), 1283 (C=S). Calculated for $\text{C}_{13}\text{H}_{10}\text{BrN}_3\text{OS}$: C, 46,44; H, 3,00; N, 12,50; S, 9,54. Found: C, 46,66; H, 3,15; N, 12,59; S, 9,48.

3.2.8. 1-(2-bromobenzoyl)-3-(3-methylpyridin-2-yl) thiourea (1h).

Yield: 0,64 g. White solid. (61%) mp:148-150 °C. ^1H NMR (DMSO- d_6 , 400 MHz): δ 12,09 (s, 1H), 12,02 (s, 1H), 8,35 (d, J = 3,8 Hz, 1H), 7,75 (dd, J = 15,7, 7,7 Hz, 2H), 7,62 (d, J = 7,3 Hz, 1H), 7,57 – 7,40 (m, 2H), 7,34 (dd, J = 7,3, 4,8 Hz, 1H), 2,31 (s, 3H). ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO- d_6): δ 180,36, 168,82, 150,38, 146,77, 139,98, 136,85, 133,07, 132,58, 131,14, 129,54, 128,00, 123,91, 119,21, 17,44. FTIR (ν_{max} , cm^{-1}):

¹): 3150 (NH), 1666 (C=O), 1240 (C=S). Calculated for C₁₄H₁₂BrN₃OS: C, 48,01; H, 3,45; N, 12,00; S, 9,16. Found: C, 48,38; H, 3,21; N, 12,13; S, 9,01.

3.3. Antifungal Activity

The microbroth dilution method was used to assess the minimum inhibitory concentration (MIC) of the compounds in accordance with the Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI) M27-A3 document (CLSI, 2008) against *Candida albicans* (ATCC 14053), *C. parapsilosis* (ATCC 22019), and *C. glabrata* (ATCC 15126). Stock solutions were prepared at 1 mg/mL in DMSO. The cell density was adjusted to McFarland 0,5 in sterile PBS. Two-fold dilutions were prepared in 100 µL of MOPS (0,165 M) buffered RPMI 1640 medium (pH 7,0; Sigma-Aldrich, St. Louis, MO). Then, 10 µL cell suspensions were added to all test wells and the plates were incubated at 37 °C for 18 hours. The MIC values were determined visually and spectrophotometrically at 450 nm. Fluconazole (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO) was used as reference drug.

4. CONCLUSION

In the present study, 2-bromobenzoyl thiourea derivatives were synthesized and characterized. Antifungal activities of 2-bromobenzoyl and previously synthesized 2-fluorobenzoyl thioureas were evaluated *in vitro* against several fungal species, including *C. albicans*, *C. parapsilosis*, and *C. glabrata*. The 2-bromobenzoyl substituted thioureas (compounds 1a-h) did not demonstrate sufficient antifungal activity. However, the previously synthesized 2-fluorobenzoyl thioureas (compounds 2a-f) exhibited promising antifungal activity. Among 2-fluorobenzoyl thioureas, compound 2d showed the best antifungal activity with an MIC value of 125 µg/mL against *C. albicans*. Additionally, compound 2f demonstrated activity against both *C. albicans* and *C. parapsilosis* at the same MIC value. Moreover, drug-likeness properties of all compounds were predicted using *in silico* tools.

Authors' Contribution

S. E. G.: Conceptualization, investigation, experimental methodology, computational methodology, writing original draft. E.K.: investigation, experimental methodology, computational methodology, writing original draft.

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest between the authors.

Research and Publication Ethics Statement

Research and publication ethics were followed in the study.

REFERENCES

Agili, F.A. (2024). Biological Applications of Thiourea Derivatives: Detailed Review. Chemistry. 6(3), 435-468. <https://doi.org/10.3390/chemistry6030025>

- Anna, B., Agnieszka, G., Ewa, A., Jolanta, O., Dagmara, K., Marta, S. (2023). In vitro antimycobacterial activity and interaction profiles of diaryl thiourea-copper (II) complexes with antitubercular drugs against *Mycobacterium tuberculosis* isolates. *Tuberculosis*. 143, 102412. <https://doi.org/10.1016/j.tube.2023.102412>
- Calixto S.D., Simão T.L.B.V., Palmeira-Mello M.V., Viana G.M., Assumpção P.W.M.C., Rezende M.G., Santo C.C.E., Mussi V.O., Rodrigues C.R., Lasunskiaia E., Souza A. M. T., Cabral L.M., Muzitano M.F. (2022). Antimycobacterial and anti-inflammatory activities of thiourea derivatives focusing on treatment approaches for severe pulmonary tuberculosis. *Bioorg. Med. Chem.* 53, 116506. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2021.116506>
- Canudo-Barreras, G., Ortego, L., Izaga, A., Marzo, I., Herrera, R. P., & Gimeno, M. C. (2021). Synthesis of New Thiourea-Metal Complexes with Promising Anticancer Properties. *Molecules*, 26(22), 6891. <https://doi.org/10.3390/molecules26226891>
- Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). 2008. Reference method for broth dilution antifungal susceptibility testing of yeasts; approved standard, 3rd ed; CLSI document M27-A3. Clinical and Laboratory Standards Institute, Wayne, PA.
- Daina A, Michielin O, Zoete V. (2017). SwissADME: a free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules. *Sci Rep.* 7, 42717. <https://doi.org/10.1038/srep42717>
- Daina A., Zoete V. (2016). A BOILED-Egg to predict gastrointestinal absorption and brain penetration of small molecules, *ChemMedChem*, 11, 1117–1121. <https://doi.org/10.1002/cmdc.201600182>
- Dey S., Patel A., Haloi N., Srimayee S., Paul S., Barik G.K., Akhtar N., Shaw D., Hazarika G., Prusty B.M., Kumar, Santra M.K., Tajkhorshid E., Bhattacharjee S., Manna D. (2023). Quinoline Thiourea-Based Zinc Ionophores with Antibacterial Activity. *J. Med. Chem.* 66 (16), 11078-11093 <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.3c00368>
- Erol Günal, Ş. (2023). Synthesis Of 2-Fluorobenzoyl Thiourea Derivatives. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 22(44), 417-424. <https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1364818>
- Hroch L., Guest P., Benek O., Soukup O., Janockova J., Dolezal R., Kuca K., Aitken L., Smith T.K., Gunn-Moore F., Zala D., Ramsay R.R., Musilek K. (2017). Synthesis and evaluation of frentizole-based indolyl thiourea analogues as MAO/ABAD inhibitors for Alzheimer's disease treatment. *Bioorg. Med. Chem.* 25(3), 1143-1152. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2016.12.029>
- Potts R.O., Guy R.H. (1992). Predicting skin permeability, *Pharm. Res.* 9, 663–669 <https://doi.org/10.1023/a:1015810312465>

- Riccardo, R., Giada, M., Andrea, C., Antimo, G., Emidio, C. (2021). Recent advances in urea- and thiourea-containing compounds: Focus on innovative approaches in medicinal chemistry and organic synthesis. *RSC Med. Chem.* 12(7), 1046–1064. <https://doi.org/10.1039/D1MD00058F>
- Seo, H., Kohlbrand, A.J., Stokes, R.W., Chung, J., Cohen, S.M. (2023). Masking thiol reactivity with thioamide, thiourea, and thiocarbamate-based MBPs. *Chem. Commun.* 59(16), 2283–2286. <https://doi.org/10.1039/D2CC06596G>
- Shivakumara, K.N., Sridhar, B.T. (2021). Review on role of urea and thiourea derivatives of some heterocyclic Scaffold in drug design and medicinal chemistry. *Int. J. Chem. Res. Dev.* 3(1), 20–25. <https://doi.org/10.33545/26646552.2021.v3.i1a.23>
- Shulgau Z., Palamarchuk I., Sergazy S., Urazbayeva A., Gulyayev A., Ramankulov Y., Kulakov. I. (2024). Synthesis, Computational Study, and In Vitro α -Glucosidase Inhibitory Action of Thiourea Derivatives Based on 3-Aminopyridin-2(1H)-Ones. *Molecules.* 29(15), 3627. <https://doi.org/10.3390/molecules29153627>
- Strzyga-Lach, P., Chrzanowska, A., Podsadni, K., Bielenica, A. (2021). Investigation of the Mechanisms of Cytotoxic Activity of 1,3-Disubstituted Thiourea Derivatives. *Pharmaceuticals*, 14, 1097. <https://doi.org/10.3390/ph14111097>
- Yaqeen, M.A. Rafid, H.A. (2023). Synthesis, Anti-breast Cancer Activity, and Molecular Docking Studies of Thiourea Benzamide Derivatives and Their Complexes with Copper Ion. *Trop. J. Nat. Prod. Res.* 7(6), 3158–3167. <http://www.doi.org/10.26538/tjnpr/v7i6.15>



BİR VANA ÜRETİM SÜRECİNDEKİ İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ RİSKLERİNİN BULANIK HATA TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY RISKS IN A VALVE PRODUCTION PROCESS WITH FUZZY FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS

Gökmen TAK¹

Fatih ÖZTÜRK²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1624713>

*Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)*
fatih.ozturk@medeniyet.edu.tr

*Geliş Tarihi
(Received)*
21.01.2025

*Revizyon Tarihi
(Revised)*
25.03.2025

*Kabul Tarihi
(Accepted)*
07.04.2025

Öz

Ülkemizde yerleşik kurum ve kuruluşlarının faaliyetleri iş sağlığı ve güvenliği kapsamlı çıkartılan Kanun ve Yönetmelikler ile yeniden düzenlenmesiyle yeni bir yön bulmuştur. İş sağlığı ve güvenliği kapsamında temel amaç proaktif yaklaşımı benimseyerek meydana gelebilecek iş kazası ve meslek hastalıklarını ortaya çıkmadan önce kaynağında bertaraf etmektir. Bunu sağlamak üzere yapılacak ilk iş risk değerlendirme çalışmasıdır. Hata türü ve etkileri analizi, incelenen sistemdeki hatalı durumların meydana gelmeden önce tespit edilerek önceliklendirilmesini böylece iyileşme hareketinin nereden başlanacağı konusunda yön gösteren bir metottür. Ancak her metod gibi dezavantajları sonuçlar üzerine etki etmektedir. Bunun ortadan kaldırılabilmesi için bulanık mantık ilkeleri uygulanabilir. Bu çalışmada hata türü ve etkileri analizi yöntemi kullanılarak vana üretimi yapan bir işletmedeki üretim süreci değerlendirilmiş, ayrıca bulanık mantık ile çözümlenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bulanık mantık, FMEA, vana üretimi, risk değerlendirme.

Abstract

The activities of institutions and organizations established in our country have found a new direction with the reorganization of occupational health and safety by comprehensive Laws and Regulations. The main aim within the scope of occupational health and safety is to eliminate work accidents and occupational diseases that may occur at the source before they occur, by adopting a proactive approach. The first thing to do to achieve this is a risk assessment study. Failure modes and effects analysis is a method that identifies and prioritizes faulty situations in the system under review before they occur, thus guiding where the improvement action should begin. However, like every method, its disadvantages affect the results. To eliminate this, fuzzy logic principles can be applied. In this study, the production process in a company that produces valves was evaluated using the failure modes and effects analysis method, and the results were compared by analyzing it with fuzzy logic.

Keywords: Fuzzy logic, FMEA, valve production, risk assessment.

¹ İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Türkiye. gokmentak@gmail.com.

² İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Türkiye. fatih.ozturk@medeniyet.edu.tr

1. GİRİŞ

Son 10 yılda ülkemizde işletmelerin iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili faaliyetleri yeni çıkarılan kanun ve yönetmeliklerle yön değiştirmiştir (Çelik & Öztürk, 2017). Yakın tarihimize bakıldığında 1973 yılında işçi sağlığı ve iş güvenliği tüzüğü Bakanlar Kurulu tarafından 1475 sayılı iş kanunu yayımlanmış ardından 2003 yılında 4857 sayılı iş kanununun Beşinci bölümünde iş sağlığı ve güvenliği kapsamındaki yükümlülükler ilk defa bir kanun içerisinde yer almıştır. 20 Haziran 2012 yılında yayımlanan 6331 sayılı Kanun ile iş sağlığı ve güvenliği konusunda müstakil bir kanun yayımlanarak daha etkin ve detaylı şekilde ele alınmıştır. Kanun ile birlikte gelen yükümlülükler doğrultusunda yeni yönetmelik ve tebliğler yayımlanarak daha uygulanabilir hale gelmiştir.

Farklı iş kollarında farklı üretim yöntem ve teknikleri uygulanarak İmalat sanayinde fiziksel, kimyasal, biyolojik vb. pek çok faaliyeti kapsayan işlemler gerçekleştirilir (Tak & Öztürk, 2024). İş sağlığı ve güvenliği kapsamında temel amaç proaktif yaklaşımı benimseyerek meydana gelecek iş kazası ve meslek hastalıklarını ortaya çıkmadan önce kaynağında bertaraf etmektir. Bunu sağlamak üzere yapılacak ilk iş risk değerlendirme çalışmasıdır (Ayvaz ve ark., 2018). Bu çalışmadaki temel amaç risklerin değerlendirilerek belli ölçütlere göre skorlanması ve risk düzeyi yüksekten düşüğe doğru sıralanarak önceliklendirilmesidir. Risk değerlendirme çalışması için çeşitli yöntemler kullanılabilmekte ve bazı sektörlere özel olabilmektedir (Çelik & Öztürk, 2017). Öztürk ve ark. (2022) Tenerife uçak kazasını analiz ettikleri çalışmada hata türleri ve etkileri analizi, sistem teorisine dayalı nedensel analiz (CAST) ve hata ağacı analizi metodlarını karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda büyük kazaların analizinde CAST'ın daha kullanışlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Nitekim iş sağlığı ve güvenliğinde birbirine göre avantaj ve dezavantajlara sahip çeşitli risk analiz yöntemleri bulunmaktadır (Öztürk, 2014). İş sağlığı ve güvenliği alanında en sık kullanılan yöntemlerin başında matris yöntemi gelmektedir. L tipi matris yöntemindeki risk seviyesi riskin meydana gelme olasılığı ile gerçekleştiği andaki şiddetinin çarpımına eşit olarak ele alınmaktadır. Olasılık ve şiddet düzeylerinin belirlemek için 1 ile 5 puan arasında değer verilir. Belirlenen Olasılık ve Şiddet değerlerinin birbiriyle çarpımı risk puanını belirler. Risk puanları yüksekten düşüğe doğru sıralanır. Risk seviyesi kabul edilemez seviye olan 25 değerinden 8 olan kabul edilebilir risk seviyesine düşürülmesi hedeflenir. Ancak risk seviyesi olasılık ve şiddet değerlerinin çarpımına eşitlenerek analiz yapılmaktadır. Belirlenen Olasılık seviyesi 5 ile şiddet seviyesi 4 olarak belirlenmesiyle tam tersi puanlama yapıldığında risk seviyesi 20 puana eşit olmakta ve aynı şekilde yorumlanmaktadır. Bu durumda puanlar aynı iken risk etkiler oldukça farklıdır. Bu yöntemin kullanım sıklığının fazla olmasının nedenleri olarak basit olması, kolay anlaşılması ve hızlı değerlendirmeye imkan vermesi olduğu söylenebilir. Ancak bu yöntemin fazlaca yüzeysel kalması ve detaylı analize imkan vermemesi nedeniyle daha kapsamlı risk değerlendirme yöntemlerine doğru ilgi artmaktadır. Yıllar içindeki gelişim ile birlikte sektörel risk değerlendirme yöntem ve metodları da gelişmektedir.

Hata ağacı analizi metodu, 1962'de ABD Hava Kuvvetlerine ait füze fırlatma kontrol sisteminin güvenlik analizi için Bell Laboratuvarları tarafından geliştirilmiştir. Yöntem, 1966 yılından itibaren ticari bir şirket olan Boeing tarafından ticari uçakların

geliştirilmesi için kullanılmaya başlanmıştır. İlerleyen yıllarda nükleer enerji sanayisinde, kimya, otomotiv, demiryolu taşımacılığı, robotik gibi alanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Hemen hemen her sektörde kaza araştırmalarında kullanılmakta olan hata ağacı analizi, her tehlike durumunun varlığında uygulanmamaktadır, sadece kritik olan güvenlik tehlikeleri için uygulanmaktadır (Ak & Zorluer, 2022).

Ön tehlike ağacı analizi yöntemi, sistemin veya prosesin potansiyel tehlikeli parçalarını tespit ederek değer biçmek ve tespit edilen her bir potansiyel tehlike için az ya da çok kaza ihtimallerini belirlemektir. Bu metodolojiden çıkan sonuç, hangi tür tehlikelerin sıklıkla ortaya çıktığını ve hangi analiz metotlarının uygulanmasının gerektiğini belirler. Tanımlanan tehlikeler, sıklık/sonuç diyagramının yardımı ile sıraya konur ve önlemler öncelik sırasına göre alınır. Ön tehlike analizi analistler tarafından erken tasarım aşamasında uygulanır, ancak tek başına yeterli bir analiz metodu değildir, diğer metodolojilere başlangıç verisi olması aşamasında yararlıdır. Başka yöntemlerle desteklenmesi yöntemi daha faydalı hale getirebilir (Akpınar & Çakmakaya, 2014).

İş Güvenlik Analizi, yapılacak işe dair görevler üzerine yoğunlaşan, kişi veya gruplar ile gerçekleştirilen bir yöntemdir. Bu yöntem işletmede yada bir tesisteki iş ve görev tanımları iyi bir şekilde tanımlanması halinde uygulanmaya uygundur. Bu analiz yönteminde incelenen işe dair görevden kaynaklanan tehlikeleri doğrudan irdeler. Bu yöntemde tehlikelerin teker teker tanımlanmasına müteakip belirlenen şiddetin değerine, meydana gelme olasılığına ve etkilenebilecek kişi sayısına göre değerlendirilir. Risk sınıflandırılması olasılık ve risk durumuna göre belirlenir ve en büyük değerden başlanmak suretiyle alınması gereken eylemler ve tedbirler tanımlanarak önleyici faaliyetler gerçekleştirilir (Akpınar & Çakmakaya, 2014). Ancak görevler ve yapılacak işlerin iyi tanımlanmadığı işyerlerinde uygulanması mümkün değildir. Etkin uygulanmasını sağlanması amacıyla gerçekleştirilen her bir işe ait görev adımları belirlenmeli ve bu adımlara göre değerlendirme yapılmalıdır.

HAZOP ilk olarak kimyasal proses tesislerinin güvenliğini değerlendirmek için 1970'li yılların başında İngiltere'de Kimyasal Endüstri Enstitüsü (Institute of Chemical Industry, ICI) tarafından geliştirilerek bir risk analizi tekniği haline gelmiştir. İngiltere'de ise 1977 yılında Kimyasal Endüstrileri Birliği (Chemical Industries Association, CIA) tarafından HAZOP rehberi yayımlanarak HAZOP analizi yıllar içerisinde geliştirilmiş ve iyileştirilmiştir. Daha sonraları bu metot teknolojik kazalar ile karşılaşan veya acil durum planı geliştirmek iste- yen firmalar tarafından kullanılır hale gelmiştir. HAZOP çevresel risk değerlendirmelerinde ve basit teknolojilerin yer aldığı şirketlerde de kullanılabilir. HAZOP analizi farklı tecrübeleri olan uzmanların bir araya gelip beyin fırtınası yapıp sistematik olarak dizayndan sapmaları, bu sapmaların sonuçlarını ve alınması gereken önlemleri belirlemeleri ilkesine dayanmaktadır (Kabakulak, 2019). Ancak bu analizi yapacak kişilerin tecrübeli olmaları gerekmekte olup analizin başarısı için oldukça önemlidir.

Diğer yöntemlerden biri olan hata türü ve etkileri analizi incelenen sistemin hatalı durumlarının meydana gelmeden önce tespit edilmesi ve Risk Öncelik Sayısının (RÖS) belirlenerek iyileşme hareketinin nereden başlanacağını konusunda yön gösteren bir metottur. Bu metot kullanılarak sistemin güvenilirlik boyutunun artırılması sağlanır. Risk öncelik sayısının belirlenmesinde ilgili alanda uzmanlığa sahip kişilerin değerlendirmeleri ele alınmakta olduğundan dolayı belirlenen sonuçlar uzmanın

seviyesine göre değişebilmektedir. Bundan dolayı FMEA ekip üyelerinin farklı tecrübe ve bilgi düzeyindeki değişkenli de FMEA'nın sonuçlarının etkileyen faktörlerdendir. Geleneksel FMEA yönteminde uzmanların ortak risk değerlendirmeleri ele alınmakta ancak her bir risk etkeni için ayrı ayrı değerlendirme yapılmamaktadır. RÖS Olasılık (O), Şiddet (Ş) ve Denetlenebilirlik (D) değerlerinin çarpılmasıyla oluşturulur. Ancak RÖS değerlerinin aynı değeri farklı risk temsilleri anlamına gelebilir. Örneğin (O), (Ş), (D) derecelendirmeleri için 6, 2, 1 ve 2, 3, 2 değerlerine sahip iki farklı arıza modunu düşünün. Her ikisi de aynı RÖS değeri olan 12'ye ve dolayısıyla eylemler için aynı önceliğe sahip olacaktır. Aslında risk temsilleri pratikte farklı olabilir (Yeh & Hsieh, 2007).

Diğer risk analiz yöntemleri ile geleneksel FMEA yöntemindeki bahsedilen dezavantajlar değerlendiricilerin risk faktörlerini kesin olarak belirleyemeyeceği, uzmanlık derecelerinin farklı olması ve yaptıkları değerlendirmelere dair skorlamanın değişiklik göstermesidir. İşte bu farklılığın giderilmesi için bulanık hata türü ve etkileri analizi bu çalışmada benimsenmiştir.

Örneğin, (Özfirat, 2014) yaptığı çalışmada bulanık önceliklendirme yöntemi ile hata türü ve etkileri analizi harmanlayan yeni bir risk analiz yöntemi önermiştir. Turan ve Gönen (2019) transformatör imalatı yapan bir işletmenin transformatör tasarım ve süreçlerinde Bulanık FMEA çalışması gerçekleştirerek bir uygulama yazılımı geliştirmiş ve firma üretim süreçlerine bir prosedür ile kalite standardı olarak entegre edilmesini sağlamıştır. (Halfarová, ve ark., 2013) bulanık FMEA sürecini boru ve membran üretimi yapan bir işletmede uygulamış ve sonuçlarını karşılaştırmıştır. Yeh & Hsieh (2007) geleneksel metottan ziyade bulanık hata türü ve etkileri analizi uygulamasını önermiş ve uygulamanın etkinliğini göstermek için bir atıksu arıtma tesisinde uygulamışlardır. (Ivanova, ve ark., 2021) yaptıkları çalışmada elektronik cihazların üretim sürecinde bir robotun risk operasyonlarının analizi için FMEA ve bulanık mantık uygulaması yapmışlar ve iş sürecinde başarısızlıklara veya hatalara neden olabilecek parametrelerin herhangi bir zamanda optimize edilmesine ve iyileştirilmesine olanak sağlayacağını vurgulamışlardır. Mohammed ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada petrol ve gaz endüstrisindeki farklı hata türü risklerini bulmak için bulanık mantık ve hata türleri ve etkileri analizine dayanan hibrit bir risk değerlendirme yaklaşımı önermiştir. Bulgular, önerilen risk değerlendirme yaklaşımının belirlenen bozulmuş beton temellerin risk faktörlerini önceliklendirmede etkili olduğunu göstermiştir. Testik ve Ünlü (2023) yaptıkları çalışmada test ve kalibrasyon laboratuvarlarında risk oluşturabilecek ve iyileştirmeye ihtiyaç duyabilecek alanların belirlenmesinde geleneksel FMEA ve bulanık FMEA'nın karşılaştırmıştır. Çalışmaları sonucunda bu iki analiz arasında 0,97'lik yüksek bir korelasyon olduğunu ve Bulanık Risk Öncelik Numarası hesaplamasına dayalı öncelik sırasının, Risk Öncelik Numarası dizisi ile örtüşüğünü göstermiştir.

Ayrıca modern yöntemlerden Makine Öğrenimi (ML) ve Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) tabanlı risk değerlendirme çalışmaları da yapılmaktadır. Makine öğrenimi tabanlı risk değerlendirme büyük veri setlerinden örüntüler çıkarmak suretiyle risk tahminleri yapabilmekte, karmaşık sistemlerdeki riskleri daha doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. FMEA ve bulanık FMEA gibi geleneksel yöntemler daha çok insan uzmanlığına dayalı öznel değerlendirmeler içerebilmektedir. Makine öğrenimi ise veriye dayalı objektif sonuçlar sunabilmektedir. Makine öğreniminin dezavantajı ise

büyük miktarda veriye ve uzmanlığa ihtiyaç duyması ve sonuçların yorumlanmasını zorlaştırabilmektedir. Çok kriterli karar verme yöntemleri (örneğin, AHP, TOPSIS, VIKOR vb.) birden fazla kriteri dikkate alarak karmaşık problemleri çözmekte kullanılmaktadır. FMEA yöntemine karşın çok kriterli karar verme yöntemleri risk faktörlerini ağırlıklandırma ve sıralama konusunda daha esnektir. Ancak bu yöntemler öznel ağırlıklandırmaya dayanabilir ve bulanık mantık entegre edilmediği durumlarda belirsizlik yönetmekte zorlanabilmektedir.

Güncel çalışmalarda FMEA, bulanık mantık, Makine Öğrenimi (ML) ve Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) yöntemleri, farklı endüstrilerde risk değerlendirmesi ve karar verme süreçlerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, otomotiv endüstrisinde üretim süreçlerindeki riskleri önceliklendirmek için bulanık FMEA yaklaşımı kullanılmış (Gul et al., 2021), sağlık sistemlerinde ise bulanık FMEA ve bulanık AHP entegre edilerek daha kapsamlı bir risk değerlendirmesi yapılmıştır (Liu et al., 2020). Makine öğrenimi, tedarik zinciri yönetiminde (Zhang et al., 2022) ve üretim ekipmanlarında arıza tahmini (Wang et al., 2021) gibi alanlarda büyük veri analizi ve yüksek doğrulukta tahminler sunmuştur. MCDM yöntemleri, rüzgar çiftliklerindeki riskleri değerlendirmek için AHP ve TOPSIS ile (Kahraman et al., 2020), inşaat projelerinde ise bulanık AHP ve bulanık TOPSIS ile (Karsak et al., 2019) kullanılmıştır. Ayrıca, hibrit yaklaşımlar (FMEA + ML + MCDM) akıllı üretim (Li et al., 2022) ve sağlık hizmetleri (Smith et al., 2021) gibi alanlarda hem önelliği azaltmış hem de veriye dayalı tahminler sunmuştur. Bu çalışmalar, geleneksel ve modern yöntemlerin avantajlarını birleştirerek risk değerlendirme süreçlerini daha etkili hale getirmektedir.

FMEA (Hata Türleri ve Etkileri Analizi) ve bulanık mantık gibi geleneksel risk değerlendirme yöntemleri ile Makine Öğrenimi (ML) ve Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) gibi modern yöntemler arasında karşılaştırmalı analiz Tablo 1’de verilmiştir.

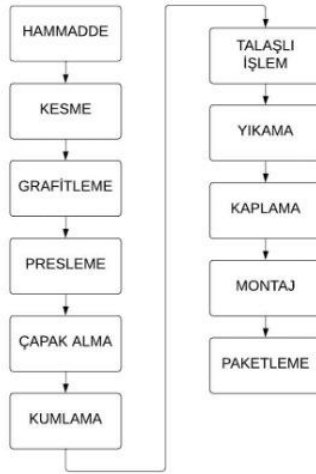
Tablo 1. FMEA, Bulanık Mantık ve Modern Risk Değerlendirme Yaklaşımlarının Karşılaştırması

Özellik	FMEA	Bulanık Mantık	Makine Öğrenimi (ML)	MCDM Yöntemleri
Belirsizlik Yönetimi	Zayıf	Güçlü	Orta	Orta (Bulanık MCDM ile güçlü)
Büyük Veri Uyumu	Zayıf	Orta	Güçlü	Orta
Özellik	Yüksek	Orta	Düşük	Orta
Dinamik Sistemler	Zayıf	Orta	Güçlü	Orta
Uygulama Kolaylığı	Kolay	Orta	Zor	Orta
Maliyet	Düşük	Orta	Yüksek	Orta
Yorumlanabilirlik	Yüksek	Orta	Düşük (Kara Kutu)	Yüksek
Entegrasyon Potansiyeli	Sınırlı	Yüksek	Yüksek	Yüksek

2. METOT

2.1. Vana Üretim Süreci

Vana üretimi Şekil 1’de görüleceği üzere hammadde olarak başlar. Hammaddeler üretilecek vana boyutuna uygun çapta seçilerek üretim sürecine alınır. İlk olarak boy kesme tezgahlarında kesilir. Kesilen parçalar grafitleme işlemine tabi tutulur. Bu işlemin amacı malzemenin işlenmesini kolaylaştırmaktır. Grafitlenen hammaddeler otomatik pres tezgahlarına alınarak preslenir. Preslenen ürünler bekleme alanına soğutulduktan sonra fazla çapaklarının kesilmesi amacıyla çapak kesme işlemine tabi tutulur. Çapakları kesilen vanalar kumlama işlemine tabi tutulduktan sonra talaşlı imalat tezgahlarında kanal, delik, dış vb. açmak üzere işlenir. Böylece vananın ana hatları tamamlanmıştır. Sonrasında vanalar yüzey temizleme işleminin yapıldığı yıkama bölümüne getirilerek temizlenir. Temizlenen vanalar krom kaplama ünitesine alınarak yüzeyleri krom ile kaplanır. Kaplanan vanalar montaj bölümüne sevk edilerek diğer parçalar ile birleştirilir. Montaj işlemini test işlemi takip eder. Testi geçen ürünler paketleme ünitesine getirilerek paketleme işlemi gerçekleştirilir. Paketlenen vanalar kolilenerek sevke hazır hale getirilir.

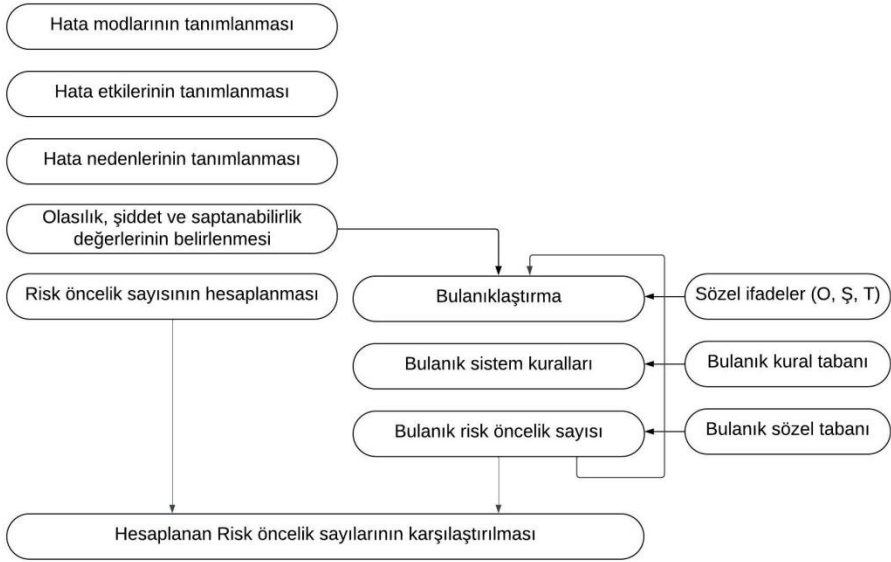


Şekil 1. Vana Üretim Süreci

2.2. Çalışmanın Tasarımı

Bu çalışmada hata türleri ve etkileri analizi ile bulanık mantık yaklaşımıyla ele alınarak bir vana üretim süreci analiz edilmiştir. Şekil 2’de görüldüğü üzere öncelikle bir geleneksel yöntemle göre hata türleri tanımlanmış daha sonra hata etkileri ve nedenleri tanımlanmıştır. Hatanın meydana gelmesi ile ilgili olasılık, meydana gelirse oluşturacağı şiddet ve hatanın denetlenebilirliğiyle ilgili değerler önem derecesine göre 1 – 10 a kadar belirlenmiştir. Belirlenen değerler birbiriyle çarpılarak risk öncelik sayısı (RÖS) hesaplanmıştır. Ardından bulanık mantık bulanık küme üyelik fonksiyonlarından üçgensel üyelik fonksiyonları kullanılarak MATLAB programının

“Fuzzylogictoolbox”ı aracılığıyla öncelikle sözel ifadeler belirlenerek üyelik fonksiyonları ve kural tabanları oluşturulmuş, bulanık mantık RÖS ifadeleri belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen sözel RÖS ifadeleri bulanık olmayan değerlere dönüştürülmüştür. Geleneksel ve bulanık FMEA sonuçları karşılaştırılarak değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 2. Çalışmanın Tasarımı

2.3. Hata Türleri ve Etkileri Analizi

FMEA çalışmalarındaki temel amaç, tasarım, sistem, süreç veya servisten ortaya çıkabilecek hataların belirlenmesi, risk öncelik sayısı yüksek olan hataların önüne geçilmesi ve kaynaklardan daha etkin şekilde faydalanılmasını sağlamaktır (Turan & Gönen, 2019).

“Hata Türü, Etkileri ve Riskinin Analizi Üzerine Prosedürler” olarak adlandırılan Askeri Prosedür MIL-P-1629, 9 Kasım 1949 tarihinde başlatılmıştır. Sistem ve donatım hatalarının etkilerinin belirlenmesi için güvenilir bir teknik olarak kullanılmıştır. 1969da NASA tarafından, 1970-1975 arasında ABD Uçak Sanayisinde, 1975 yılında Japon NEC firmasında, ilk endüstriyel uygulaması yapılmıştır. Ardından 1980 yılında FORD tarafından otomotiv sanayisinde uygulaması başlatılmış daha sonra ise bu yöntem Fransız Renault ve Citroen otomotiv şirketlerince AMDEC olarak isimlendirilmiştir. 1985 yılında IEC tarafından IEC 60812 standardı yayımlanmış ve 2016 yılında son halini almıştır (Taş & Koç, 2013).

FMEA çalışması beş aşamada uygulanmıştır: (1) sistem alt sistemlere ayrılmış, (2) hata türleri tanımlanmış, (3) hata türlerinin etkileri ve nedenleri belirlenmiş, (4) Olasılık (O), Şiddet (Ş) ve Denetlenebilirlik (D) puanları 1den 10a kadar önem derecesine göre

belirlenmiş ve (5) risk öncelik sayısı (RÖS); O, Ş ve D puanları çarpılarak hesaplanmıştır.

2.4. Bulanık Mantık

Aristo tarafından ileri sürülen bulanık mantık 0–1, Evet-Hayır, Siyah-Beyaz gibi ikili mantık sistemine karşı geliştirilmiştir. Hayatın olağan akışında sadece Evet / Hayır ya da Siyah-Beyaz olmadığını, bunların dışında daha farklı seçeneklerin olabileceği düşüncesiyle hareket eden Azerbaycanlı bilim insanı Zadeh tarafından ilk defa 1965 yılında bulanık mantık teorisi ortaya atılmıştır. Zadeh, olgulara 0–1 arasında üyelik fonksiyonları tanımlayarak olguların hangi oranlarda gerçekleşeceğini belirlemeye çalışan çoklu bir mantık sistemi önermiştir (Görgülü and Şahinler, 2016).

Bu çalışmada bulanık mantık kurgusu aşağıda sıralanan şekilde gerçekleştirilmiştir;

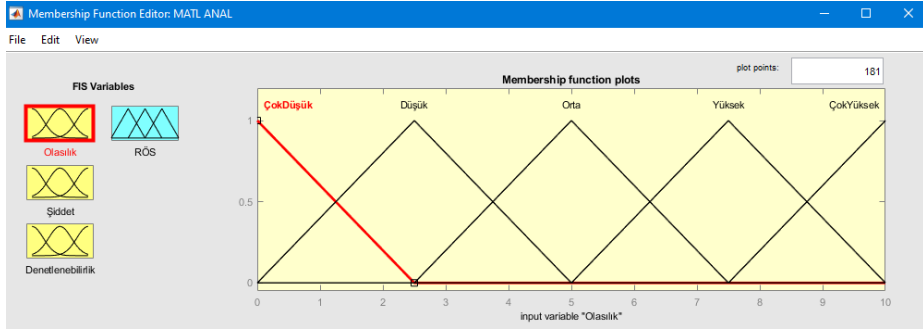
1. Bu çalışmada üçgensel üyelik fonksiyonları basit ve kolay olması, esnekliği ve uyarlanabilirliği, belirsizlikleri iyi derecede yönetebilmesi, uzman görüşüne uygun olması ile görsel olarak anlaşılabilir ve yorumlanmasının kolay olması nedeniyle tercih edilmiştir. Sözel ifadelerle karşılık olasılık, şiddet ve denetlenebilirlik skorları Tablo 2’de verilmiş olup buna göre oluşturulan üyelik fonksiyonları Şekil 3’te gösterilmiştir.

Giriş Değişkenleri: Olasılık (O): 1 – 10 aralığında, Şiddet (Ş): 1 – 10 aralığında, Denetlenebilirlik (D): 1 – 10 aralığında belirlenmiştir.

Çıkış Değişkeni: Risk Öncelik Sayısı (RÖS): 1 – 1000 aralığında belirlenmiştir.

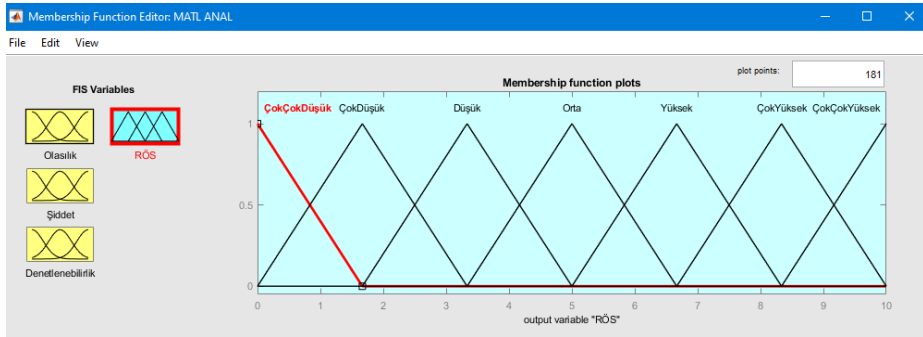
Tablo 2. Sözel İfadelere Karşılık Olasılık, Şiddet ve Denetlenebilirlik Skorları

Sözel İfadeler	Olasılık (O)	Şiddet (Ş)	Denetlenebilirlik (D)
Çok Yüksek	10	10	10
Yüksek	8 - 9	8 - 9	8 - 9
Orta	5 - 7	5 - 7	5 - 7
Düşük	2 - 4	2 - 4	2 - 4
Çok Düşük	1	1	1



Şekil 1. Olasılık, Şiddet ve Denetlenebilirlik Girdi Üyelik Fonksiyonları

2. Hesaplanan sözel ifadelerle karşılık gelen RÖS değerlerini sınıflandırmak için 7 adet bulanık küme seçilmiştir. Bu kümeler; Çok Çok Düşük, Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek, Çok Yüksek, Çok Çok Yüksek şeklinde belirlenmiştir. Bu kümeler, üçgensel üyelik fonksiyonları kullanılarak modellenmiştir. Bu yaklaşımın, belirsizlikleri yöneterek daha gerçekçi ve kapsamlı sonuçlar üreteceği düşünülmüştür. MATLAB Fuzzy Logic Toolbox, bu kümelerin tanımlanması ve görselleştirilmesi için kullanılmıştır. RÖS çıktı üyelik fonksiyonları Şekil 4'te gösterildiği gibidir.



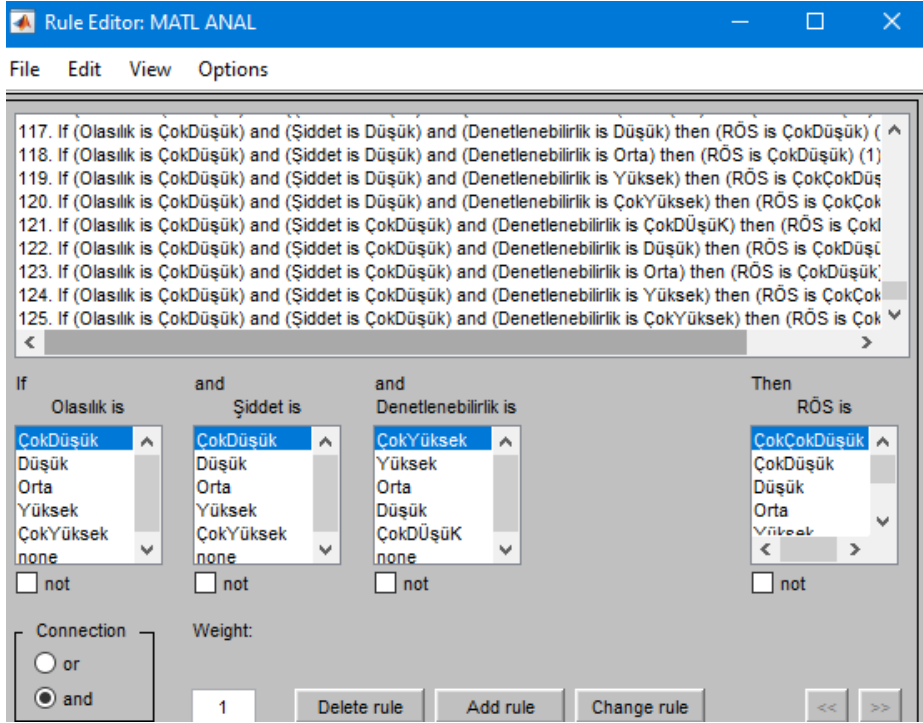
Şekil 2. RÖS Çıktı Üyelik Fonksiyonları

3. Üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasından sonra kural tabanı oluşturma adımına geçilmiş ve uzman deneyimi ve tecrübesine göre Şekil 5'teki görüldüğü üzere toplam 125 kural oluşturulmuştur. Örneğin;

Kural 1: EĞER Olasılık Çok Yüksek ve Şiddet Çok Yüksek ve Denetlenebilirlik Çok Düşük ise RÖS Çok Çok Yüksek.

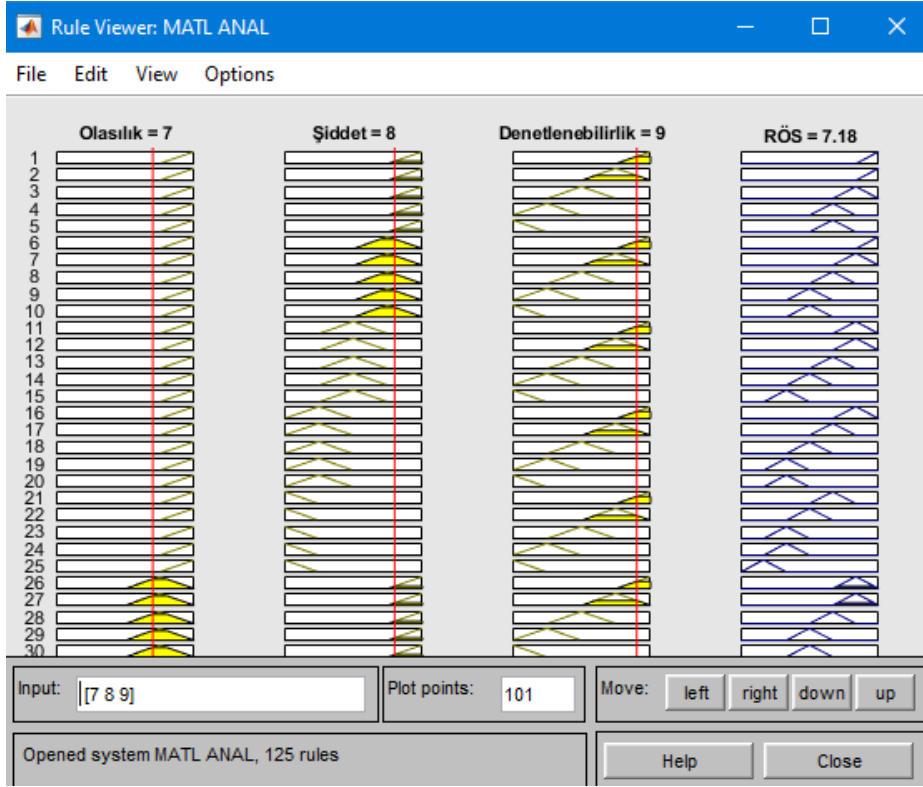
Kural 2: EĞER Olasılık Yüksek ve Şiddet Yüksek ve Denetlenebilirlik Düşük ise RÖS Çok Yüksek.

Kural 3: EĞER Olasılık Orta ve Şiddet Orta ve Denetlenebilirlik Orta ise RÖS Orta.



Şekil 5. Kural Tabanı

4. Şekil 6’da görüldüğü üzere FMEA analizinde belirlenen olasılık, şiddet ve denetlenebilirlik skorları teker teker girilerek risk öncelik sayıları belirlenmiştir.



Şekil 6. Örnek RÖS Sayısı

5. Hesaplanan RÖS sayıları karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Vana üretim süreci ele alınarak yapılan risk değerlendirmesinde toplam 44 adet hata modu tanımlanmıştır. Bu hata modlarının risk öncelik sayıları, bulanık mantık ile ele alındıktan sonraki durumu karşılaştırılmış ve 14 hata modunun öncelik sıralamasının değiştiği belirlenmiştir. Bunların 5 tanesi daha düşük önceliğe gerilerken 9 tanesi daha yüksek önceliğe yükselmiştir.

Örnek: Kumlama Makinesi (1. Satır)

Olasılık (O): 7

Şiddet (Ş): 9

Denetlenebilirlik (D): 7

Geleneksel RÖS: $7 \times 9 \times 7 = 441$

Bulanık RÖS: 7,18

Geleneksel FMEA, kesin sayısal değerlere dayanır ve bu riski yüksek öncelikli olarak değerlendirir. Bulanık FMEA, belirsizlikleri ve uzman görüşünü daha iyi yansıtarak

daha düşük bir RÖS değeri (7,18) üretir. Bu, riskin gerçek etkisinin daha düşük olduğunu göstermektedir.

Tablo 3’de bulanık FMEA uygulaması sonrası risk öncelik sıralamasının değişimi görülmektedir.

Tablo 3. Bulanık FMEA Uygulaması Sonrası Risk Öncelik Sıralaması Değişimi

SN	ALT SİSTEM	HATA MODU	HATA ETKİLERİ	HATA NEDENLERİ	O	Ş	D	G RÖS	G RÖS SIRA	F RÖS	F RÖS SIRA	RÖS SIRA DEĞİŞİMİ
1	Kumlama	Kumlama makinesinin çalışması	Ağır yaralanma	Makine çalışırken kabine girilmesi	7	9	7	441	1	7,18	1	0
2	Hammadd e	Hammadd e çubukların forklift ile sevki	Forkliftin kazaya neden olması	Forklifti belgeli ve yetkili kişiler kullanılmaması	8	8	6	384	2	7,11	2	0
3	Hammadd e	Sevk edilen balyanın vinç ile çapına uygun yerlere yüklenmesi	Vincin kazaya neden olması	Vinci belgeli ve yetkili kişiler kullanmaması	7	8	6	336	3	6,66	3	0
4	Presleme	Preslenen sıcak malzemenin soğutmak için diledirilmesi	Sıcak malzemeyle temas sonucu yaralanma	Tehlikeli sıcaklık uyarı işareti olmaması	9	8	4	288	4	6,39	4	0
5	Kaplama	Malzemelerin kaplanması	Solunum sistemi hastalıkları	Banyodan çıkan gazların teneffüsü	6	8	6	288	5	6,16	6	-1
6	Montaj	Montajlanan ürünlerin toplandığı sepetin taşınması	Ayak yaralanması	Ürünün düşmesi	8	7	5	280	6	6,26	5	1
7	Montaj	Malzemelerin elle beslenmesi	El – parmak sıkışması	Işık perdesinin çalışmaması / bypass edilmesi	6	7	6	252	7	5,7	7	0
8	Montaj	Malzemelerin elle beslenmesi	El – parmak sıkışması	Çift el butonu olmaması / bypass edilmesi	6	7	6	252	8	5,7	8	0
9	Paketleme	Kolileme	Sıcak malzemeyle temas	Ambalajlanan ürünlerin toplanması	6	6	7	252	9	5,7	9	0

SN	ALT SİSTEM	HATA MODU	HATA ETKİLERİ	HATA NEDEMLERİ	O	Ş	D	G RÖS	G RÖS SIRA	F RÖS	F RÖS SIRA	RÖS SIRA DEĞİŞİMİ
10	Presleme	Malzemenin makinede preslenmesi	Çalışma sırasında kabine girilmesi	Emniyet sensörleri arızası – by pass edilmesi	6	10	4	240	10	5	10	0
11	Kumlama	Kumlama makinesinin çalışması	Makine çalışırken kabine girilmesi	Emniyet tellerinin arızası – işlevsiz bırakılması	5	8	6	240	11	5	11	0
12	Paketleme	Kolileme	El yanıklar oluşması	Sıcak malzemeyle temas	5	8	6	240	12	5	12	0
13	Kesme	İşlenecek hammaddenin vinç ile kesme makinesine yüklenmesi	Hamaddenin çalışanın ayağını ezmesi	Bağın patlaması	6	10	4	240	13	5	13	0
14	Kesme	İşlenecek hammaddenin vinç ile kesme makinesine yüklenmesi	Sapanın kopması	Taşıma işleminden önce sapan kontrol edilmemekteydi	5	7	5	175	14	5	14	0
15	Kesme	İşlenecek hammaddenin vinç ile kesme makinesine yüklenmesi	Bağın patlaması	Taşıma işleminden önce bağ kontrol edilmemekteydi	5	7	5	175	15	5	15	0
16	Kaplama	Banyoların kurulması	Göz ve cilt yanığı	Kimyasalın sıçraması	5	6	5	150	16	5	16	0
17	Presleme	Preslenen malzemenin operatör tarafından ölçüsel ve görsel kontrol yapması	İşitme kaybı	Kulaklık kullanılmaması	6	8	3	144	17	5	17	0
18	Montaj	Malzemelerin elle beslenmesi	Bel ve eklem ağrıları	Aynı pozisyonda çalışma ve statik duruş	6	6	4	144	18	5	18	0
19	Kumlama	Kumlama makinesinin çalışması	Pnömonyoz hastalığı	FFP2 türü toz maskesi kullanılmaması	6	8	3	144	19	5	19	0
20	Paketleme	Kolileme	Bel ve eklem ağrıları	Kolinin elle palete dizilmesi	6	6	4	144	20	5	20	0

SN	ALT SİSTEM	HATA MODU	HATA ETKİLERİ	HATA NEDEMLERİ	O	Ş	D	G RÖS	G RÖS SIRA	F RÖS	F RÖS SIRA	RÖS SIRA DEĞİŞİMİ
21	Paketleme	Kolileme	Tekrarlı hareketlerin çok sık yapılması	Ambalajlanan ürünlerin kutulanması	6	6	4	144	21	5	21	0
22	Kaplama	Malzemelerin kaplanması	Kayma, düşme	Islak zemin	6	7	3	126	22	5	22	0
23	Grafitleme	Grafit makinesinin çalıştırılması (yükleme + karıştırma + boşaltma)	Kas iskelet sistemi rahatsızlıkları	Sepetin aşırı yüklenmesi	6	7	3	126	23	5	23	0
24	Yıkama	Tezgah temizliği ve imalata hazırlık	Göze çapak – yağ kaçması	Basınçlı hava kullanılması	6	7	3	126	24	5	24	0
25	Talaşlı İşlem	Malzemenin elle beslenmesi ve boşaltılması	Göze çapak kaçması	Çapak fırlaması	6	7	3	126	25	5	25	0
26	Kumlama	Kumlanan ürünlerin boşaltılması	İşitme kaybı	Kulaklık kullanılmaması	6	7	3	126	26	5	26	0
27	Kaplama	Banyoların kurulması	Göz yanığı	İş Gözlüğü kullanılmaması	6	7	3	126	27	5	27	0
28	Kumlama	Ürünlerin kumlama makinesi yükleyicisine konulması	İşitme kaybı	Kulaklık kullanılmaması	7	6	3	126	28	5	28	0
29	Kumlama	Tezgah temizliği ve imalata hazırlık	Gözün yaralanması	İş Gözlüğü kullanılmaması	9	7	2	126	29	5	29	0
30	Kumlama	Kumlama makinesinin çalışması	Ortama toz yayılımı	Filtrelerin düzenli temizlenmemesi	5	6	4	120	30	4,3	35	-5
31	Kaplama	Banyoların kurulması	Kas ve iskelet sisteminde ağrı ve rahatsızlık	Kimyasal madde bidonlarının elle kaldırılması	6	5	4	120	31	4,3	36	-5
32	Çapak Alma	Kazan dolduktan sonra transpalet ile kumlama makinesine	Kas iskelet sistemi rahatsızlıkları	Transpaletin itilip çekilmesi	6	6	3	108	32	4,49	34	-2

SN	ALT SİSTEM	HATA MODU	HATA ETKİLERİ	HATA NEDENLERİ	O	Ş	D	G RÖS	G RÖS SIRA	F RÖS	F RÖS SIRA	RÖS SIRA DEĞİŞİMİ
		sevk edilmesi										
33	Kaplama	Malzemelerin kaplanması	Cilt yanığı	İş kıyafeti giyilmemesi	5	7	3	105	33	4,6	33	0
34	Talaşlı İşlem	Malzemenin elle beslenmesi ve boşaltılması	Çapak fırlaması	Siperlik bulunmaması / bypass edilmesi	5	7	3	105	34	4,6	31	3
35	Presleme	Tezgah temizliği ve imalat hazırlık	Göze çapak kaçması	Basınçlı hava kullanılması	5	7	3	105	35	4,6	32	3
36	Presleme	Yükleyicinin çalıştırılarak preslenecek malzemenin fırın içerisine boşaltılması	Düşen cisme bağlı yaralanma	Yükleme sırasında malzeme düşmesi	5	7	3	105	36	4,6	30	6
37	Presleme	Yükleyicinin çalıştırılarak preslenecek malzemenin fırın içerisine boşaltılması	Yükleme sırasında malzeme düşmesi	Yükleyicinin yan kısımlarının açık olması	4	6	4	96	37	3,54	42	-5
38	Presleme	Preslenen malzemenin operatör tarafından ölçüsel ve görsel kontrol yapması	Solunum sistemi hastalıkları	FFP2 türtü maske kullanılmaması	5	6	3	90	38	4,03	37	1
39	Paketleme	Kolileme	Kas ve iskelet sisteminde ağrı ve rahatsızlık	Tekrarlı hareketleri sık yapılması	5	6	3	90	39	4,03	38	1
40	Hammade	Hammade çubukların forklift ile sevk	Forkliftin zeminde kayması	Zeminin kirli olması	5	6	3	90	40	4,03	39	1
41	Hammade	Sevk edilen balyanın vinç ile çapına uygun	Vinç çalışma alanında bulunan kişilere çarpması	Vinç çalışma alanında uyarı – ikaz işareti bulunmaması	3	9	3	81	41	3,55	40	1

SN	ALT SİSTEM	HATA MODU	HATA ETKİLERİ	HATA NEDENLERİ	O	Ş	D	G RÖS	G RÖS SIRA	F RÖS	F RÖS SIRA	RÖS SIRA DEĞİŞİMİ
		yerlere yüklenmesi										
42	Hammadd e	Hammadde çubukların forklift ile sevki	Forkliftin alanda bulunan kişilere çarpması	Forklift çalışma alanında uyarı – ikaz işareti bulunmaması	3	9	3	81	42	3,55	41	1
43	Hammadd e	Sevk edilen balyanın vinç ile çapına uygun yerlere yüklenmesi	Vinç ya da taşınan malzemenin çalışanın başına çarpması	Baret takılmaması	4	9	2	72	43	3,34	43	0
44	Grafitleme	Grafitlenecek malzemeye grafitleme jeli dökülmesi	Ele temas sonucu tahriş	Eldiven giyilmektedir	4	6	3	72	44	3,34	44	0

Tanımlanan hata modlarının geleneksel hata türü ve etkileri analizi sonuçları ile bulanık hata türleri ve etkileri analizi sonuçları karşılaştırıldığında öncelik sıralamasının %31,82 oranında değiştiği; genel olarak %11,36'sının daha sonraki öncelik sırasına gerilerken %20,45'inin öncelik sıralamasının yükseldiği ortaya koyulmuştur. 4. ve 5. sıradaki FMEA RÖS sayısının aynı olmasına karşın Bulanık RÖS sayısının farklı olduğu ve sıralamada birbiriyle yer değiştirdiği tespit edilmiştir. Buradan hareketle O,Ş ve D değerlerinin çarpanlarının farklı ancak RÖS değeri aynı olduğu durumda Bulanık FMEA değerlendirmesinde sıralamanın değişebileceği tespit edilmiştir. Ancak diğer sonuçlar incelendiğinde genel bir ifadeyle bunun gerçekleşeceğini söylemek mümkün değildir. Bunun yanında 37. ve 38 satırdaki hata modunun FMEA RÖS sayısının sırasıyla 96 ve 90 olmasına karşın Bulanık RÖS sayıları sırasıyla 3,54 ve 4,03 olarak belirlenmiş olup FMEA RÖS sayısı yüksek olan hata modunun Bulanık FMEA'ya göre daha sonraki RÖS sıralamasına gerilediği görülmektedir. Benzer şekilde 6. sıradaki daha düşük FMEA RÖS sayısına karşılık belirlenen Bulanık RÖS sayısının 5. Sıradaki RÖS sayısından daha yüksek olduğu ve sıralamada 1 satır yukarıya çıktığı belirlenmiştir.

Tablodaki örneklerde görüldüğü gibi, geleneksel FMEA ve Bulanık FMEA sonuçları arasında sıralama farklılıkları olmaktadır. Bu farklılıkların temel nedenleri şunlardır:

a. Belirsizliklerin Yönetimi:

Geleneksel FMEA, belirsizlikleri tam olarak yansıtamamaktadır. Örneğin, "orta şiddette bir risk" gibi niteliksel ifadeler, kesin sayısal değerlere dönüştürülürken gerçekliğini kaybedebilir. Bulanık FMEA, belirsizlikleri üyelik fonksiyonları ve

kural tabanı ile daha iyi yönetmektedir. Bu, risklerin daha gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

b. Özneliğin Azaltılması:

Geleneksel FMEA, öznel değerlendirmelere dayanmaktadır. Farklı uzmanlar, aynı risk için farklı değerler verebilmektedir. Bulanık FMEA, özneliği azaltmaktadır. Örneğin, birden fazla uzmanın değerlendirmeleri bulanık kümelerle birleştirilerek daha tutarlı sonuçlar elde edilir.

c. Aynı RÖS Değerlerinin Farklı Yorumlanması:

Geleneksel FMEA'da farklı riskler aynı RÖS değerine sahip olabilir, ancak bu risklerin gerçek etkileri farklı olabilir. Bulanık FMEA, bu riskleri daha detaylı bir şekilde değerlendirerek farklı RÖS değerleri üretmektedir.

Geleneksel FMEA ile bulanık FMEA değerlendirmesinin sonuçları karşılaştırıldığında, risklerin önceliklendirilmesinde ve değerlendirilmesinde önemli değişimler yaşanmıştır. Bulanık FMEA, belirsizliklerin daha iyi modellenmesi, özneliğin azaltılması, RÖS hesaplamalarının daha gerçekçi olması, karmaşık ve dinamik sistemlerde daha etkili analizler yapılması gibi avantajları sayesinde, risklerin daha doğru ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağladığı bu nedenle bulanık FMEA'nın geleneksel FMEA'ya kıyasla daha dengeli ve güvenilir sonuçlar verdiği değerlendirilmiştir.

Genel olarak diğer risk analizi yöntemlerine kıyasla FMEA'nın bulanıklaştırılmış olarak hesaplanmasında RÖS sayıları değişebilmekte ve eylem sıralamasının yeniden belirlenmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak hata türü ve etkileri analizi ile diğer risk analizi yöntemlerinin risk önceliklerini belirleme ve analiz etmede kendilerine özgü dezavantajları var olup hata türü ve etkileri analizinin bulanık mantık ile çözümü yapıldığında risk öncelik sıralamasında değişimler gerçekleşmekte, geleneksel hata türü ve etkileri analizi yönteminde daha düşük öneme sahip olan hata modlarının bulanık yöntemde ön sıralara gelebilmekte veya gerileyebilmektedir. Bulanık hata türü ve etkileri analizinin benimsenmesindeki temel argüman risk öncelik sayısının belirlenmesi aşamasında hata türü, hata etkileri ve hata nedenlerinin çarpanlarının aynı sonucu verdiği durumda risk önceliklerinin de aynı olması fakat farklı etkilere sahip olmasıdır.

Bulanık FMEA yöntemi, vana üretimi gibi belirli bir süreçle sınırlı olmayan ve geliştirilebilir bir yaklaşımdır. Bu yöntem, belirsizlikleri ve özneliği yönetme konusundaki esnekliği sayesinde otomotiv, havacılık, sağlık, enerji, gıda, kimya ve inşaat gibi farklı endüstrilerde başarıyla uygulanabilir. Örneğin, otomotiv endüstrisinde üretim hattındaki karmaşık süreçlerdeki riskleri analiz ederken, sağlık sektöründe tıbbi cihazlardaki hata modlarını değerlendirmede kullanılabilir. Bulanık FMEA, veriye dayalı analizler ve uzman görüşlerini entegre ederek, hem küçük ölçekli üretim süreçlerinde hem de büyük ölçekli endüstriyel sistemlerde riskleri daha etkili bir şekilde değerlendirir. Bu, süreçlerin güvenilirliğini ve verimliliğini artırarak, işletmelerin daha proaktif bir risk yönetimi stratejisi benimsemesini sağlar.

Sektör çalışanları, Bulanık FMEA'yı etkili bir şekilde uygulamak için eğitim, veri toplama, uzman görüşü entegrasyonu ve yazılım kullanımı gibi adımları takip edebilir.

Özellikle MATLAB Fuzzy Logic Toolbox gibi araçlar, bulanık mantık sistemlerinin kolayca modellenmesini ve görselleştirilmesini sağlar. Çalışanların bu yöntemi benimsemesi, süreçlerdeki riskleri daha iyi anlamalarına ve önlem almalarına yardımcı olur. Ayrıca, sürekli iyileştirme yaklaşımıyla Bulanık FMEA sonuçları düzenli olarak gözden geçirilerek, süreçlerin sürekli optimize edilmesi mümkün hale gelebilir. Bu, hem iş güvenliğini artırabilir hem de operasyonel verimliliği maksimize edebilir.

Yazarların Katkısı

Öztürk çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, Tak veri toplama ve veri analizi, Öztürk ve Tak veri analizi ve yorumlama konusunda katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Ak, Ş. & Zorluer, İ. (2022). Evaluation of Occupational Accidents in the Construction Industry with Fault Tree Analysis, *Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, 33(6), 12817–12846. <https://doi.org/10.18400/tekderg.858275>.
- Akpınar, T. & Çakmakaya, B.Y. (2014). İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından İşverenlerin Risk Değerlendirme Yükümlülüğü, *Çalışma ve Toplum*, 1(40), pp. 273–304.
- Ayvaz, B. et al. (2018). Biyozdizel Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı İçin Çok Amaçlı Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli Önerisi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(4), 55–70. <https://doi.org/10.17482/uumfd.455307>.
- Beylihan, E. & Eevli, S. (2023). Hata Türü ve Etkileri Analizinde Bulanık Swar Yönteminin Kullanımı: Otomotiv Sektörü Örneği, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 212–224. <https://doi.org/10.21923/jesd.1085124>.
- Çelik N., Öztürk, F. (2017). The Upcoming issues of industry 4.0 on occupational health & safety specialized on Turkey example, *International Journal of Economics, Business and Management Research*, 1(5), 236–256.
- Görgülü, Ö. & Şahinler, S. (2016). Bulanık Mantık Uygulamalarının MATLAB Aracılığıyla Çözümlemesi, in IX. Ulusal Biyoistatistik Kongresi.
- Gul, M. et al. (2021). A Fuzzy FMEA Approach to Prioritize Risks in Production Processes: A Case Study in the Automotive Industry, *International Journal of Production Research*.

- Halfarová, P., Ustyugova, T. & Vykydal, D. (2013). The Application Of Fuzzy FMEA, in 22nd International Conference on Metallurgy and Materials (METAL), 1–5.
- Ivanova, M., Tsenev, V. & Dimitrov, B. (2021). Manufacturing Process Improvement through FMEA Analysis and Fuzzy Logic, 2021 30th International Scientific Conference Electronics, ET 2021-Proceedings, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ET52713.2021.9579721>.
- Kabakulak, T. (2019). Bir Tekstil İşletmesinde Risk Değerlendirme Uygulaması : 5x5 Matris ve HAZOP, Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, 3(2), 97–111. <https://doi.org/10.33720/kisgd.581677>.
- Kahraman, A. et al. (2020). A Hybrid MCDM Approach for Risk Assessment in Renewable Energy Projects: A Case Study of Wind Farms, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Karsak, E. E. et al. (2019). Risk Assessment in Construction Projects Using Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS, Journal of Civil Engineering and Management.
- Li, H. et al. (2022). A Hybrid Approach Integrating FMEA, Fuzzy AHP, and Machine Learning for Risk Assessment in Smart Manufacturing, Expert Systems with Applications.
- Liu, S. et al. (2020). An Integrated Fuzzy FMEA and Fuzzy AHP Approach for Risk Assessment in Healthcare Systems, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems.
- Mohammed, A., Ghaithan, A. & Al-Yami, F. (2023). An integrated fuzzy-FMEA risk assessment approach for reinforced concrete structures in oil and gas industry, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 44(1), 1129–1151. <https://doi.org/10.3233/JIFS-221328>.
- Özfırat, M.P. (2014). Bulanık Önceliklendirme Metodu Ve Hata Türü ve Etkileri Analizini Birleştiren Yeni Bir Risk Analizi Yöntemi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(4), 755–768. <https://doi.org/10.17341/gummfd.04423>.
- Öztürk, F., (2014). Qualität, Effizienzsteigerung und integrierte Managementsystemen im türkischen Eisenbahnsektor, Social and Natural Sciences Journal, 8(2), 14-19.
- Öztürk, F. et al. (2022). Tenerife Accident Analysis: a comparison of Fault Tree Analysis, Failure Mode and Effects Analysis and Causal Analysis based on System Theory, Gazi University Journal of Science, 36(2), 773–790. <https://doi.org/10.35378/gujs.1014604>.
- Smith, K. Smith et al. (2021). Risk Assessment in Healthcare Using a Hybrid FMEA and Machine Learning Approach, Healthcare Management Science.

- Tak, G. & Öztürk, F. (2024). Supporting Occupational Health and Safety with Lean 5s System. Ankara. <https://www.icenss.org/wp-content/uploads/2024/07/icenss-2024-tam-metinler-kitapcigi-8.pdf> adresinden 20 Ocak 2025 tarihinde alınmıştır.
- Tarakci, E., (2020). The ergonomic risk analysis with REBA method in production line, *Ergonomi Dergisi*, 3(2), 96-107.
- Taş, Y. & Koç, K.H. (2013). Hata Türü ve Etkileri Analizi (Fmea) Tekniğinin Mobilya Endüstrisine Yönelik Uygulaması, *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 150–178.
- Testik, O.M. & Unlu, E.T. (2023). Fuzzy FMEA in risk assessment for test and calibration laboratories, *Quality and Reliability Engineering International*, 39(2), 575–589. <https://doi.org/10.1002/qre.3198>.
- Turan, M. & Gönen, O.D. (2019). Transformatör üreten bir firmada risk analizinde bulanık HTEA kullanımı ve uygulama yazılımı geliştirme, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 474–487. <https://doi.org/10.25092/baunfbcd.549171>.
- Wang, J. et al. (2021). Predictive Maintenance Using Machine Learning: A Case Study in the Manufacturing Industry, *Journal of Manufacturing Systems*.
- Yeh, R.H. & Hsieh, M.H. (2007). Fuzzy assessment of FMEA for a sewage plant, *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 24(6), 505–512. <https://doi.org/10.1080/10170660709509064>.
- Zhang, R. et al. (2022). Machine Learning-Based Risk Assessment in Supply Chain Management: A Case Study, *Computers & Industrial Engineering*.



FIFTH-ORDER COMPACT FINITE DIFFERENCE SCHEME FOR BURGERS-HUXLEY EQUATION

BURGERS-HUXLEY DENKLEMİ İÇİN BEŞİNCİ MERTEBEDEN KOMPAKT SONLU FARK ŞEMASI

Canan AKKOYUNLU¹

<https://doi.org/10.55071/ticaretfdb.1627642>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
c.kaya@iku.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
27.01.2025

Revised
(Revizyon Tarihi)
16.04.2025

Accepted
(Kabul Tarihi)
16.04.2025

Abstract

The Burgers-Huxley equation arises in several problems in science. The compact finite difference scheme (CFDS) has been developed for the Burgers-Huxley equation. This scheme has been compared different methods for the Burgers-Huxley equation. Dispersive properties are investigated for the linearized equations to examine the nonlinear dynamics after discretisation. The accuracy and computational efficiency of the compact finite differences scheme are shown in numerical test problems.

Keywords: Burgers-Huxley equation, compact finite difference scheme, dispersion analysis.

Öz

Bilimde çeşitli problemlerde Burgers-Huxley denklemi ile karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada kompakt sonlu fark şeması, Burgers-Huxley denkleminin çözümü için uygulanmıştır. Çözümler farklı yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Lineer olmayan denklem diskrize edildikten sonra çözümün doğruluğunu analiz etmek için dağılım analiz yapılmıştır. İncelenen problemler üzerinde kompakt sonlu fark şemasının doğruluğu ve hesaplama verimliliği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Burgers-Huxley denklemi, kompakt sonlu fark şeması, dağılım analiz.

¹ İstanbul Kültür University, Faculty of Science & Letters, Department of Mathematics and Computer Science, İstanbul, Türkiye.
c.kaya@iku.edu.tr

1. INTRODUCTION

The aim of this study is develop a numerical solution using CFDS for the Burgers-Huxley equation

$$v_t - v_{xx} + \alpha \tilde{v}^\delta v_x = \bar{\beta} v (1 - v^\delta) (v^\delta - \tilde{\gamma}), \quad 0 \leq x \leq 1, \quad t \geq 0 \quad (1)$$

The solution of (1) is given by

$$v(x, t) = \left(\frac{\gamma}{2} + \frac{\gamma}{2} \tanh(w_1(x - w_2 t)) \right)^{\frac{1}{\delta}} \quad (2)$$

where $w_1 = \frac{-\alpha\tilde{\delta} + \delta\sqrt{\alpha^2 + 4\bar{\beta}(1+\delta)}}{4(1+\delta)}$, $w_2 = \frac{\alpha\tilde{\gamma}}{1+\delta} - \frac{(1+\delta-\tilde{\gamma})(-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\bar{\beta}(1+\delta)})}{2(1+\delta)}$, the parameters $\alpha, \bar{\beta}, \tilde{\gamma}$ and δ are constants such that $\bar{\beta} \geq 0, \delta > 0, \tilde{\gamma} \in (0, 1)$ (Satsuma, 1987) The initial and boundary conditions obtained using the solution in (1).

The Burgers-Huxley equation appears in many different areas, such as the motion of the domain wall of a ferroelectric material in an electrical field, certain ecological models, etc. (Yefimova et al., 2004) The generalized Burgers-Huxley equation was investigated by Satsuma et al. in 1987.

There are many research to get the solution of the Burgers-Huxley equation using different methods. Javidi computed the solution using the spectral collocation method and pseudospectral method (Javidi 2006, Javidi 2006). Bratsos (2011) used a fourth-order finite difference scheme in two time level recurrence relation to get the numerical solution. Also various mathematical methods such as adomain decomposition method (Ismail et al., 2004, Hashim et al., 2006), homotopy analysis method (Molabahramin et al., 2009), variational iteration method (Batiha et al., 2011), NSFD schemes (Zibaei et al., 2016), local discontinuous Galerkin method and tanh-coth method (Wazwaz 2008), the collocation method (Singh et al., 2024), Galerkin method (Chin, 2023), finite element method and lie symmetry analysis (Anjali et al, 2025), Crank Nicolson logarithmic finite difference method (Celikten et al, 2022) have been used to solve the equation.

Many researchers used the CFDS for the solution of Burgers-Huxley equation. Shenggao et al. (2011) applied compact scheme which has a fourth-order accuracy in space and second-order accuracy in time. Mohanty et al. (2015) used new two-level implicit compact operator method with on of order two in time and four in space for the solution of Burgers-Huxley equation. In addition to that modified compact finite difference method given to get numerical solution (Rusli et al., 2025).

Although there are many methods to construct compact schemes, the Pade Approximation Method and the Taylor Series Method are two of the most basic and commonly used approximations. For the first and second derivative approximations compact finite difference schemes (CFDS) were given both for the inner points and the boundary points by using the Taylor approximation (Lele, 1992). The paper is arranged as follows: In Section II, CFDS for Burgers-Huxley equation is presented. Section III deals with the dispersion relations of compact finite difference scheme for linearized

Burgers-Huxley equation. In Section IV, numerical results for different problems are presented in tables and conclusion is given in Section V.

2. COMPACT FINITE DIFFERENCES SCHEME

The spatial domain is given as $[a, b]$ with the spatial step length $h=(b-a)/(N-1)$. Here N represents spatial grid points ($x_i = h(i-1)$). Equal sub-intervals have been chosen to better compare the obtained results with those in the literature. Furthermore, the method is expressed for equal sub-intervals. $f_i = f(x_i)$ are the function values at the grid points and the approximation to the first derivative f'_i is expressed as in the following

$$\bar{\beta}f'_{i-2} + \alpha f'_{i-1} + f'_i + \alpha f'_{i+1} + \bar{\beta}f'_{i+2} = c \frac{f_{i+3} - f_{i-3}}{6h} + b \frac{f_{i+2} - f_{i-2}}{4h} + a \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2h} \quad (3)$$

The Taylor expansion is applied to find out the coefficients. If we choose the coefficients $\bar{\beta}=c=0$, we obtain tridiagonal schemes. Although the order of accuracy for derivatives is $O(h^5)$ for inner points, it is $O(h^6)$ for the boundary points. Also, the approximation for the second derivative of the function is given as in the following

$$\bar{\beta}f''_{i-2} + \alpha f''_{i-1} + f''_i + \alpha f''_{i+1} + \bar{\beta}f''_{i+2} = c \frac{f_{i+3} - 2f_{i+1} + f_{i-3}}{9h^2} + b \frac{f_{i+2} - f_{i+1} + f_{i-2}}{4h^2} + a \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{h^2} \quad (4)$$

The approximation formula are given in the equation (4) and (5) for boundary point at $i = 1$.

- For first derivative

$$f'_1 + \alpha f'_2 = \frac{1}{h}(af_1 + bf_2 + cf_3 + df_4) \quad (4)$$

- For second derivative

$$f''_1 + \alpha f''_2 = \frac{1}{h^2}(af_1 + bf_2 + cf_3 + df_4 + ef_5) \quad (5)$$

For the boundary point at $i = N$, we can get easily using the equations (4) and (5). The compact schemes with their calculated coefficients are obtained for inner points from $i = 3$ up to $i = N - 2$ and for boundary points at $i = 2$ and $i = N - 1$, respectively.

$$\frac{h}{3}(-17f'_1 - 14f'_2 + f'_3) = f_0 + 8f_1 - 9f_2, \quad i = 2 \quad (6)$$

$$\frac{h}{3}(f'_{i-1} + 4f'_i + f'_{i+1}) = -f_{i-1} + f_{i+1}, \quad i = 3, \dots, N - 2 \quad (7)$$

$$\frac{h}{3}\left(\frac{1}{8}f'_{N-3} - \frac{5}{8}f'_{N-2} + \frac{19}{8}f'_{N-1} + \frac{9}{8}f'_N\right) = -f_{N-1} + f_N, \quad i = N - 1 \quad (8)$$

$$\frac{h^2}{12}(14f_1'' - 5f_2'' + 4f_3'' - 5f_4'') = f_0 - 2f_1 + f_2, i = 2 \quad (9)$$

$$\frac{h^2}{12}(f_{i-1}'' + 10f_i'' + f_{i+1}'') = f_{i-1} - 2f_i + f_{i+1}, i = 3, \dots, N-2 \quad (10)$$

$$\frac{h^2}{12}(-f_{N-1}'' + 4f_{N-3}'' - 5f_{N-2}'' + 14f_{N-1}'') = f_{N-2} - 2f_{N-1} + f_N, i = N-1 \quad (11)$$

For example, with 7 nodes, the matrices below are constructed using the compact schemes from (6), (7), and (8) as shown below

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-17h}{3} & \frac{-14h}{3} & \frac{h}{3} & 0 & 0 \\ \frac{h}{3} & \frac{4h}{3} & \frac{h}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{h}{3} & \frac{4h}{3} & \frac{h}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{h}{3} & \frac{4h}{3} & \frac{h}{3} \\ 0 & \frac{h}{24} & \frac{-5h}{24} & \frac{19h}{24} & \frac{9h}{24} \end{bmatrix}, \quad V' = \begin{bmatrix} f_1' \\ f_2' \\ f_3' \\ f_4' \\ f_5' \end{bmatrix}$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} 8 & -9 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad H_1 = \begin{bmatrix} f_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

The matrix V' having the approximation values of the first derivative at each node is calculated via the equation (12).

$$A_1 V' = K_1 V + H_1 \quad (12)$$

We will apply the LU decomposition technique to the known matrix A_1 and then the following calculations to obtain V' :

$$\begin{aligned} (L_0 V_0) V' &= K_1 V + H_1 \\ L_0^{-1} L_0 V_0 V' &= L_0^{-1} K_1 V + L_0^{-1} H_1 \end{aligned} \quad (13)$$

Let's take T_1 as $L_0^{-1} K_1$ and G_1 as $L_0^{-1} H_1$

$$T_1 = L_0^{-1} K_1 \quad (14)$$

$$G_1 = L_0^{-1} H_1 \quad (15)$$

Let's repeat the operations done so far for V_0

$$V_0 V' = T_1 V + G_1 \quad (16)$$

$$V_0^{-1} V_0 V' = V_0^{-1} T_1 V + V_0^{-1} G_1$$

$$S_1 = V_0^{-1} G_1 \quad (17)$$

$$V' = C_1 V + S_1 \quad (18)$$

Using the compact schemes in (9), (10) and (11), having the approximation values at each grid point the matrices below are obtained to get the matrix V'' .

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{14h^2}{12} & \frac{-5h^2}{12} & \frac{4h^2}{12} & \frac{-h^2}{12} & 0 \\ \frac{h^2}{12} & \frac{10h^2}{12} & \frac{h^2}{12} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{h^2}{12} & \frac{10h^2}{12} & \frac{h^2}{12} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{h^2}{12} & \frac{10h^2}{12} & \frac{h^2}{12} \\ 0 & \frac{-h^2}{12} & \frac{4h^2}{12} & \frac{-5h^2}{12} & \frac{14h^2}{12} \end{bmatrix}, \quad V'' = \begin{bmatrix} f_1'' \\ f_2'' \\ f_3'' \\ f_4'' \\ f_5'' \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{bmatrix}, \quad K_2 = \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 \end{bmatrix}, \quad H_2 = \begin{bmatrix} f_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_6 \end{bmatrix}$$

$$A_2 V'' = K_2 V + H_2 \quad (19)$$

$$V'' = C_2 V + S_2 \quad (20)$$

2.1. Compact Finite Difference Scheme for Burgers-Huxley Equation

Equations (18) and (20) is substituted to the equation (1). We use CFDS for spatial dimension and finite differences along the time axis, lastly they are written via explicit approximation and the discretization scheme is obtained. The discrete solution at a point will be represented $V_j^n \approx V(x_j, t^n)$

$$\frac{v_j^{n+1} - v_j^n}{\Delta t} - (C_2 V_j^n + S_2) + \alpha V^\delta (C_1 V_j^n + S_1) = \bar{\beta} (1 - (V_j^n)^\delta) ((V_j^n)^\delta - \tilde{\gamma}) \quad (21)$$

This scheme is explicit because the solution values at time t^{n+1} are calculated directly from the known values at time t^n .

3. DISPERSION RELATION

Traveling wave or soliton solutions of nonlinear PDEs can be investigated through their dispersive behavior. To understand the solution behaviour of the compact finite differences methods, linearized equations and investigate numerical dispersion relation will be considered. The linearized PDEs will be solved again by using the compact finite differences scheme in order to compare to continuous and the discrete versions of the dispersion relations of the equations. Assume that $\tilde{v}: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ is a second order continuously differentiable function, such that $|\tilde{v}(x, t)| < 1$. Let also $v = \tilde{v} + \bar{v}$, where $\bar{v}$ and $\tilde{v}$ are solutions to (1). Hence, $v_t = \bar{v}_t + \tilde{v}_t$, $v_x = \bar{v}_x + \tilde{v}_x$ and $v_{xx} = \bar{v}_{xx} + \tilde{v}_{xx}$. For dispersion analysis we get $\alpha = \beta = \delta = 1$, $\tilde{\gamma} = 0.001$. Substituting this into the equation (1), we get

$$\bar{v}_t + \tilde{v}_t + (\bar{v} + \tilde{v})(\tilde{v}_x + \bar{v}_x) - (\bar{v}_{xx} + \tilde{v}_{xx}) - (1 - (\bar{v} + \tilde{v}))(\bar{v} + \tilde{v} - 0.001) \quad (22)$$

Since $\bar{v}$ is the solution of (1)

$$\bar{v}_t + \bar{v}\bar{v}_x - \bar{v}_{xx} - (1 - \bar{v})(\bar{v} - 0.001) = 0$$

When we also ignore the higher order terms and linearize it around the constant solution $\bar{v}$ the linearized equation becomes

$$\tilde{v}_t + a\tilde{v}_x - \tilde{v}_{xx} - 2.002a\tilde{v} + 3a^2\tilde{v} + 0.001\tilde{v} = 0 \quad (23)$$

where $a = \bar{v}$.

Assuming each wave mode as a solution of a linearized PDE (23), the solution takes the following form

$$\tilde{v} = \hat{v}e^{i(kx+wt)}$$

where $\hat{v} = \hat{v}(k)$ denotes the amplitude, k is the wave number, and w is the frequency. By substituting this solution into linearized equation and simplifying, we get

$$w = ik^2 - k + (3a^2 + 0.001 - 2.002a)i \quad (24)$$

Which is a dispersion relationship for the linearization of the Burgers-Huxley equation (23) around the plane wave solution.

In order to get discrete version of the dispersion relations for the equations (23), the linearized system will be solved again using the compact finite difference scheme. The compact finite differences scheme is applied by taking $a = 1$ the following discretized equation (25) is obtained

$$\tilde{v}_j^{n+1} - \tilde{v}_j^n + \Delta t C_1 \tilde{v}_j^n + \Delta t S_1^n - \Delta t C_2 \tilde{v}_j^n - \Delta t S_2^n + \Delta t 0.999 \tilde{v}_j^n = 0 \quad (25)$$

where $\tilde{v}_j^n = \tilde{v}(x_j, t_n)$ and which has a discrete general solution of the form

$$\tilde{v}_j^n = \hat{v}e^{i(kx_j+wt_n)} = \hat{v}e^{i(jk\Delta x+nw\Delta t)} = \hat{v}e^{i(j\bar{k}+n\bar{w})}$$

where $\bar{k} = k\Delta x$ is the numerical wave number and $\bar{w} = w\Delta t$ is the numerical frequency such that $-\pi \leq k \leq \pi$ and $-\pi \leq w \leq \pi$. As in the continuous case, substituting the numerical plane wave solution in (25) into the linearized equation and simplifying, the numerical dispersion relation is calculated as in (26) (Aydin et al., 2004).

$$\bar{w} = \frac{-i}{c} [\ln(\gamma_2) - \ln(1 + \gamma_1)] - \frac{1}{c} j\bar{k} \quad (26)$$

where $\gamma_1 = -1 + \Delta t C_1 - \Delta t C_2 + 0.999\Delta t$, $\gamma_2 = \Delta t(-S_1^n + S_2^n)$, $c = \frac{1+n\gamma_1}{1+\gamma_1}$.

In Figure (1) and Figure (2) the exact and numerical dispersion of the linearized Burgers-Huxley equation are shown for the continuous w, k and discrete $\bar{w}, \bar{k}$ which are frequencies and wave numbers for real and imaginary parts, respectively. In all

computations, Δt and Δx are let to be 0.1. For the continuous dispersion relation and the discrete dispersion relation there are certain frequencies corresponding to each wavenumber. In Figure (1) and Figure (2) the analytical and numerical dispersion relation have been plotted. If the dispersion graphs given in Figure (1) and Figure (2) are compared with each other, it's obvious that, real continuous and real numerical dispersion curves have similar behaviours. The imaginary exact dispersion relation has the term k^2 but any similar term is not included in imaginary numerical dispersion relation. From the figures, we see that numeric dispersion relations of the compact finite difference method preserves the continuous dispersion relation for small wave numbers k .

Dispersion analysis of the compact finite difference scheme for the problem studied in this paper reveals that there doesn't exist diffeomorphisms ψ_1 and ψ_2 satisfying the exact dispersion for the imaginary part

$$D_N(\bar{w}, \bar{k}) = D(\psi_1(\bar{w}), \psi_2(\bar{k}))$$

where $D_N(\bar{w}, \bar{k})$ is numerical dispersion relation and $D(w, k)$ is exact dispersion relation.

These dispersion relations exist for the real parts.

4. NUMERICAL RESULTS

In this part, solution for equation in (1) is obtained using CFDS. To illustrate the efficiency of the CFDS for the problem handled in this study, the maximum error which is given by the equation below

$$L_\infty = \max_{1 \leq j \leq N} |v(x_j, t) - V(x_j, t)|$$

where $v(x_j, t)$ and $V(x_j, t)$ refer to the exact solution and solution via compact finite difference scheme, respectively.

Example 1.

Consider equation (1) with $\alpha = \beta = 1$, $\gamma = 0.001$ and $\Delta t = 0.00005$. Numerical solutions at $t = 0.2$ and $t = 1$ are presented for computational domain $[0, 1]$ in Table (1) and Table (2). For $N = 8$ and $N = 16$ numerical solutions are given. As it can be seen from the Table (1) and Table (2) the compact finite difference scheme is more accurate.

Example 2.

Obtained numerical solutions have been presented with maximum errors for $\alpha = 5$, $\Delta t = 0.0001$ in Table (3) and Table (4). In Table (3) and Table (4), the errors are presented for various values of γ and β for $N = 9$.

5. CONCLUSION

In this study, compact finite difference scheme is used to solve Burgers-Huxley equation. The performance of the scheme is tested on the considered test problems, and maximum absolute errors are computed. For some constant values, maximum error values for the presented scheme are almost the same with those for the other methods (Javidi et al., 2009, Zhang et al., 2012) in literature. But the error values of presented scheme are more satisfactory in comparison with the error values in (Bratsos, 2011) and (Mohanty et al., 2015). This study focuses on analyzing the dispersive characteristics of the linearized Burger-Huxley equation and the numerical dispersive properties of the compact finite difference method. The real numerical and real exact dispersion relations are very close to each other.

Table 1. Maximum Error with $\alpha^*=1, \bar{\beta}=1, \tilde{\gamma}=0,001, \Delta t=0,00005$ and $N=8$ for Example 1

t		Javidi et al., 2009	Zhang et al., 2012	Presented method
0,2	$\delta = 1$	4,0138e-8	3,7725e-8	2,6442e-8
	$\delta = 4$	1,3139e-5	1,2348e-5	9.3302e-6
	$\delta = 8$	3,5540e-5	3,3397e-5	2,6091e-5
1	$\delta = 1$	4,6849e-8	4,3914e-8	2,8443e-8
	$\delta = 4$	1,5325e-5	1,4366e-5	1,0063e-5
	$\delta = 8$	4,1407e-5	3,8818e-5	2,8157e-5

Table 2. Maximum Error with $\alpha^*=1, \bar{\beta}=1, \tilde{\gamma}=0,001, \Delta t=0,00005$ and $N=16$ for Example 1

t		Javidi et al., 2009	Presented method
0,2	$\delta = 1$	4,0138e-8	3,3402e-8
	$\delta = 4$	1,3139e-5	1,1287e-6
	$\delta = 8$	3,5540e-5	3,0979e-5
1	$\delta = 1$	4,6849e-8	3,7349e-8
	$\delta = 4$	1,5325e-5	1,2630e-5
	$\delta = 8$	4,1406e-5	3,4658e-5

Table 3. Maximum Error with $\alpha\tilde{=}5, \tilde{\gamma}\text{=}0,001, \Delta t\text{=}0,0001$ for Example 2

t		Javidi et al., 2009	Bratsos 2011	Mohanty et al., 2015	Presented Method
0,3	$\bar{\beta} = 1$	3,1616e - 8	3,1570e-8	3,0414e-8	2,3242e-8
	$\bar{\beta} = 4$	3,9742e-7	3,9668e-5	3,8439e-7	3,0600e-7
	$\bar{\beta} = 8$	5,0365e-6	5,0291e-6	4,9161e-6	4,0219e-6
0,9	$\bar{\beta} = 1$	3,3394e-8	3,3393e-8	3,2090e-8	2,3805e-8
	$\bar{\beta} = 4$	4,1977e-7	4,1976e-7	4,0977e-7	3,1351e-7
	$\bar{\beta} = 8$	5,3166e-6	5,3165e-6	5,2161e-6	4,1195e-6

Table 4. Maximum Error with $\alpha\tilde{=}5, \tilde{\gamma}\text{=}0,0001, \Delta t\text{=}0,0001$ for Example 2

t		Javidi et al., 2009	Bratsos 2011	Mohanty et al., 2015	Presented Method
0,3	$\bar{\beta} = 1$	3,1630e-10	3,1584e -10	3,0428e-10	2,3253e-10
	$\bar{\beta} = 10$	4,9760e-9	3,9702e - 9	3,8442e-9	3,0614e-9
	$\bar{\beta} = 100$	5,0389e- 8	5,0316e - 8	4,9176e-8	4,0239e-8
0,9	$\bar{\beta} = 1$	3,3409e-10	3,3408e -10	3,2099e-10	2,3816e-10
	$\bar{\beta} = 10$	4,1996e-9	4,1995e - 9	4,0983e-9	3,1365e-9
	$\beta = 100$	5,3223e-8	5,3221e - 8	5,2211e-8	4,1234e-8

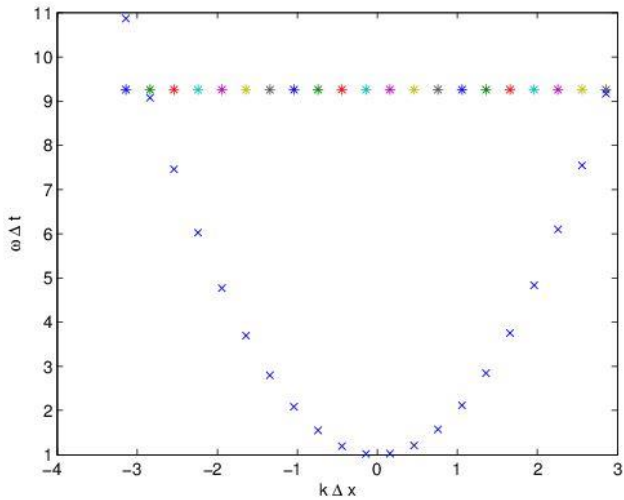


Figure 1. For $\Delta t\text{=} \Delta x\text{=}0,1$, Exact (dot) and Numeric (solid) Dispersion Relation for Imaginary Part of Linearized Burgers-Huxley Equation

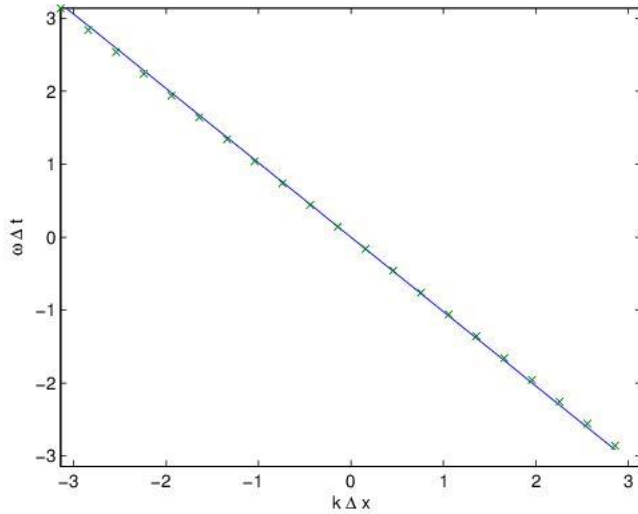


Figure 2. For $\Delta t = \Delta x = 0,1$, Exact (dot) and Numeric (solid) Dispersion Relation for Real Part of Linearized Burgers-Huxley Equation

Acknowledgements

We would like to thank the referees who contributed to the article with their valuable comments.

Statement of Research and Publication Ethics

Research and publication ethics were observed in the study.

REFERENCES

- Anjali, K., Vivek. S. & Rajesh, K. G. (2025). Comparative Analysis of the Singularly Perturbed Generalized Burgers-Huxley Problem via Approximate Lie Symmetry and Exponentially Fitted Finite Element Method. *International Journal of Theoretical Physics*, 64, <https://doi.org/10.1007/s10773-025-05882-1>.
- Aydın, A. & Karasozen, B. (2010). Multisymplectic box schemes for the complex modified Korteweg-de Varies equation. *Journal of Mathematical Physics*, 51, 083511.
- Batiha, B., Noorani, M.S.M. & Hashim, I. (2008). Application of variational iteration method to the generalized Burgers-Huxley equation. *Chaos Solitons @ Fractals*, 36, 660-663.
- Bratsos, A.G. (2011). A fourth order improved numerical scheme for the generalized Burgers-Huxley equation. *Am J Comput Math*, 1, 152-158.

- Celikten, G. & Cankurt, A. (2022). A Numerical Solution of the Generalized Burgers-Huxley Equation. *AKÜ FEMUBID*, 22, 75-84.
- Chin, PWM. (2023). The analysis of the solution of the Burgers-Huxley equation using the Galerkin method. *Numerical Methods For Partial Differential Equations*, 39, 2787-2807.
- Hashim, I., Noorani, M.S.M. & Al-Hadidi, MRS. (2006). Solving the generalized Burgers-Huxley equation using the adomain decomposition method. *Math Comput Model*, 43, 1404-1411.
- Ismail, H.N.A., Raslan, K. & Rabboh, A.A.A. (2004). Adomain decomposition method for Burgers-Huxley and Burgers-Fisher equations. *Appl Math Comput*, 159, 291-301.
- Javidi, M. (2006). A numerical solution of the generalized Burgers-Huxley equation by pseudospectral method and darvishi's preconditioning. *Appl Math Comput*, 175, 1619-1628.
- Javidi, M. (2006). A numerical solution of the generalized Burgers-Huxley equation by spectral collocation method. *Appl Math Comput*, 178, 338-344.
- Javidi, M. & Golbabai, A. (2009). A new domain decomposition algorithm for generalized Burger's-Huxley equation based on Chebyshev polynomials and preconditioning. *Chaos Solitons and Fractals*, 39, 849-857.
- Lele, S.K. (1992). Compact finite difference schemes with Spectral-like. Resolution, *Journal of Computational Physics*, 103, 16-42.
- Mohanty, R.K. Weizhong, D. & Donn, L. (2015). Operator compact method of accuracy two time in time and four in space for the solution of time dependent Burgers-Huxley equation. *Numer Algor*, 70, 591-605.
- Molabahramin, A. & Khani, F. (2009). The homotopy analysis method to solved the Burgers-Huxley equation. *Nonlinear Analysis, Real World Applications*, 2, 589-600.
- Rusli, R., Nasir, M. A. S., Harun, N., Rathi, S. & Zubaidah, S. (2025). A new modified compact finite difference scheme for solving the generalized Burgers-Huxley equation in teaching and learning processes. *Journal of Quality Measurement and Analysis*, 21, 195-205.
- Satsuma, J. (1986). Exact Solutions of Burgers Equation with Reaction Terms. Topics in Soliton Theory and Exactly Solvable Nonlinear Equations, World Sci Pub, Singapore.
- Shenggao, Z. & Xiaoliang, C. (2011). A linearly semi-implicit compact scheme for the Burgers-Huxley equation. *International Journal of Computer Mathematics*, 88, 795-804.

- Singh, A., Dahiya, S. & Emdifar, H. (2024). Numerical Solution of Burgers-Huxley Equation Using a Higher Order Collocation Method. *Journal of Mathematics*, doi.org/10.1155/2024/2439343.
- Yefimova, O.Y. & Kudryashov, N.A. (2004). Exact solutions of the Burgers-Huxley equation. *J Appl Math Mech.*, 3, 413-420.
- Zhang, R., Yu, X. & Zhao, G. (2012). The local discontinuous Galerkin Method for Burger's-Huxley and Burger's-Fisher equations. *Applied Mathematics and Computation*, 17, 8773-8778.
- Zibaei, S., Zeinadini, M. & Namjoo, M. (2016). Numerical solutions of Burgers-Huxley equation by exact finite difference and NSFD schemes. *Journal of Difference Equations and Applications*, 22, 1098-1113.
- Wazwaz, A.M. (2008). Analytic study on Burgers, Fisher, Huxley equations and combined forms of these equations. *Applied Mathematics and Computation*, 2, 754-761.



Research Article / Araştırma Makalesi

INVESTIGATING THE EFFECTS OF MATHEMATICAL MUSIC ON EEG BRAINWAVE FREQUENCIES*

MATEMATİKSEL MÜZİĞİN EEG BEYİN DALGA FREKANSLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Cemil KARAÇAM¹

Halil YAKIT²

Şerif Efe DARTAR³

Kayra Ege ALTUN⁴

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1650619>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)

cemil-karacam@hotmail.com

Received
(Geliş Tarihi)

04.03.2025

Revised
(Revizyon Tarihi)

05.05.2025

Accepted
(Kabul Tarihi)

17.05.2025

Abstract

This study aims to present an innovative approach to the music composition process by applying mathematical principles. Five musical pieces were composed using mathematical techniques such as the Golden Ratio and Fibonacci sequences, and the potential applications of these techniques in the field of music therapy were examined. The compositions were played for healthy volunteers, and their neurological and emotional responses were measured using EEG tests. The results of these tests were systematically analyzed through brainwave measurements, allowing for the identification of new techniques and methods for potential use in music therapy. The findings highlight the therapeutic potential of music based on mathematical foundations and contribute to a deeper understanding of the relationship between music and mathematics. This study seeks to fill existing gaps in the literature by integrating mathematical methods into the music composition process and enhancing the effectiveness of music therapy.

Keywords: EEG, Fibonacci numbers, golden ratio, music therapy.

Öz

Bu çalışmanın amacı, müzik besteleme sürecine matematiksel ilkeler uygulayarak yenilikçi bir yaklaşım sunmaktır. Beş müzik eseri, Altın Oran ve Fibonacci dizileri gibi matematiksel teknikler kullanılarak bestelenmiş ve bu tekniklerin müzik terapisi alanındaki potansiyel uygulamaları incelenmiştir. Besteler, sağlıklı gönüllülere dinletilmiş ve EEG testleri yoluyla nörolojik ve duygusal tepkileri ölçülmüştür. EEG test sonuçları, beyin dalgası ölçümleriyle sistematik olarak analiz edilmiş ve bu analizler, müzik terapisinde kullanılabilecek yeni teknikler ve yöntemlerin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Çalışmanın bulguları, matematiksel temellere dayalı müziklerin terapötik potansiyelini ortaya koymakta ve müzik ile matematik arasındaki ilişkiyi daha derinlemesine anlamamıza katkıda bulunmaktadır. Bu çalışma, mevcut literatürdeki boşlukları doldurmayı amaçlamakta olup, müzik besteleme sürecine matematiksel yöntemlerin entegrasyonu ile müzik terapisinin etkinliğini artırmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: EEG, Fibonacci sayıları, altın oran, müzik terapi.

* This publication is derived from the award-winning project by Şerif Efe DARTAR and Kayra Ege ALTUN under the supervision of Cemil KARAÇAM in the TÜBİTAK 2204-A competition in 2023.

¹ Mugla Science and Art Center, Department of Mathematic, Mugla, Türkiye.
cemil-karacam@hotmail.com.

² Kabatas High School, Istanbul, Türkiye.
halilyakit@gmail.com.

³ Kabatas High School, Istanbul, Türkiye.
dseref.efe@gmail.com.

³ Kabatas High School, Istanbul, Türkiye.
altunkayra07@gmail.com.

1. INTRODUCTION

Music and mathematics share a profound connection, with mathematical principles being integral to music theory and prompting further exploration. Historically, mathematics has significantly influenced the structural framework of music, illustrating its impact and potential for devising new sound systems based on mathematical ratios (Panti, 2020). For instance, Pythagoras elucidated the harmonious relationships between note frequencies, leading to the Pythagorean tuning system (Nyhoff, 2024). Similarly, Bach explored the mathematical dimensions of instrument tuning (Siddharthan, 1999; Lindley & Ordgies, 2006).

The psychological impact of music is a captivating subject that continues to attract substantial research interest. Researchers often employ music, particularly classical compositions, as stimuli to investigate its effects (Okay & Ece, 2019; Canyakan, 2020). Studies have demonstrated that music significantly influences various physiological responses, including changes in blood oxygen saturation, heart rate, and respiration, especially in infants (Cassidy & Stanley, 1995). Leonard Meyer's seminal work, "Emotion and Meaning in Music," emphasizes the intricate relationship between music and psychology (Spitzer, 2009).

Music therapy has a longstanding history, with early mentions found in the writings of Plato, who advocated for the inclusion of music in education for holistic development (Plato, 2006). Islamic scholars, such as Farabi, also acknowledged the impact of musical notes on emotional states (Yılmaz et al., 2019). Throughout the Seljuk and Ottoman periods, music therapy was employed as a complementary treatment in bimarhanes (mental hospitals) and *darüşşifas* (hospitals), and its practice has now expanded globally (Sufie & Sidik, 2017). Moreover, the novel sound system developed in this paper holds the potential to contribute to the existing literature on music therapy.

The electrical activity of the brain is measured using the EEG (Electroencephalography) testing method (Medicalpark, 2024). The psychological assessment for the project was conducted using this method, following ethical committee approval. Brain waves, which are crucial for our project, can be obtained through this test. They are categorized based on their frequency and carry different meanings. Delta waves, with frequencies up to 3Hz, are observed during deep sleep. Theta waves, ranging from 4Hz to 7Hz, occur during drowsiness, deep thinking, and meditation. Alpha waves, with frequencies between 8Hz and 12Hz, are present during wakefulness. Beta waves, ranging from 13Hz to 30Hz, are associated with focused thinking and concentration. Gamma waves, with frequencies above 30Hz, are important for learning and memory (Teplan, 2002; Koudelková et al., 2018).

Given the distinct characteristics and implications of alpha, beta, delta, gamma, and theta waves, they will play a central role in analyzing the music compositions created in our project. For instance, the relaxation associated with alpha waves, as well as the logical and analytical thinking linked to beta waves, can provide valuable insights for the examination of music compositions (Koudelková et al., 2018).

Mathematical structures are extensively used in music, serving as a foundation for various musical compositions. J.S. Bach's works, for example, exhibit structural and

artistic features that can be analyzed and divided into distinct musical pieces, such as "prelude" and "recitative." This approach reveals the significant utilization of mathematics in music, including the exploration of values converging toward the golden ratio (Mutver, 2007). In addition to Bach's works, studies have investigated the mathematical and musical harmonies in different pieces of music. Frequency tables have been constructed, showcasing the mathematical and musical relationships between various measures. These studies have consistently demonstrated the use of the golden ratio across different sections of music, providing further evidence of Bach's extensive application of mathematics (Mutver, 2007).

Despite these endeavors, the relationship between mathematics and music remains a subject of ongoing debate, and its full elucidation has yet to be achieved. In light of this, our project aims to examine this relationship objectively by relying on medical and scientific data, thus contributing to a deeper understanding of the subject.

In this study, music has been designed using mathematical structures such as Fibonacci sequences and the Golden Ratio. To facilitate a systematic analysis of the music, the use of an EEG (Electroencephalography) device has been decided. The generated music will be played for subjects, and during this process, brainwave data will be collected through the EEG device. The collected data will be analyzed and interpreted in light of the mathematical properties of alpha, beta, delta, gamma, and theta waves. This approach aims to examine how the mathematical structures of music interact with brain activity and their effects on neurological responses.

2. METHOD

In this paper, three pieces of music were created using the Fibonacci sequence and the Golden Ratio by consulting the full-text project named "Effects of Musics Composed Using Mathematical Methods and DNA On the EEG Frequency Bands of Healthy Individuals". The classical music piece "Grieg: Peer Gynt Suite No. 1, Morning Mood" was used for comparison with the Golden Ratio music composed in this project.

2.1. Creating Music with Mathematical Structures

In this study, the process of musical composition was restructured through the application of mathematical frameworks. Specifically, the Fibonacci sequence and the Golden Ratio were employed to determine the distribution and frequencies of musical notes.

The first method involved mapping the Fibonacci sequence, modulo 7, onto musical notes. This approach translated the inherent mathematical order of the Fibonacci series into a musical form. An algorithm developed using Python automatically generates a music file based on a user-defined number of Fibonacci numbers.

The second method was based on Zeckendorf's Theorem, which states that every positive integer can be uniquely represented as the sum of non-consecutive Fibonacci numbers. This principle was utilized in the creation of musical compositions. Selected

Fibonacci numbers were mapped to musical notes, ensuring a balanced distribution within the composition.

The third method involved the application of the Golden Ratio to musical frequencies. The traditional Pythagorean Diatonic Scale was redesigned using the Golden Ratio, resulting in a novel frequency structure derived from this mathematical constant. Considering the limited existing literature on the integration of the Golden Ratio into music theory, this scale was optimized for mathematical harmony.

The methods used in the creation of music can be categorized into three main approaches:

2.1.1. First Method

This approach involves calculating the remainder of each element in the Fibonacci Number Sequence when divided by 7 (mod 7 operation). Each resulting number is then paired with a corresponding musical note. This method allows for the selection of the desired number of Fibonacci numbers and the subsequent generation of a music file. The corresponding algorithm has been implemented in Python code, allowing for the determinaton of the number of Fibonacci numbers to be processed and the generation of a music file accordingly

2.1.2. Second Method

This approach is based on Zeckendorf's Theorem, which states that every positive integer can be expressed as the sum of one or more Fibonacci numbers. In this case, a specific Fibonacci number (e.g., 34) is chosen, and it is represented as the sum of various Fibonacci numbers. Each resulting number is then assigned to different musical notes through a cyclical process, ensuring equal representation of all notes. This cyclical process ensures that all notes are equally represented. An example composition generated by this method is provided in Figure 1. Similarly to the first method, a Python code is created and the cyclical process is implemented in Python.



Figure 1. The Music Composition Example Generated Through the Method Based on Dividing Fibonacci Numbers According to the Zeckendorf Theorem

2.1.3. Properties of Fibonacci Sequence Music

The properties of the Fibonacci sequence music are summarized in the following table:

Table 1. Correspondence of Note Frequencies and Fibonacci Numbers for the First Period in Music based on the Zeckendorf Theorem.

Note	Count in the First Period	Fibonacci Number
Do	1	F_1
Re	5	F_5
Mi	5	F_5
Fa	8	F_6
Sol	5	F_5
La	5	F_5
Si	5	F_5
Total	34	F_9

Table 1 contains the numbers corresponding to the notes in 'Figure 1,' while Table 2 presents the distances between the notes. The red vertical line in 'Figure 1' indicates the end of the first period, with subsequent periods shifting the notes by one digit.

Table 2. Correspondence of Intervals between Notes and Fibonacci Numbers for the First Period, on a Note-by-Note Basis

Note	Distances Between Consecutive Notes	Distances Between Consecutive Notes as Fibonacci Numbers
Do	-	-
Re	3 – 3 – 13	$F_4 - F_4 - F_7$
Mi	3 – 3 – 5 – 5	$F_4 - F_4 - F_5 - F_5$
Fa	3 – 5 – 3 – 3 – 5 – 5 – 0	$F_4 - F_5 - F_4 - F_4 - F_5 - F_5 - F_0$
Sol	3 – 3 – 3 – 3 – 3	$F_4 - F_4 - F_4 - F_4 - F_4$
La	3 – 8 – 3 – 5	$F_4 - F_6 - F_4 - F_5$
Si	8 – 2 – 2 – 2	$F_6 - F_3 - F_3 - F_3$

2.1.4. Third Method

The Golden Ratio, approximately 1,618 (often denoted by the Greek letter phi, ϕ), is an irrational number found throughout nature, art, and mathematics. It's defined when a line is divided into two parts, and the ratio of the whole line to the longer part is equal to the ratio of the longer part to the shorter part. It's often associated with aesthetic appeal and harmonious proportions. The third music was composed by manipulating the Pythagorean Diatonic Scale. In this context, the formula of the Pythagorean Diatonic Scale that is equal to $(\frac{3}{2})^n$ changed with the ϕ^n . As a result, new frequencies were obtained by using the Golden Ratio. The ratios and the frequencies of the scale is given in Table 6 and Table 7.

On the other hand, the methodology used to compose 3 pieces of music was automatized by writing the Python algorithms. The Python algorithms that were used in this paper are given in Code Block 1 and Code Block 2.

In music theory, the following formula is used to compare the frequencies of two notes:

If the first note is denoted as x , and the second note as y ;

$$\text{Distance Between Notes} = 8 \log_2(y - x)$$

The ratios between consecutive notes in both sequences are presented in Table 7, based on the provided formula.

Table 3. Ratios between Consecutive Notes

Ration Notes	Do-Re	Re-Mi	Mi-Fa	Fa-Sol	Sol-La	La-Si	Si-Do
Pythagorean	1,34	1,38	0,58	1,38	1,39	1,31	0,62
Golden Ratio	0,64	0,67	1,14	0,66	0,65	2,45	1,80

Table 4. Frequencies Generated According to the Original Pythagorea

Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do
260 Hz	292 Hz	329 Hz	346 Hz	390 Hz	440 Hz	493 Hz	520 Hz

Based on the provided ratios in Table 3 under the "Golden Ratio" designation, an approximation of the corresponding musical note frequencies can be extrapolated. This derivation assumes that the listed numerical values represent the multiplicative factor between the frequencies of consecutive notes within a musical scale. Utilizing the frequency of Do (260 Hz) from the accompanying frequency table as the initial reference point, the subsequent frequencies are estimated as follows:

- Do: 260 Hz (reference frequency)
- Re: Frequency of Do multiplied by the Do-Re ratio
(260 Hz×0,64=166,4 Hz)
- Mi: Frequency of Re multiplied by the Re-Mi ratio
(166,4 Hz×0,67=111,49 Hz)
- Fa: Frequency of Mi multiplied by the Mi-Fa ratio
(111,49 Hz×1,14=127,10 Hz)
- Sol: Frequency of Fa multiplied by the Fa-Sol ratio
(127,10 Hz×0,66=83,89 Hz)

La: Frequency of Sol multiplied by the Sol-La ratio
(83,89 Hz×0,65=54,53 Hz)

Si: Frequency of La multiplied by the La-Si ratio
(54,53 Hz×2,45=133,59 Hz)

Do (octave): Frequency of Si multiplied by the Si-Do ratio
(133,59 Hz×1,80=240,46 Hz)

Table 5. Frequencies Generated According to the Golden Ratio

Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do
260 Hz	166 Hz	111 Hz	127 Hz	83 Hz	54 Hz	133 Hz	240 Hz

In order to ensure harmony between the frequency values of the notes in the mathematical music to be created, it is not appropriate to change the "3/2" ratio too much. At this point, it is seen that the golden ratio does not disrupt the harmony between the note frequencies due to its numerical value.

2.1.5. Modification of the Pythagorean Diatonic Scale for 12 Notes

This study can be applied to the twelve-tone equal temperament system.The Pythagorean Diatonic Scale plays a crucial role in modern frequency generation, and thus studying the Pythagorean sequence is important. However, there is a lack of exploration regarding redesigning the Pythagorean sequence using the golden ratio. The current method utilizes $(3/2)^n$ as the basis for constructing the Pythagorean sequence and obtaining frequencies. The original ratios and frequencies of the Pythagorean sequence are presented in Tables 6 and 7, respectively

Table 6. Frequencies Generated According to the Golden Ratio

Do	Do#	Re	Re#	Mi	Fa	Fa#	Sol	Sol#	La	La#	Si
1,00	1,05	1,12	1,18	1,25	1,30	1,38	1,46	1,55	1,61	1,71	1,81

Table 7. The Frequencies of the Newly Constructed Pythagorean Scale by Golden Ratio

Do	Do#	Re	Re#	Mi	Fa	Fa#	Sol	Sol#	La	La#	Si
271,9	288,0	304,9	322,9	342,0	356,0	376,9	399,2	422,7	440,0	465,9	493,4

2.2. Conversion of Music into Audio Files

To perform the playback of music compositions created using mathematical structures, software methods were employed. A software was developed using the Music21 library

in Python, resulting in the generation of '.mp3' audio files. The project attachments provide access to these audio files

Studies were carried out under the supervision of Assoc. Prof. Dr. Mustafa Kemal KARAOSMANOĞLU and Prof. Dr. Arda Eden, who are listed in the "Acknowledgements" section, in order to improve the notation of the music and increase its reliability.

2.3. Electroencephalography (EEG) Test Methods and Analysis Techniques

In this study, music was created using mathematical structures. This study aims to analyze the changes in brainwave activity of healthy individuals in response to music composed using mathematical principles. At this point, a systematic analysis of these musical compositions is necessary. To facilitate a systematic analysis, the use of an Electroencephalography (EEG) device was decided upon. It is known by researchers that factors such as the number of volunteers and the duration of listening to music are important for the EEG test method, which has a wide area of use in the health field and is a test method, to provide objective data to the research. Electroencephalography (EEG) tests employed in the study were conducted in the EEG recording room of Erenköy Psychiatry Hospital, following approval from the ethics committee (Decision No: 25, Date: March 31, 2023). The participant group consisted of 12 healthy individuals (8 males, 4 females) aged over 18 years with a minimum of a high school diploma. The study was conducted in the EEG recording room at Erenköy Psychiatric Hospital, with ethical approval obtained from the institution's ethics committee and the EEG Test process have been taken at the Erenköy Psychiatric Hospital.

During the experimental procedure, participants listened to designated musical pieces in a quiet environment while their brainwave activities were recorded using an EEG device. Prior to the music listening session, a 'music-absent' baseline measurement was taken to evaluate the participants' neurological status. The music listening process comprised five distinct phases, with each phase structured into two-minute segments.

In the data analysis phase, delta, gamma, and theta wave activities, with a primary focus on alpha and beta waves, were evaluated in detail. Brain topography maps were generated to visualize the cognitive and emotional effects of the music on the participants. A decrease in beta waves (associated with stress and arousal) and an increase in alpha waves (associated with relaxation and focus) were considered significant indicators for understanding the therapeutic potential of mathematical music.

The objective is to have all the generated music compositions listened to by individuals and, during this process, collect brainwave data through the EEG device. The music compositions are analyzed using the EEG testing method, the brain waves namely alpha and beta waves were essential for this process. The collected data will then be analyzed and interpreted in light of the characteristics of alpha, beta, delta, gamma, and theta waves, as explained in the introduction section. In the data analysis phase, brain topography maps were central. Beta waves, symbolized by red color, implying emotional states such as stress and action, are expected to be transformed into blue regions through the designed mathematical music.

Appendix 1 shows the brain topographical mapping images for all individuals and for all tried hypothesis. The occurred red areas imply a more beta-oriented brain state, while blue areas imply a more alpha-oriented brain state.

At the end of the composing process, the four pieces of music were examined by analyzing the 12 healthy individuals' EEG test results that were made by looking at their Brain Topographical Maps. The participant sample consisted of healthy individuals over the age of 18, including 8 males and 4 females, all with at least a high school diploma. The experimental procedure involved playing pre-designed musical sequences to participants in a fixed order, within an environment free from external noise and stimuli. Prior to the musical presentations, a "music-free recording" was conducted to establish a baseline of brainwave activity. Classical music was played during this baseline phase and served as a control. The playback sequence commenced with the "music-free period," followed by presentations of Fibonacci1, Fibonacci2, sequence-influenced music, golden ratio music, and finally, classical music. Each phase was structured into two-minute segments. The analyses were conducted under the supervision of neurology specialists at the hospital."

3. RESULTS

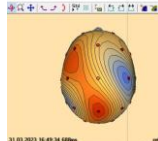
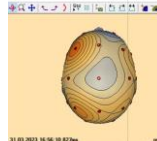
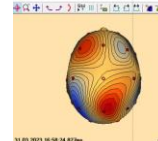
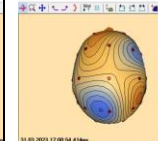
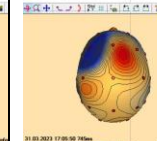
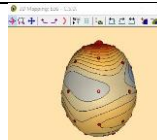
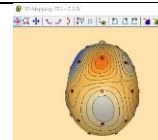
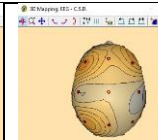
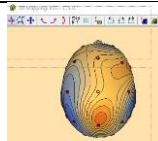
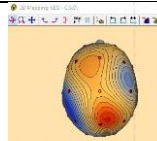
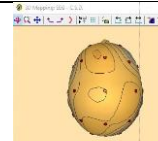
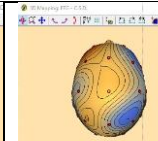
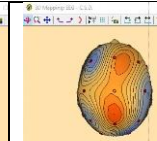
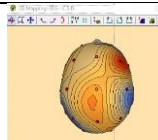
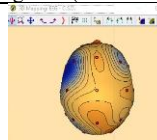
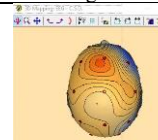
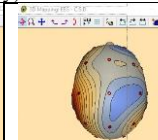
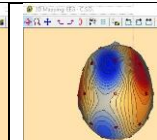
With the given methods, some results thought to be intriguing are found. Table 1 shows the comparisons for the given people (named anonymously) in 4 different categories. The results are given in Table 8 and Table 9.

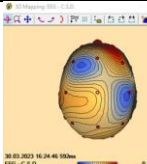
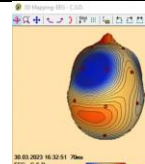
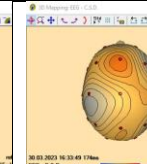
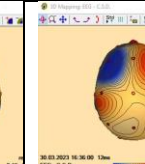
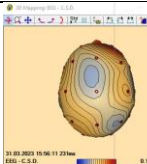
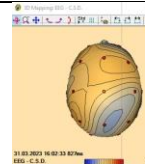
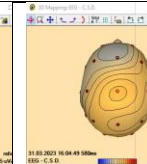
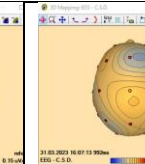
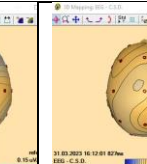
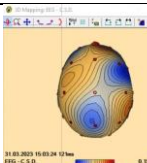
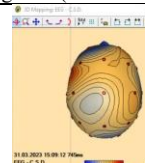
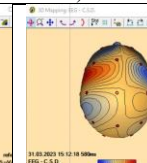
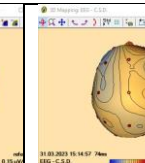
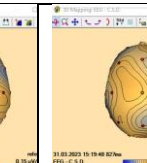
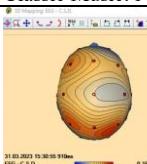
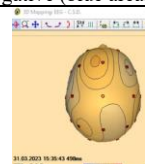
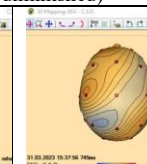
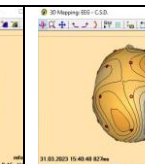
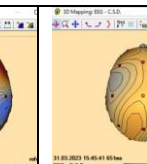
Table 8. EEG Test Result

	Comparison with No-Music State			
Name	Fibonacci 1	Fibonacci 2	Golden R.	Classic
Male 1	+	+	+	+
Male 2	–	+	+/- (Neutral)	–
Male 3	–	+/- (Neutral)	+/- (Neutral)	–
Male 4	+	+/- (Neutral)	–	+/- (Neutral)
Male 5	+	–	+	+/- (Neutral)
Male 6	+/- (Neutral)	+	+/- (Neutral)	Not-Tested
Male 7	+/- (Neutral)	+/- (Neutral)	+	–
Male 8	+	+	+/- (Neutral)	+
Female 1	+	–	–	Not-Tested
Female 2	+/- (Neutral)	+/- (Neutral)	+/- (Neutral)	–
Female 3	–	–	–	–
Female 4	+	+	+	+

Table 9. EEG Test Results by Brain Topographical Maps

	No-Music	Fibonacci 1	Fibonacci 2	Golden Ratio	Classis Music
M 1					
M 1 RE SU LT	Fibonacci 1: Positive (blue area expanded) Fibonacci 2: Positive (blue area expended, red area diminished) Golden Ratio: Positive (red area disappeared) Classic Music: Positive (reddish area stayed the same, although blue area expended)				
M 2					
M 2 RE SU LT	Fibonacci 1: Negative (red area expended) Fibonacci 2: Positive (blue area expended) Golden Ratio: Neutral (no significant change seen) Classic Music: Negative (blueish are declined smoothly, reddish area increased smoothly)				
M 3					
M 3 RE SU LT	Fibonacci 1: Negative (blue areas diminished) Fibonacci 2: Neutral (blue and red areas diminished together) Golden Ratio: Neutral (blue and red areas diminished together) Classic Music: Negative (significant increase in red area is shown)				
M 4					
M 4 RE SU LT	Fibonacci 1: Positive (blue areas increased) Fibonacci 2: Neutral (no significant change reported) Golden Ratio: Negative (red area occurred) Classic Music: Neutral (no significant change reported)				

M 5	    	
M 5 RE SU LT	Fibonacci 1: Positive (red area disappeared) Fibonacci 2: Negative (red area increased significantly) Golden Ratio: Positive (blue are expanded) Classic Music: Neutral (blue are moved to the eye region, where we don't take in our calculations)	
M 6	   	No-Test
M 6 RE SU LT	Fibonacci 1: Neutral (only change is seen in the eye region) Fibonacci 2: Positive (little change in the back and the left side of the head) Golden Ratio: Neutral (no significant change) Classical Music: No test conducted	
M 7	    	
M 7 RE SU LT	Fibonacci 1: Neutral (red and blue areas increased together) Fibonacci 2: Neutral (red and blue areas disappeared together) Golden Ratio: Positive (blue area increased significantly) Classical Music: Negative (red area increased significantly)	
M 8	    	
M 8 RE SU LT	Fibonacci 1: Positive (red are at the back disappeared, some blue regions occurred) Fibonacci 2: Neutral (no significant change seen) Golden Ratio: Positive (blue areas expended very significantly) Classical Music: Positive (blue areas expended very significantly)	

F 1	   	No-Test		
F 1 RE SU LT	Fibonacci 1: Positive (a very significant blue area occurred) Fibonacci 2: Negative (blue areas diminished slightly) Golden Ratio: Negative (red areas appeared) Classic Music: No test conducted			
F 2	    			
F 2 RE SU LT	Fibonacci 1: Neutral (no significant change reported) Fibonacci 2: Neutral (no significant change reported) Golden Ratio: Neutral (no significant change reported) Classic Music: Negative (blue areas diminish)			
F 3	    			
F 3 RE SU LT	Fibonacci 1: Negative (blue areas diminished) Fibonacci 2: Negative (blue areas diminished, while red areas expanded) Golden Ratio: Negative (blue areas diminished) Classic Music: Negative (blue areas diminished)			
F 4	    			
F 4 RE SU LT	Fibonacci 1: Positive (red areas diminished) Fibonacci 2: Positive (red areas diminished, while blue areas expended) Golden Ratio: Positive (blue areas expanded) Classical Music: Positive (blue areas expanded)			

The EEG test results obtained with the given methods reveal several intriguing findings. The analyses summarized in Table 8 and Table 9 highlight the brainwave responses of individuals to different types of music. These responses are discussed below.

Table 10. Distribution of Positive, Neutral, and Negative Responses by Participants and Conditions

Response Type	Fibonacci 1	Fibonacci 2	Golden Ratio	Classic
Positive	Male 1, Male 4, Male 5, Male 8, Female 1, Female 4	Male 1, Male 2, Male 6, Female 4	Male 1, Male 5, Male 7, Female 4	Male 1, Male 8, Female 4
Neutral	Male 6, Male 7, Female 2	Male 3, Male 4, Male 7, Female 2	Male 2, Male 3, Male 6, Male 8, Female 2	Male 4, Male 5,
Negative	Male 2, Male 3, Female 3	Male 5, Female 1, Female 3	Male 4, Female 1, Female 3	Male 2, Male 7, Female 2, Female 3

Table 11. Gender-Based Response Percentages Across Different Music Conditions

Condition	Positive Responses (Male)	Positive Responses (Female)	Neutral Responses (Male)	Neutral Responses (Female)	Negative Responses (Male)	Negative Responses (Female)
Fibonacci 1	50% (4/8)	50% (2/4)	25% (2/8)	25% (1/4)	25% (2/8)	25% (1/4)
Fibonacci 2	50% (4/8)	25% (1/4)	37,5% (3/8)	%25 (1/4)	12,5% (1/8)	50% (2/4)
Golden Ratio	37,5% (3/8)	25% (1/4)	50% (4/8)	25% (1/4)	12,5% (1/8)	50% (2/4)
Classic	28,6% (2/7)	33,3% (1/3)	28,6% (2/7)	33,3% (1/3)	42,9% (3/7)	66,7% (2/3)

Note. In the classical music tests, the test results for Male 6 and Female 1 were not obtaine

4. DISCUSSION

Let's analyze the EEG results in three separate sections: Positive, Neutral, and Negative

4.1. Positive Responses

Fibonacci 1:

Participants: Male 1, Male 4, Male 5, Male 8, Female 1, Female 4

Observation: The positive responses in Fibonacci 1 are distributed across both male and female participants. However, the male participants exhibit a broader range of responses, with Female 1 and Female 4 being the only female participants providing positive feedback in this condition. This suggests that Fibonacci 1 might be perceived more favorably by males in this context.

Fibonacci 2:

Participants: Male 1, Male 6, Male 8, Female 4

Observation: Fibonacci 2 sees a more limited distribution of positive responses, especially when compared to Fibonacci 1. Notably, Female 4 is the only female participant providing a positive response in this condition, which contrasts with the more frequent positive responses from male participants. This might indicate a gender-based difference in how Fibonacci 2 is perceived.

Golden Ratio:

Participants: Male 1, Male 5, Male 7, Female 4

Observation: Golden Ratio yields positive responses predominantly from male participants, with Female 4 being the only female participant providing a positive response. This pattern suggests a stronger tendency for male participants to respond positively to the Golden Ratio condition compared to their female counterparts.

Classic:

Participants: Male 1, Male 8, Female 4

Observation: The distribution of positive responses for Golden Ratio - Classic is similar to the Golden Ratio condition, where only a few participants (Male 1, Male 8, and Female 4) provided positive responses. Again, this suggests that females may have a more restrained reaction in this condition, as only Female 4 provides a positive response.

4.2. Neutral Responses

Fibonacci 1:

Participants: Male 6, Male 7, Female 2

Observation: Neutral responses are relatively evenly distributed across both male and female participants. Female 2 is the only female participant who gives a neutral response in Fibonacci 1, indicating that this condition does not evoke strong positive or negative reactions from the participants.

Fibonacci 2:

Participants: Male 3, Male 4, Male 7, Female 2

Observation: Neutral responses are similarly distributed among male and female participants in Fibonacci 2. This condition shows a relatively balanced response, with Female 2 again showing a neutral stance, which is nearly consistent with the response pattern observed in Fibonacci 1.

Golden Ratio:

Participants: Male 2, Male 3, Male 6, Male 8, Female 2

Observation: The distribution of neutral responses is broader in the Golden Ratio condition, with both male and female participants providing neutral feedback. This suggests that Golden Ratio might be a less polarizing condition than Fibonacci 1 or Fibonacci 2, as it elicits a more mixed set of responses.

Classic:

Participants: Male 4, Male 5

Observation: In the Golden Ratio - Classic condition, neutral responses are overwhelmingly from male participants, with no female participants providing neutral feedback. This indicates a greater tendency for males to respond neutrally in this condition compared to the others.

4.3. Negative Responses

Fibonacci 1:

Participants: Male 2, Male 3, Female 3

Observation: Negative responses in Fibonacci 1 are distributed among both male and female participants, with Female 3 being the only female to provide a negative response in this condition. This could suggest that the Fibonacci 1 condition has a more significant negative impact on certain participants, though the gender distribution is fairly balanced.

Fibonacci 2:

Participants: Male 2, Male 5, Female 3

Observation: Similar to Fibonacci 1, Fibonacci 2 also evokes negative responses from both male and female participants, with Female 3 again being the only female participant to provide a negative response. The higher frequency of male participants giving negative responses could suggest that Fibonacci 2 may be less favorable for male participants compared to the other conditions.

Golden Ratio:

Participants: Male 4, Female 1, Female 3

Observation: The Golden Ratio condition elicits a higher proportion of negative responses from female participants, with both Female 1 and Female 3 giving negative feedback. This could indicate that the Golden Ratio condition is perceived more negatively by female participants compared to male participants, who provided fewer negative responses.

Classic:

Participants: Male 2, Male 7, Female 2, Female 3

Observation: In the Classic condition, both male and female participants provided negative responses. Notably, the inclusion of both female participants (Female 2 and Female 3) in the negative category could indicate that this condition has a particularly strong negative effect on certain individuals, particularly females.

4.4. Overall Observations and Gender-Based Trends**4.4.1. Gender Differences in Responses**

There is a noticeable gender-based trend in the positive responses, with male participants more frequently providing positive feedback across most conditions (Fibonacci 1, Fibonacci 2, and Golden Ratio).

Female participants, on the other hand, tend to provide more neutral and negative responses, especially in the Golden Ratio and Classic conditions.

4.4.2. Condition-Based Trends

Fibonacci 1 and Golden Ratio tend to generate more positive responses overall, but there are significant variations in how male and female participants react to these conditions. Males tend to react more positively, while females show more mixed reactions.

Classic elicits more negative feedback, especially from female participants, suggesting that this condition may be perceived unfavorably by them.

4.4.3. Neutral Responses as a Balanced Stance

The neutral responses generally appear across all conditions but are most common in Golden Ratio and Fibonacci 2, where participants seem to lack a strong preference or opinion. This might indicate that these conditions are not as strongly polarizing as others, such as the Classic.

5. CONCLUSION AND FURTHER RESEARCH

Traditional music systems are rooted in the Pythagorean diatonic scale. To maintain the desired consonance between note frequencies in mathematical music compositions, it is crucial to avoid significant modifications of the "3/2" ratio. In this context, the numerical value of the golden ratio appears to not disrupt the harmony between note frequencies. Considering the proportional relationships between notes in the newly constructed scale and the golden ratio-based musical system, it is posited that this approach does not negatively impact the harmony of the classical system and may even offer certain potential advantages. This proposition suggests new avenues of exploration for researchers in the context of musical harmony and mathematical relationships.

This analysis suggests that participants' gender plays a significant role in their response patterns across different conditions. Male participants appear to have a more favorable response to Fibonacci 1 and Golden Ratio conditions, while female participants tend to show more neutrality or negativity, particularly in the Classic condition.

The analysis reveals several key insights into how different types of music influence brain activity.

5.1. Fibonacci-Based Music

The Fibonacci-based compositions (Fibonacci 1 and Fibonacci 2) generally elicited positive responses in many participants, particularly in the male group. This suggests that music based on mathematical sequences can have a beneficial effect on brainwave activity, potentially enhancing cognitive functions and emotional states.

5.2. Golden Ratio-Based Music

The Golden Ratio compositions showed a mix of positive and neutral responses, with fewer negative reactions compared to other music types. This indicates that the Golden Ratio may create a harmonious effect on the brain, promoting a state of balance and well-being.

5.3. Classical Music

Classical music, used as a control, elicited varied responses. While some participants experienced positive effects, others showed negative or neutral responses. This variability could be due to individual preferences and familiarity with the music.

5.4. Gender Differences

The results indicate potential gender differences in response to music, with males generally showing more positive responses to Fibonacci-based music, while females displayed more variability in their reactions.

5.5. Topographical Changes

The brain topographical maps highlight the specific regions affected by different music types. Positive responses were often associated with increased blue areas, indicating enhanced brain activity and potentially improved cognitive functions.

In conclusion, the findings suggest that mathematical structures in music, such as the Fibonacci sequence and the Golden Ratio, can positively influence brainwave activity. These insights could inform future research on the therapeutic applications of music and its potential benefits for cognitive and emotional health.

Further research could focus on investigating why these gender-based differences occur, possibly exploring psychological or cultural factors that may influence how individuals perceive and respond to the conditions presented. Additionally, examining the underlying reasons for the higher frequency of neutral and negative responses in certain conditions could provide deeper insights into participant preferences and perceptions.

6. SOFTWARE

In this section, the Python code we created while generating music will be provided from music21 import *

```
index = 0
a4 = note.Note('A4')
a4.duration = duration.Duration(0.5)
b4 = note.Note('B4')
b4.duration = duration.Duration(0.5)
c4 = note.Note('C4')
c4.duration = duration.Duration(0.5)
d4 = note.Note('D4')
d4.duration = duration.Duration(0.5)
e4 = note.Note('E4')
e4.duration = duration.Duration(0.5)
f4 = note.Note('F4')
f4.duration = duration.Duration(0.5)
g4 = note.Note('G4')
g4.duration = duration.Duration(0.5)

def add_note(note_letter):
    if note_letter == 'a':
        n = note.Note('A4')
        n.duration = duration.Duration(0.5)
```

```
s.append(n)
elif note_letter == 'b':
    n = note.Note('B4')
    n.duration = duration.Duration(0.5)
    s.append(n)
elif note_letter == 'c':
    n = note.Note('C4')
    n.duration = duration.Duration(0.5)
    s.append(n)
elif note_letter == 'd':
    n = note.Note('D4')
    n.duration = duration.Duration(0.5)
    s.append(n)
elif note_letter == 'e':
    n = note.Note('E4')
    n.duration = duration.Duration(0.5)
    s.append(n)
elif note_letter == 'f':
    n = note.Note('F4')
    n.duration = duration.Duration(0.5)
    s.append(n)
elif note_letter == 'g':
    n = note.Note('G4')
    n.duration = duration.Duration(0.5)
    s.append(n)

s = stream.Stream()
add_note('c')
add_note('d')
add_note('f')
add_note('g')
add_note('a')
add_note('d')
add_note('f')
add_note('g')
add_note('a')
add_note('d')
add_note('e')
add_note('g')
add_note('f')
add_note('b')
add_note('e')
add_note('g')
add_note('f')
add_note('a')
add_note('e')
add_note('g')
add_note('f')
add_note('a')
```



```

add_note('b')
add_note('d')
add_note('e')
add_note('b')
add_note('f')
add_note('a')
add_note('b')
add_note('d')
add_note('e')
add_note('b')
add_note('f')
add_note('f')

for j in range(0, 6):
    for i in s[(34*j):(34*(j+1))]:
        if i == c4:
            a = note.Note('B4')
            a.duration = duration.Duration(0.5)
            s.append(a)
        elif i == d4:
            a = note.Note('C4')
            a.duration = duration.Duration(0.5)
            s.append(a)
        elif i == e4:
            a = note.Note('D4')
            a.duration = duration.Duration(0.5)
            s.append(a)
        elif i == f4:
            a = note.Note('E4')
            a.duration = duration.Duration(0.5)
            s.append(a)
        elif i == g4:
            a = note.Note('F4')
            a.duration = duration.Duration(0.5)
            s.append(a)
        elif i == a4:
            a = note.Note('G4')
            a.duration = duration.Duration(0.5)
            s.append(a)
        elif i == b4:
            a = note.Note('A4')
            a.duration = duration.Duration(0.5)
            s.append(a)

s.show()

```

Code Block 1. Code to Produce the Fibonacci Music 1

from music21 import *

```
fibonacci = [1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1597, 2584,
4181, 6765, 10946, 17711, 28657, 46368, 75025, 121393, 196418, 317811, 514229,
832040, 1346269, 2178309, 3524578, 5702887, 9227465, 14930352, 24157817,
39088169, 63245986, 102334155, 165580141, 267914296, 433494437, 701408733,
1134903170, 1836311903, 2971215073, 4807526976, 7778742049, 12586269025,
20365011074, 32951280099, 53316291173, 86267571272, 139583862445,
225851433717, 365435296162, 591286729879, 956722026041, 1548008755920,
2504730781961, 4052739537881, 6557470319842, 10610209857723,
17167680177565, 27777890035288, 44945570212853, 72723460248141,
117669030460994, 190392490709135, 308061521170129, 498454011879264,
806515533049393, 1304969544928657, 2111485077978050, 3416454622906707,
5527939700884757, 8944394323791464, 14472334024676220,
23416728348467684, 37889062373143904, 61305790721611584,
99194853094755488, 160500643816367072, 259695496911122560,
420196140727489664, 679891637638612224, 1100087778366101888,
1779979416004713984, 2880067194370816000, 4660046610375530496,
7540113804746346496, 12200160415121876992, 19740274219868225536,
31940434634990100480, 51680708854858326016, 83621143489848426496,
135301852344706760704, 218922995834555203584, 354224848179261997056]
remainders = []
```

```
for i in fibonacci:
    remainders.append(i % 7)
```

```
s = stream.Stream()
def write_letter(n):
    if (n == 0):
        a = note.Note('C4')
        a.duration = duration.Duration(0.5)
        s.append(a)
    elif (n == 1):
        a = note.Note('D4')
        a.duration = duration.Duration(0.25)
        s.append(a)
    elif (n == 2):
        a = note.Note('E4')
        a.duration = duration.Duration(0.5)
        s.append(a)
    elif (n == 3):
        s.append(note.Note("F4"))
    elif (n == 4):
        s.append(note.Note("G4"))
    elif (n == 5):
        a = note.Note('A4')
        a.duration = duration.Duration(0.5)
        s.append(a)
    elif (n == 6):
```

```

a = note.Note("B4")
a.duration = duration.Duration(0.25)
s.append(a)

for i in remainders:
    write_letter(i)

s.show()

```

Code Block 2. Code to Produce the Fibonacci Music 2

Authors' Contribution

The authors confirm that they equally contributed to this paper. In this study, the 1st and 2nd authors contributed to the conception, mathematical modeling, data collection, analysis, interpretation, and literature review. The 3rd and 4th authors contributed to the preparation of music files, EEG tests, and the writing of the manuscript.

Acknowledgements

Throughout the process of this article, great support and assistance were taken. We would first like to thank Dr. Muharrem BAYRAK for his assistance in this project by ensuring communication with academicians and providing proper funding. Furthermore, his feedback was important for the persistence of our project. We would like to acknowledge Assoc. Prof. Dr. Mustafa Kemal KARAOSMANOĞLU and Prof. Dr. Arda EDEN for their great contribution to composing the music, which was composed by using the frequencies determined by the Golden Ratio, and the Fibonacci Sequence. Also for their great support before, during, and after the EEG testing process we would like to thank to Prof. Dr. Saime Füsün Domaç, Assoc. Prof. Dr. Onur Durmaz and Dr. Hande Alibaş.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest

Statement of Research and Publication Ethics

Research and publication ethics were observed in the study

Ethics Committee Approval Statement

The Ethical Committee Approval (Decision No: 25, Date: 31.03.2023) and the EEG Test process have been taken at the Erenköy Psychiatric Hospital.

REFERENCES

- Canyakan, S. (2020). Müziğe Verilen Duygusal Tepkide Zaman-Mekân Etkenleri. Afyon Kocatepe Üniversitesi Akademik Müzik Araştırmaları Dergisi, 6(11), 23-54.

- Cassidy, J. W. & Standley, J. M. (1995). The effect of music listening on physiological responses of premature infants in the NICU, *Journal of Music Therapy*, 32(4), 208-227.
- Gena, P. & Strom, C. (1995). Musical synthesis of DNA sequences, *XI Colloquio di Informatica Musicale*, 203-204.
- Koudelková, Z. & Strmiska, M. (2018). Introduction to the identification of brain waves based on their frequency, In *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences.
- Lindley, M., & Orgies, I. (2006). Bach-style keyboard tuning. *Early Music*, 34(4), 613-624.
- Medicalpark, (2024). EEG nedir? Retrieved May 1, 2025 from <https://www.medicalpark.com.tr/eeg-nedir/hg-61>.
- Mutver, S. (2017). The golden ratio in music [Master's Thesis], İstanbul University, Institute of Social Sciences, İstanbul.
- Nyhoff, B., Aarskog, A. I., & Holm, S. (2024). Geometric Construction of Pythagorean and Just Musical Scales and Commas. *The Mathematical Intelligencer*, 46(1), 25-31.
- Okay, H. H. & Ece, A. S. (2019). Psikoloji Araştırmalarında Duygu Tanımlanması için Kullanılan Müzik Eserleri ve Özellikleri, *Akademik Bakış Uluslararası Hakemli Sosyal Bilimler Dergisi*, (75), 1-12.
- Panti, C. (2020). The Reception of Greek Music Theory in the Middle Ages: Boethius and the Portraits of Ancient Musicians, *A Companion to Ancient Greek and Roman Music*, 447-460.
- Plato, (2006). Devlet, *Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları*.
- Siddharthan, R. (1999). Music, mathematics, and Bach: 2. Patterns in Bach's music. *Resonance*, 4(5), 61-70.
- Spitzer, M. (2009) Emotions and Musical Analysis After Meyer, Retrieved May 1, 2025 from <http://www.unige.ch/emotionalpowerofmusic/conference/Spitzer.doc>.
- Sufie, S. N. M., & Sidik, R. (2017). What is medical music therapy in Islamic civilization? *International Journal of Business and Social Science*, 8(3), 195-199.
- Teplan, M. (2002). Fundamentals of EEG measurement. *Measurement science review*, 2(2), 1-11.
- Yılmaz, B. & Can, Ü. K., (2019). Türkiye’de müzik terapi uygulamalarında kullanılan müzikler, *OPUS International Journal of Society Researches*, 13(19), 592-620.



DESIGN OF PASSIVE HARMONIC FILTER FOR THE CLAW-POLE SYNCHRONOUS GENERATORS UNDER NON-LINEAR LOADING*

PENÇE-KUTUPLU SENKRON GENERATÖRLER İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN YÜKLEME ALTINDA PASİF HARMONİK FİLTRE TASARIMI

Yusuf TOPRAK¹

Oktay KARAKAYA²

Şevket CANTÜRK³

Murat Erhan BALCI⁴

<https://doi.org/10.55071/ticaretfb.1600837>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)

karakaya@balikesir.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)

13.12.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)

21.03.2025

Accepted
(Kabul Tarihi)

25.03.2025

Abstract

In this study, firstly, the harmonic distortions of terminal voltage and current of a three-phase 1,5 kVA, 150V, 50 Hz, and four poles permanent magnet excited Claw Pole Synchronous Generator (CPSG) supplying a 6-pulse rectifier load are simulated using its 3D Finite Element Model (FEM) in Ansys Maxwell software environment. Then, various low-pass passive filters are designed with a practical approach to reduce the terminal voltage and winding current harmonics in the analysis system. Finally, the terminal voltage and current harmonic distortions, losses, torque oscillations, and efficiency of the modelled CPSG are evaluated when the designed filter is connected to the system. According to the numerical results obtained, the best-performing filter among the designed ones is determined. It is also concluded that with the help of this best-performing filter, the terminal voltage harmonic distortion, losses, torque oscillations, and efficiency of the CPSG are considerably improved.

Keywords: Claw pole synchronous generator, low-pass passive filter, nonlinear load, filter design.

Öz

Bu çalışmada, ilk olarak, 1,5 kVA, 150V, 50 Hz, dört kutuplu, kalıcı mıknatıs ile uyarılmış Pençe Kutuplu Senkron Generatörün (PKSG), 6 darbeli doğrultucu yükü beslerken terminal gerilimi ve akımındaki harmonik bozulmalarının 3 Boyutlu Sonlu Elemanlar Modeli (SEM) kullanılarak Ansys Maxwell yazılım ortamında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, analiz sistemindeki terminal gerilimi ve sargı akımı harmoniklerini azaltmak için pratik bir yaklaşımla çeşitli alçak geçiren pasif filtreler tasarlanmıştır. Son olarak, tasarlanan filtrelerin sisteme bağlanması durumunda, modellenen PKSG'nin terminal gerilimi ve akım harmonik bozulmaları, kayıpları, tork dalgalanması ve verimi değerlendirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlardan, tasarlanan filtreler arasında en iyi performansa sahip olan belirlenmiştir. Ayrıca, bu en iyi performansa sahip filtre yardımıyla PKSG'nin terminal gerilim harmonik bozulması, kayıpları, tork dalgalanması ve veriminin dikkate değer ölçüde iyileştirildiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pençe kutuplu senkron generatör, alçak geçişli pasif filtre, doğrusal olmayan yük, filtre tasarımı.

*This publication was produced from the graduate Master thesis of Yusuf TOPRAK in the Electrical-Electronics Engineering Program of Balıkesir University, Institute of Science.

¹ Balıkesir University, Department of Electrical-Electronics Engineering, Balıkesir, Türkiye.
y.toprak@outlook.com.tr.

² Balıkesir University, Bigadic Vocational School, Balıkesir, Türkiye.
karakaya@balikesir.edu.tr.

³ Balıkesir University, Sindirgi Vocational School, Balıkesir, Türkiye.
scanturk@balikesir.edu.tr.

⁴ Balıkesir University, Department of Electrical-Electronics Engineering, Balıkesir, Türkiye.
mbalci@balikesir.edu.tr.

1. INTRODUCTION

The Claw Pole Synchronous Generator (CPSG), also called as the Lundell-type generator, is a three-phase alternating current (AC) machine with a diode rectifier (Lequesne, 2015). It is popular in internal combustion vehicles (Lequesne, 2015; Omri et al., 2018a; Whaley et al., 2004). In the recent literature, they are also considered for small-scale wind turbines (Artal-Sevil et al., 2018; Phyo & Aung, 2014). According to the excitation method, CPSGs have three types: electrically excited (Whaley et al., 2004), permanent magnet excited (Jurca, 2016), and hybrid excited (excitation with both winding and permanent magnets) (Omri et al., 2018a). The rotor constructions of these three types are given in Figure 1. As seen from this figure, the rotor of the CPSG is fabricated by interlocking two iron pieces with claw-shaped protrusions.

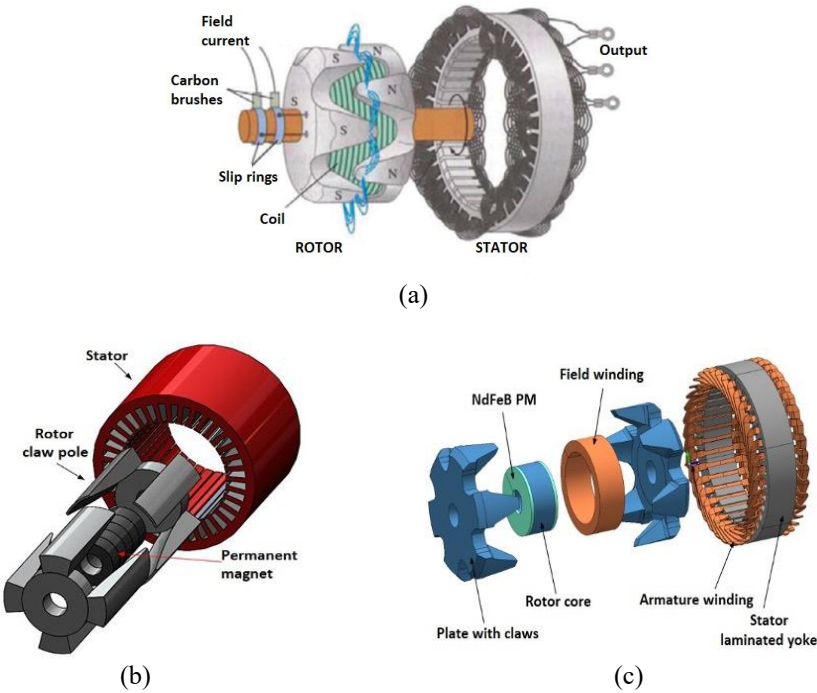


Figure 1. (a) Electrically Excited (Whaley et al., 2004), (b) Permanent Magnet Excited (Jurca, 2016), and (c) Hybrid Excited CPSG (Omri et al., 2018a)

There are several studies in the literature on the performance analysis of CPSGs (Jurca et al., 2006; Jurca et al., 2019; Omri et al., 2018; Pillai et al., 2006; Tan-Kim et al., 2014; Tan-Kim et al., 2017; Wu & Zuo, 2018; Yang et al., 2015; Ye et al., 2018). They are generally conducted with the three-dimensional finite element method (3D FEM) (Jurca et al., 2008; Jurca et al., 2019) and magnetic equivalent circuit (Cao et al., 2022; Ye et al., 2018) based simulations, and measurements (Tan-Kim et al., 2014).

The analysis studies mainly focused on the noise and vibration performances of the machine (Tan-Kim et al., 2014; Tan-Kim et al., 2017; Wu & Zuo, 2018; Yang et al.,

2015). The effects of the design parameters (Wu & Zuo, 2018; Yang et al., 2015), production processes (Tan-Kim et al., 2017), and thermal conditions (Tan-Kim et al., 2014) on the electromagnetic vibration and acoustic noise were investigated. In addition to these studies, Balcı conducted a comparative analysis of the permanent magnet CPSG in terms of efficiency for cores made of various magnetic materials (Balcı, 2024).

Furthermore, some studies aimed to maximize the output torque and efficiency of these machines while minimizing their torque fluctuations, acoustic noise, and losses (Bao & Liu, 2012; Cao et al., 2022; Shuguang et al., 2019; Zhang et al., 2016). Additionally, some works proposed new CPSG designs regarding the geometry and construction material of the rotor (Geng et al., 2020; Hagstedt et al., 2012; Li et al., 2022; Omri et al., 2018a; Zhao et al., 2018).

In another part of the literature on the CPSGs, it was shown in (Jurca et al., 2019) and (Jurca et al., 2008) that the air gap has a significantly distorted waveform of magnetic flux density in the machine. Due to this, they have considerably distorted terminal voltages under no-load and loading conditions (Omri et al. 2018b; Pillai et al., 2006; Ye et al., 2018). In the study (Toprak et al. 2023), the voltage harmonic distortion and losses of the permanent magnet CPSG were analyzed under different loading levels of the uncontrolled six-pulse rectifier load. They also investigated the same performance quantities for various values of the circuit parameters (snubber capacitor and choke inductor) of the same load. It was concluded that both the loading level and circuit parameters considerably affect the performance of the CPSG.

The power electronic circuits draw the distorted currents and result in harmonic distortion of the voltages in the system. Thus, they cause a significant increase in winding losses. The increased winding loss leads to overheating of the windings and reduces the lifespan of electrical machines (Cantürk et al., 2024; Fuchs & Masoum, 2011; Singh, 2009). Harmonic distortion also causes torque vibrations in rotating electrical machinery (Donolo et al., 2016). It is well known in the literature that harmonic filters are employed to avoid the detrimental effects of harmonic distortion on power system equipment. However, according to the best knowledge of the authors, there is no study on the application of harmonic filters to mitigate the harmonic distortion of terminal voltages and currents of the CPSG under nonlinear loading conditions (Toprak, 2023; Toprak et al., 2024).

In this study, firstly, the terminal voltage and winding current harmonic distortions of a three-phase 1,5 kVA, 150 V, 50 Hz, four-pole, permanent magnet (PM) excited CPSG supplying a 6-pulse rectifier are simulated using a three-dimensional (3D) Finite Element (FE) Model in the Ansys Maxwell software environment (ANSYS Innovation Courses, 2020; Rosu et al., 2017). Then, various low-pass passive filters are designed with a practical approach to reduce the terminal voltage and winding current harmonics in the analysis system. Finally, the terminal voltage and current harmonic distortions, losses, torque oscillations, and efficiency of the modelled CPSG are evaluated when the designed filters are connected to the system, and the best-performing filter among the designed ones is determined.

This study is produced from the M.Sc. of the first author (Toprak, 2023), and it is partly presented in the abstract paper for the 3rd International Conference on Applied Mathematics in Engineering (Toprak et al., 2024).

2. HARMONIC ANALYSIS OF THE PM EXCITED CPSG SUPPLYING SIX-PULSE RECTIFIER LOAD

In this section, the 3D FE modelling of the 3-phase 4-pole PM excited CPSG with rated values of 1,5 kVA, 150 V, 1500 rpm and 50 Hz, which is considered for the analyses, is introduced in Ansys Maxwell software environment (ANSYS Innovation Courses, 2020; Rosu et al., 2017). In addition to that, for its analysis under the loading conditions, the equivalent circuit of the considered CPSG is provided using Circuit Editor module of Ansys Maxwell. Lastly, a six-pulse uncontrolled rectifier circuit accompanied by a pure resistor and smoothing capacitor at its DC side is modelled as the load of the CPSG in the Simplorer environment.

2.1. Modelling of the Simulated CPSG in Maxwell 3D

The studied CPSG is a modified version of the model that existed in the library of the Ansys Maxwell. It is modified by using RMxpert module of the Ansys Maxwell. And then, it is transferred to the 3D FEM module of the software. Note that due to the asymmetrical rotor structure of the CPSG, its FE analysis can be achieved with 3D modelling. Detailed views of the 3D model of the studied CPSG are shown in Figure 2 (Toprak et al., 2023; Toprak et al., 2024).

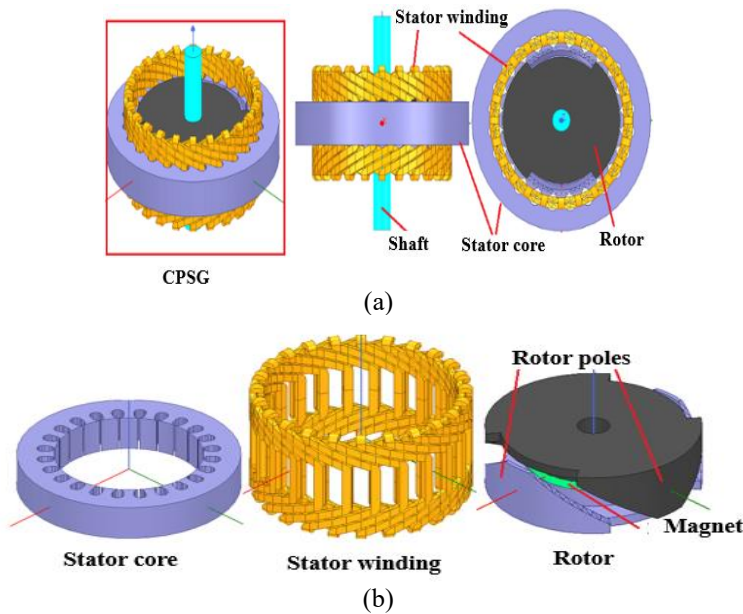


Figure 2. (a) Complete View of the 3D Model From Different Perspectives and (b) Stator Core, Stator Winding, and Rotor Views of the Model Separately.

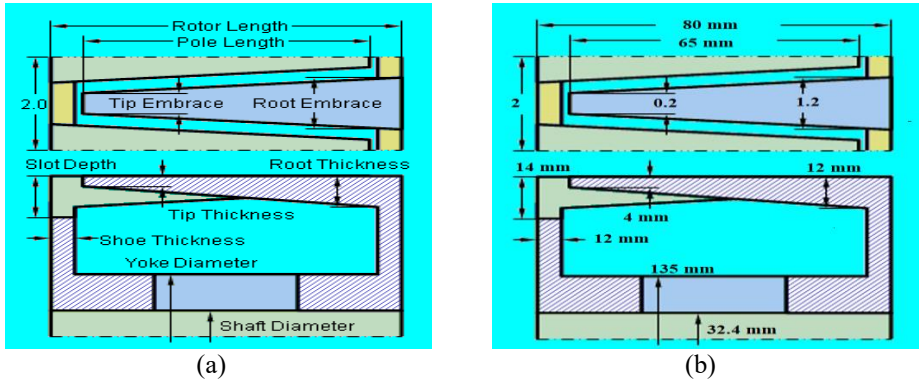


Figure 3. (a) Rotor Pole Parameters and (b) Their Sizes.

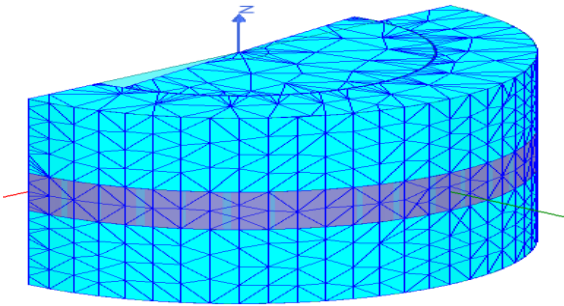


Figure 4. The 3D Mesh View of the Modelled CPSG.

It is seen from Figure 2 that the modelled machine has four poles and PM excitation, and its stator contains 24 slots. The type of PMs, rotor core material, and stator core material are selected as XG196/96, 1008 steel, and JFE Steel 35JN360, respectively. The inner/outer diameters and length of the stator are 216 mm, 324 mm, and 65 mm, respectively. The diameter and length of the rotor are 212,76 mm and 80 mm, respectively. Other rotor pole parameters and their sizes are detailed in Figure 3. The 3D mesh view of the modelled CPSG is given in Figure 4. The number of the mesh elements is automatically set to 90037 by Ansys Maxwell. Here, it should also be noted that to reduce the analysis time, only half of the machine geometry is simulated.

2.2. Creation of the Equivalent Circuit in Maxwell Circuit Editor

For the filter design study, the equivalent circuit of the CPSG modeled in Ansys Maxwell 3D is provided by the Maxwell Circuit Editor environment. The provided equivalent circuit is shown in Figure 5. In this circuit, voltmeters and ammeters are placed to measure the generator's terminal phase voltages, terminal line voltages, and terminal currents. In the circuit given in Figure 5, there is no load. In other words, the generator is operating under no-load conditions. Under no-load conditions, the magnitudes of the terminal voltage harmonic components, per the magnitude of the fundamental harmonic, are presented in Figure 6. In this figure, the blue, green, and red lines represent the harmonic components for the three phases line voltages. It can be

mentioned from the harmonic spectrum that the line voltages have significant harmonic distortion, and their dominant harmonic components are the 7th, 13th, 19th, 21st, and 39th harmonics.

In addition to that, for the analysis, the total harmonic distortion (THD_V) and RMS (V_L) values of the terminal line voltages are calculated using Equation (1) and (2) (Toprak, 2023):

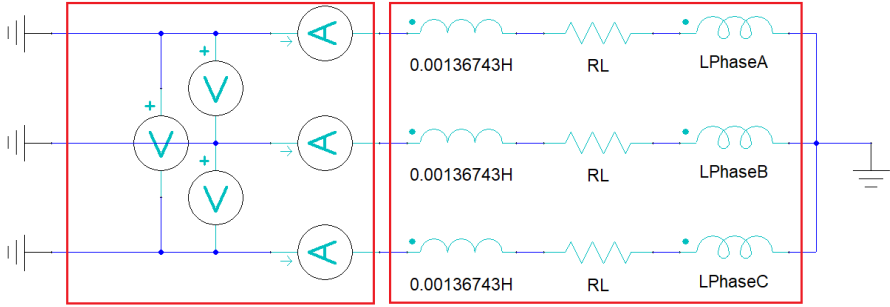
$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (1)$$

$$V_L = \sqrt{\sum_{h \geq 1} V_h^2} \quad (2)$$

where V_1 and V_h denote the fundamental and non-fundamental harmonic voltages.

Accordingly, for the no-load operation of the modelled CPSG, V_L and THD_V are approximately found as 186 V and 14%.

Terminal of the CPSG (output)



Equivalent circuit of CPSG

Figure 5. The Equivalent Circuit of the CPSG in Maxwell Circuit Editor Environment.

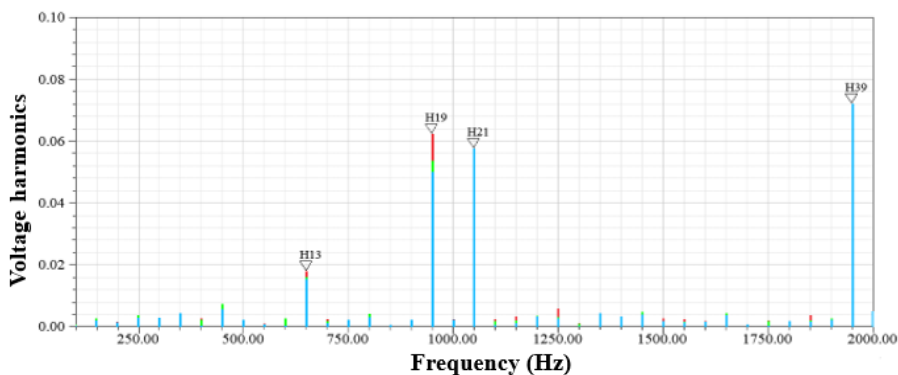


Figure 6. Harmonic Spectrum of the Terminal Line Voltages of the CPSG Under No-Load Condition.

2.3. Modelling of Six-pulse Rectifier Load

For the analysis, a six-pulse uncontrolled rectifier circuit accompanied by a pure resistor and smoothing capacitor at its DC side is considered as a load of the CPSG in this study. Accordingly, the rectifier load is modelled in Ansys Maxwell Circuit Editor. The equivalent circuit model of the CPSG supplying the rectifier load is completely given in Figure 7. In the circuit, R_d and C_d values are selected as 5Ω and $125\mu\text{F}$, respectively. For these two-circuit parameter, the loading ratio of the CPSG is nearly 100%, and the relative ripple of the rectifier's DC output voltage is 4,3%.

To evaluate the performance parameters of the CPSG such as harmonic distortion of terminal voltage and current and losses, firstly, the system without the filter is simulated. Due to this, there is no filter in the system shown in Figure 7. The total harmonic distortion (THD_I) of the terminal current is calculated using the non-fundamental (I_h) and fundamental harmonics effective values as follows (Toprak, 2023):

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2} I_h^2}}{I_1} 100 \quad (3)$$

In addition to that, by means of the machine loss calculation tools, the core and winding losses are found. In the Ansys Maxwell, for a frequency (f), the total core loss is calculated regarding maximum magnetic flux density ($B_{\max}$), Hysteresis coefficient (K_H), classic eddy current coefficient (K_c), and additional loss coefficient (K_e) (ANSYS Innovation Courses, 2020; Tikhonova et al., 2017).

$$P_C = K_H B_{\max}^2 f + K_c B_{\max}^2 f^2 + K_e B_{\max}^{1,5} f^{1,5} \quad (4)$$

Since the rotor is excited by the permanent magnets, the winding losses consist of only stator winding losses (P_W) for the modelled CPSG. P_W can be found using current density (J) and electrical conductivity of windings (Tikhonova et al., 2017):

$$P_W = \frac{1}{\sigma} \iiint J^2 dV \quad (5)$$

Accordingly, the sum of P_W and P_C gives the total loss (P_T) of the CPSG:

$$P_T = P_C + P_W \quad (6)$$

By neglecting the windage and frictional losses, the efficiency of the CPSG is approximately computed as the ratio of output power and input power:

$$\eta(\%) = 100 \frac{P}{P_T + P} \quad (7)$$

Where P is the active power at the terminal, and it is calculated by averaging of sum of the instantaneous powers drawn from a, b and c phases for a period (T) (Balci, 2009):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) dt \quad (8)$$

Last performance parameter is the relative value of the torque oscillation that is calculated as follows:

$$\Delta T = 100 \frac{(T_{max} - T_{min})}{T_{av}} \quad (9)$$

Where T_{max} , T_{min} , and T_{av} stand for maximum, minimum, and average values of the shaft torque, and all are calculated by using Ansys Maxwell tool.

Thus, for the modelled six-pulse rectifier without a passive filter, the V_L and THD_V of the terminal line voltages and the THD_I values of the line currents drawn by the rectifier are given in Table 1. It can be mentioned from this table that the average values of the respected quantities are 131,46 V, 27,86%, and 4,99%. Thus, one can see that THD_V and THD_I have considerable values that may lead to an increase in both core and winding losses, and overheating in the machine. Note that for the same case, the losses (P_C , P_W , P_T) and the torque oscillation (ΔT) values of the CPSG are calculated as 21,73 W, 78,40 W, 100,13 W, and 21,23%, respectively.

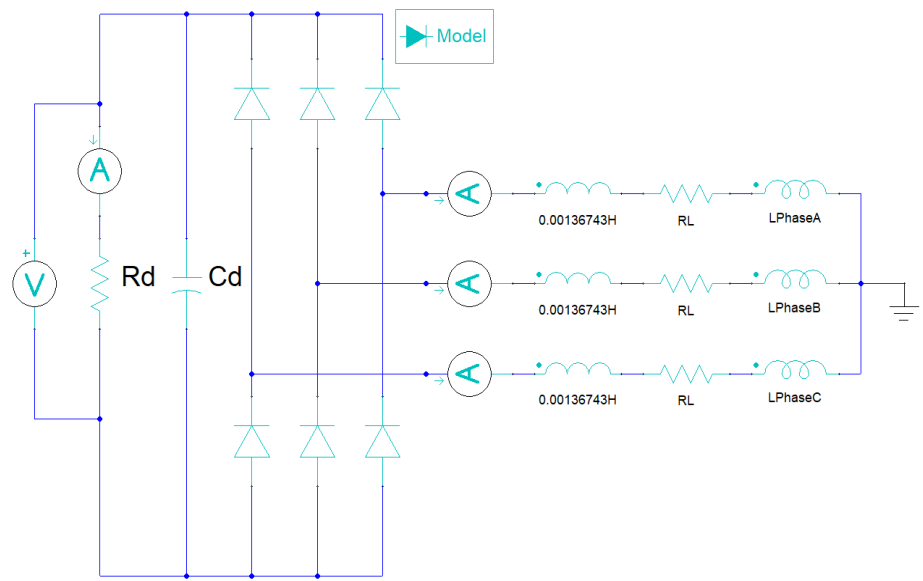


Figure 7. The Equivalent Circuit Model of the CPSG Supplying the Rectifier Load in Ansys Maxwell Circuit Editor Environment.

Table 1. V_L , THD_V , and THD_I Values at the Terminal of CPSG Supplying the Six-Pulse Rectifier Without a Passive Filter.

	V_L (V)	THD_V (%)	THD_I (%)
L1	130,92	29,02	4,58
L2	130,90	27,60	5,93
L3	132,56	26,97	4,45
Average	131,46	27,86	4,99

3. DESIGN OF PASSIVE HARMONIC FILTER

In this section, to mitigate harmonic distortion of the terminal voltage and current, and reduce the losses and the torque oscillation of the CPSG under nonlinear loading, it is aimed to design a passive filter.

For the harmonic mitigation in the electric power networks, several tuned passive filter types are employed in the literature (Fuchs, 2011; Karadeniz & Balci, 2018). However, in this study, to effectively filter a large number of harmonic components in a wide frequency range in the terminal voltage and current, the low-pass LC filter is preferred instead of tuned filters. The single-phase circuit of the low-pass filter is given in Figure 8.

The resonance frequency of the filter can be written in terms of L_f and C_f as follows (Adak, 2021; Zubi, 2005c).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (10)$$

The delta-connected three-phase filter, which is illustrated in Figure 9, is employed in the analysis system. Therefore, regarding Equation 11, the resonance frequency of the delta connected filter can be written:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f 3C_{f\Delta}}} \quad (11)$$

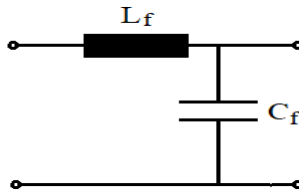


Figure 8. The Single-Phase Circuit of the Low-Pass Filter.

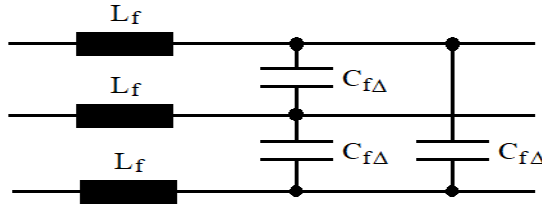


Figure 9. The Delta-Connected Three-Phase Circuit of the Low-Pass Filter.

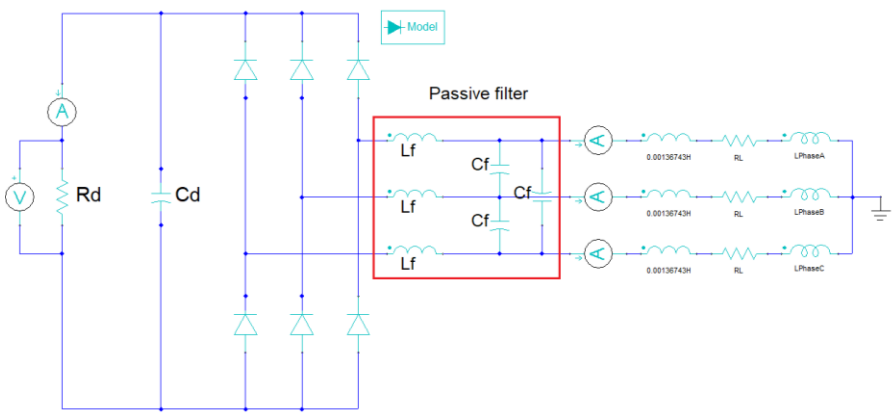


Figure 10. The Circuit of the System With The Low-Pass Passive Filter Provided in Ansys Maxwell Circuit Editor.

The circuit of the system with the low-pass passive filter provided in Ansys Maxwell Circuit Editor is given in Figure 10.

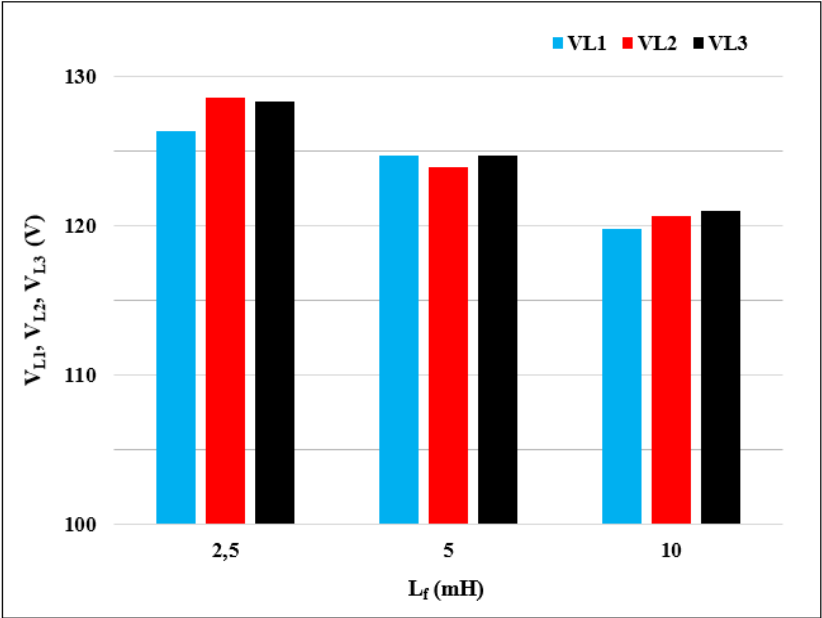
Since the performance parameters of the CPSG is obtained by 3D FE analysis, optimization of the filter parameters is a highly time-consuming process. Due to this, in this study, the proper values of the filter parameters are practically achieved by generating possible solutions in the feasible region. The considered approach has three stages:

- First stage: Analyse the effect of the filter inductor (L_f) on the performance parameters of the CPSG, and choose a feasible value for the inductor accordingly. In this step, only the inductors of the filter exist in the circuit, while its capacitors are disconnected from the circuit.
- Second stage: Determine resonance frequency (f_r) according to the lowest harmonic order in the system and find the filter's capacitor (C_{fd}) using Eq. 11.
- Last stage: Test the system with the filter, and evaluate the losses, loading level, torque oscillation, terminal voltage distortion, and terminal current distortion of the CPSG.

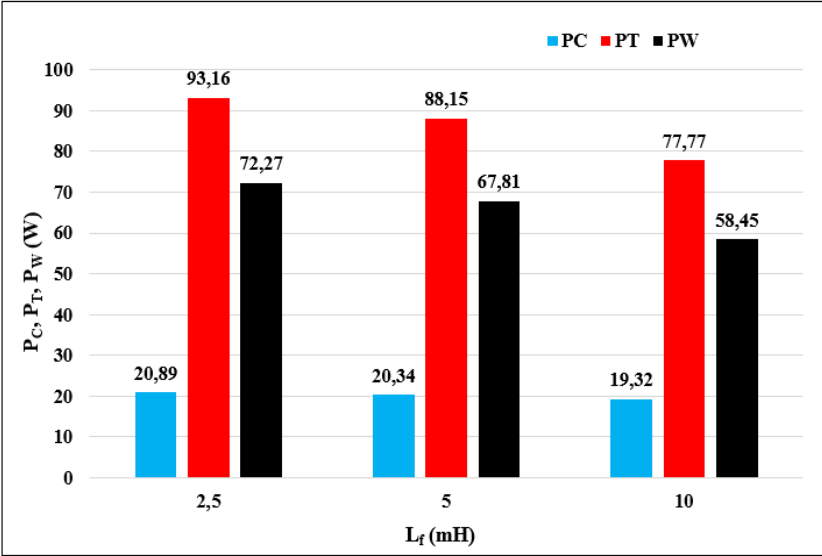
3.1. Determination of the Filter's Inductance (L_f)

Here, it is aimed to determine the feasible value of the filter's inductor. To achieve this, the effect of the inductor on the performance parameters of the CPSG is evaluated. Accordingly, for the filter's inductance values (L_f) as 2,5 mH, 5 mH, and 10 mH, the system is simulated. The results are given in Figure 11 and Figure 12.

It is observed from Figure 11 that the average V_L levels for L_f values as 2,5 mH, 5 mH, and 10 mH are 128,63 V, 123,83 V, and 120,71 V, respectively. Thus, it can be mentioned that the effective value of terminal voltages decreases as L_f increases. The same figure also shows that for L_f values of 2,5 mH, 5 mH, and 10 mH, P_T is 93,16, 88,15, and 77,77 W, respectively. For the same inductance values, P_C is 20,89, 20,34, and 19,32 W, while P_W is 72,27, 67,81, and 58,45 W, respectively. As a result, losses decrease with the increment of L_f . In addition to these results, Figure 12 indicates that the average values of THD_I and THD_V are 4,82% and 28,68% for $L_f=2,5$ mH, 4,55% and 24,34% for $L_f=5$ mH, and 4,37% and 21,66% for $L_f=10$ mH. Therefore, one can see that an increase in L_f value improves THD_V and THD_I . Lastly, it can be concluded from the analysis that the tested two L_f values 5 mH and 10 mH cause considerable reduction in THD_V and THD_I . Due to this case, in the second stage, they will be considered for the filter design.

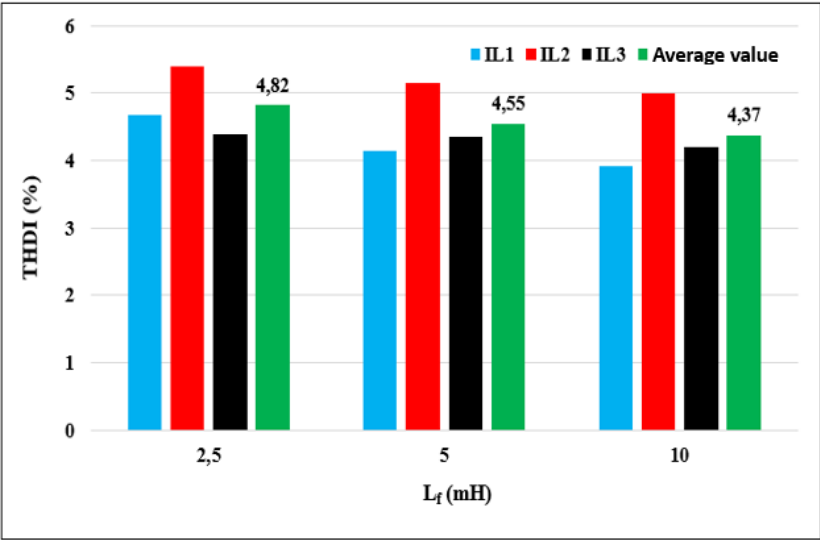


(a)

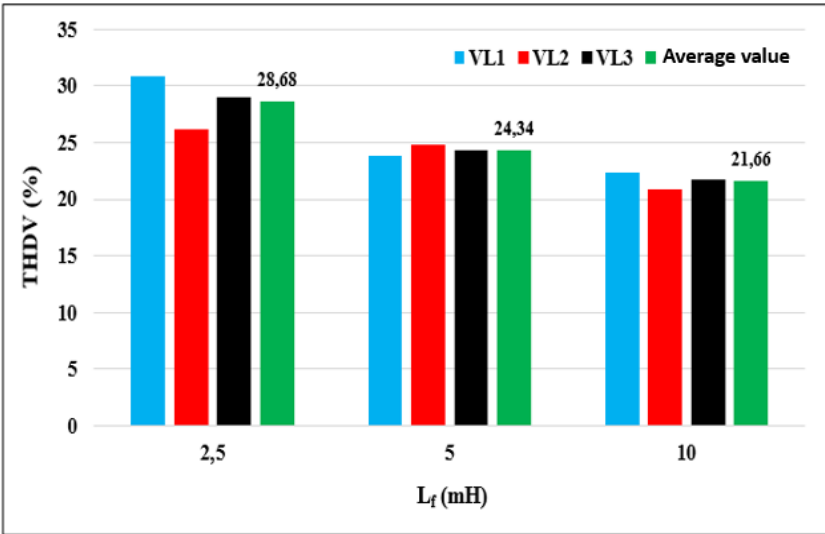


(b)

Figure 11. (a) The RMS Terminal Voltages and (b) Losses of the CPSG For Three L_f Values.



(a)



(b)

Figure 12. (a) THDV and (b) THDI Values for Three L_f Values.

3.2. Determination of the Resonance Frequency (f_r) and Filter’s Capacitors (C_{fA})

It is seen from Figure 6 that the lowest order harmonic of the no-load terminal voltages of the CPSG is the 3rd one. In addition to that, it is well-known from the literature that six-pulse rectifiers draw currents that contain odd-numbered, non-triplen harmonics such as the 5th, 7th, 11th, etc. Accordingly, to reduce the harmonic distortion of terminal voltage and current, the resonance frequency of the filter (f_r) is set to 145 Hz (slightly below the 3rd harmonic) and 205 Hz (below the 5th harmonic).

Regarding two filter inductor values (5 mH and 10 mH) and two resonance frequency values (145 Hz and 205 Hz), four filter choices can be provided as in Table 2.

In the last stage, the performance parameters of the CPSG supplying the six-pulse rectifier will be evaluated for these four filter designs, and the best one will be selected.

Table 2. The Parameters of Determined Four Filter Designs.

	L_f	$C_{f\Delta}$	f_r
Design 1	5mH	81 μ F	145 Hz
Design 2		41,2 μ F	205 Hz
Design 3	10 mH	40,5 μ F	145 Hz
Design 4		20,6 μ F	205 Hz

3.3. Evaluation of the Performance Parameters of the CPSG for the Designed Filters

The performance parameters of the CPSG supplying six-pulse rectifier load compensated with the determined four filter designs are presented in Table 3.

Table 3. Obtained Results for the Determined Four Filter Designs.

	Design-1	Design-2	Design-3	Design-4	No filter
P (W)	2283,42	1774,23	1505,72	1305,62	1531
V_L (V)	152,56	135,52	137,44	126,98	131,46
THD_V (%)	7,44	15,24	9,46	22,53	27,86
THD_I (%)	3,62	4,30	4,12	5,22	4,99
P_T (W)	157,55	116,08	85,94	82,83	100,13
ΔT (%)	12,63	17,09	11,09	25,79	21,23
Efficiency-η (%)	93,54	93,85	94,60	94,03	93,87

This table shows that designs 1 and 3 significantly reduce THD_V and THD_I values. THD_V and THD_I values are 7,44% and 3,62% for design 1, and 9,46% and 4,12% for design 3. Among these two designs, design 1 results in overloading, and it provides lower efficiency (η) in CPSG when compared to the other one.

Besides, for the six-pulse rectifier load compensated with the design 3 filter, the P, V_L, THD_V, THD_I, P_T, ΔT and η of the CPSG are 1505,72 W, 137,44 V, 9,46%, 4,12%, 85,94 W, 11,09 and 94,60%. Therefore, it can be mentioned that design 3 filter can properly be used for harmonic mitigation of the CPSG supplying the six-pulse rectifier under its rated loadig level.

For the system with design 3 filter, the magnitudes of the voltage and current harmonics at the terminal in terms of fundamental ones are plotted in Figure 13.

This figure clearly shows that the filter does not cause any resonance problem in the system.

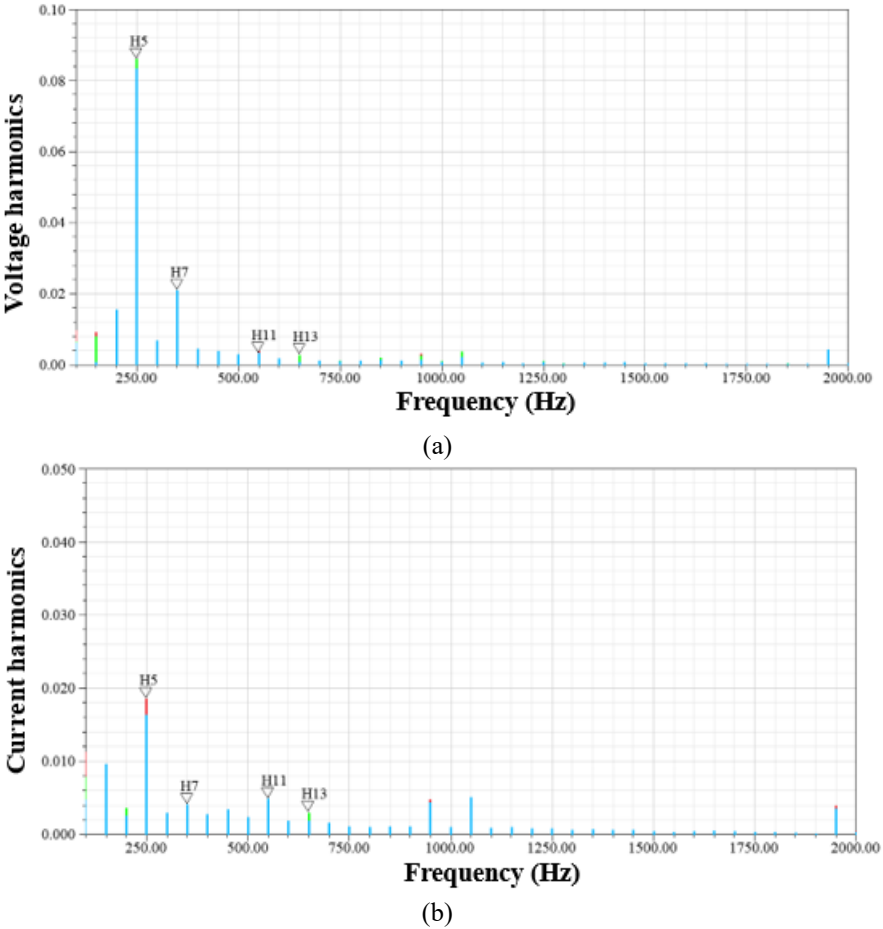


Figure 13. The Magnitudes of Voltage and Current Harmonics at the Terminal in Terms of Fundamental Ones for the System With Design 3 Filter.

4. CONCLUSION

The harmonic currents and voltages have detrimental effects on the rotational electric machines such as increased losses, overheating, and torque oscillations. Due to these effects, they may have reduced life span. To prevent the reduction in the life span of the rotational machines operated in the distorted systems, the harmonic filters can be employed.

In internal combustion vehicles, claw pole synchronous generators (CPSGs) are employed to supply the electric loads and charge batteries. The ac energy at the terminals of the CPSGs is converted to the DC energy by means of the rectifiers. Thus, these generators are operated under highly distorted load currents. In addition to that, due to the geometry of their rotors, their no-load voltages have considerable harmonic distortion.

In this study, which was partly presented ICAME'24 conference (Toprak et al., 2024), it is aimed to design a passive harmonic filter for the harmonic mitigation of the permanent magnet CPSGs devoted to supplying the six-pulse rectifier loads. For this aim, firstly, the 3D FEM model of a CPSG is provided in Ansys Maxwell environment. Secondly, using Ansys Maxwell circuit editor, a six-pulse rectifier circuit is modelled as a load of the CPSG. And then, in a practical way, several low-pass passive filters are designed to reduce the harmonic pollution of the terminal voltages and currents in the analysis system consisting of the CPSG and six-pulse rectifier load. Finally, the designed filters are tested, and the best one is determined by evaluating the efficiency (η), total losses (PT), relative torque oscillation (ΔT), terminal voltage total harmonic distortion (THD_V), and terminal current total harmonic distortion (THD_I) of the studied CPSG. As a result, it is concluded that low-pass filters can properly be used to avoid the negative effects of the harmonic distortion on the CPSG.

This study investigated the performance of the CPSG for a six-pulse uncontrolled rectifier load. Additionally, only a low-pass filter was used to mitigate the harmonic distortion in the terminal voltage and current. Due to the 3D analysis of the CPSG, systematic optimization would require a significant amount of time. Thus, a systematic algorithm was not employed to design the passive filter in this study.

In future studies, the authors plan to perform a comparative performance analysis of the low-pass harmonic filter with other filter types for several nonlinear loading conditions of CPSGs. They will also try to propose a computationally efficient method for optimization of the filter within Ansys Maxwell environment.

Authors' Contributions

In this study, the first and second authors conducted the modelling and simulation of the system, all authors contributed to writing of the article and analysing of the results, and the fourth author defined and directed the study's focus.

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest among the authors.

Statement of Research and Publication Ethics

Research and publication ethics were followed in the study.

REFERENCES

- Adak, S. (2021). Harmonics mitigation of stand-alone photovoltaic system using LC passive filter. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16(5), 2389-2396.
- ANSYS. (2020). Ansys Maxwell Getting Started Module 1: Basics. ANSYS Innovation Courses. Retrieved July 10, 2021, from https://www.courses.ansys.com/wpcontent/uploads/2021/07/MAXW_GS_2020R2_EN_LE01.pdf.

- Artal-Sevil, J. S., Dufo, R., Astaneh, M., Domínguez, J. A., & Bernal-Aguatín, J. L. (2018). Development of a small wind turbine for stand-alone system in rural environment. Reuse and recycling of electric motors. *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, 1(16), 745-750.
- Balcı, S. (2024). Pençe-Kutuplu Senkron Generatörlerde Yeni Nesil Çekirdek Malzemelerin Kullanımıyla Performans Artışı. *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 5(2), 20-38.
- Balci, M. E., & Hocaoglu, M. H. (2009, November). Comparative review of multi-phase apparent power definitions. In *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009*, 1-144. IEEE.
- Bao, X. H., & Liu, M. Z. (2012). Parameter analysis and optimal design for mobile Claw-pole alternator. *Applied Mechanics and Materials*, 130, 658-661.
- Cao, Y., Zhu, S., Yu, J., & Liu, C. (2022). Optimization design and performance evaluation of a hybrid excitation claw pole machine. *Processes*, 10(3), 541.
- Cantürk, Ş., Karakaya, O., Balci, M. E., & Aleem, S. H. A. (2024). Introductory chapter: effects of power quality problems on energy efficiency of power systems. *Energy Efficiency of Modern Power and Energy Systems* (pp. 1-17). Elsevier.
- Donolo, P., Bossio, G., De Angelo, C., García, G., & Donolo, M. (2016). Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. *Electric power systems research*, 140, 866-873.
- Fuchs, E. F., & Masoum, M. A. (2011). *Power quality in power systems and electrical machines*. Academic press.
- Geng, H., Zhang, X., Zhang, Y., Hu, W., Lei, Y., Xu, X., ... & Shi, L. (2020). Development of brushless claw Pole electrical excitation and combined permanent magnet hybrid excitation generator for vehicles. *Energies*, 13(18), 4723.
- Hagstedt, D., Reinap, A., Ottosson, J., & Alaküla, M. (2012, September). Design and experimental evaluation of a compact hybrid excitation claw-pole rotor. In *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*. (pp. 2896-2901).
- Jurca, F. N. (2016, July). Design of a low-cost permanent synchronous machine for isolated wind conversion systems. In *Wind Turbines-Des., Control and Appl.* 95-120. IntechOpen.
- Jurca, F., Martis, C., & Biro, K. (2009, June). Comparative analysis of the claw-pole rotor dimensions influence on the performances of a claw-pole generator for wind applications. In *2009 International Conference on Clean Electrical Power*. (pp. 715-720).

- Jurca, F., Martis, C., Birou, I., & Biro, K. (2008, May). Analysis of permanent magnet claw-pole synchronous machine. In *2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*. (pp. 75-80).
- Karadeniz, A., & Balci, M. E. (2018). Comparative evaluation of common passive filter types regarding maximization of transformer's loading capability under non-sinusoidal conditions. *Electric Power Systems Research*, 158, 324-334.
- Lequesne, B. (2015). Automotive electrification: The nonhybrid story. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1(1), 40-53.
- Li, B., Li, X., Wang, S., Liu, R., Wang, Y., & Lin, Z. (2022). Analysis and cogging torque minimization of a novel flux reversal claw pole machine with soft magnetic composite cores. *Energies*, 15(4), 1285.
- Omri, R., Ibala, A., & Masmoudi, A. (2018, April). 3D-FEA based-comparison of different topologies of claw-pole alternators with a dual excitation. In *2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. 1-6.
- Omri, R., Ibala, A., & Masmoudi, A. (2018, April). Characterization on the no-and on-load operations of an improved claw pole machine. In *2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. (pp. 1-8).
- Phyo, S. P., & Aung, T. H. (2014). Wind turbine generation system implemented with a claw pole alternator. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 3(16), 3411-3416.
- Pillai, K. P. P., Idiculla, M. K., & Nair, A. S. (2006). Spectral study on the voltage waveform of claw pole automotive alternator. *European Council for Modeling and Simulation*, 456-461.
- Rosu, M., Zhou, P., Lin, D., Ionel, D. M., Popescu, M., Blaabjerg, F., ... & Staton, D. (2017). *Multiphysics simulation by design for electrical machines, power electronics and drives*. John Wiley & Sons.
- Shuguang, Z., Xiaorui, H., Yaodan, Z., & Shuanglong, W. (2019). Rotor shape optimization of claw-pole alternator to reduce acoustic noise caused by electromagnetic forces. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(4), 2118-2125.
- Singh, G. K. (2009). Power system harmonics research: a survey. *European Transactions on Electrical Power*, 19(2), 151-172.
- Tan-Kim, A., Hagen, N., Lanfranchi, V., Clénet, S., Coorevits, T., Mipo, J. C., ... & Palleschi, F. (2017). Influence of the manufacturing process of a claw-pole alternator on its stator shape and acoustic noise. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(5), 4389-4395.

- Tan-Kim, A., Lanfranchi, V., Legranger, J., Palleschi, F., & Redon, M. (2014, September). Influence of temperature on the vibro-acoustic behavior of claw-pole alternators. *In 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. (pp. 1628-1634).
- Tikhonova, O., Malygin, I., Beraya, R., Sokolov, N., & Plastun, A. (2017). Loss calculation of induction motor with ring windings by “ANSYS Maxwell”. *APEET*, 2017, 63-66.
- Toprak, Y., Karakaya, O., Cantürk, Ş., & Balcı, M. E. (2023, December). Analysis on Performance of Claw Pole Synchronous Generators for 6-Pulse Rectifier Load. *4th International Turkish World Engineering and Science Congress*, (pp. 361–371).
- Toprak, Y. (2023). *Performance analysis of claw pole synchronous generator under non-linear loading conditions* [Master's thesis]. Balıkesir University.
- Toprak, Y., Karakaya, O., Canturk, S., & Balci, M. E. (2024, July). Design of Passive Harmonic Filter for the Claw-Pole Synchronous Generators under Non-linear Loading. *The Third International Conference on Applied Mathematics in Engineering (ICAMΣ'24)*. (pp. 113).
- Whaley, D. M., Soong, W. L., & Ertugrul, N. (2004, September). Extracting more power from the Lundell car alternator. *In Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004)*. 26-29.
- Wu, S., & Zuo, S. (2018). Characteristics analysis of electromagnetic force and noise of claw pole alternators with different pole and slot combinations and phase number. *IET Electric Power Applications*, 12(9), 1357-1364.
- Yang, F., Bao, X., Di, C., & Chen, Z. (2015, October). Simulation and experiment on reducing electromagnetic vibration and noise of claw-pole alternators. *In 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. (pp. 1452-1458).
- Ye, C., Liang, X., Xiong, F., Yang, J., Xu, W., & Liu, Y. (2018). Design of an axial-flux PM-assisted claw-pole generator based on an equivalent magnetic circuit model. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(4), 2040-2049.
- Zhang, Z., Liu, H., & Song, T. (2016). Optimization design and performance analysis of a PM brushless rotor claw pole motor with FEM. *Machines*, 4(3), 15.
- Zhao, X., Niu, S., & Ching, T. W. (2018). Design and analysis of a new brushless electrically excited claw-pole generator for hybrid electric vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(11), 1-5.
- Zubi, H. (2005). *Lowpass broadband harmonic filter design* [Master's thesis]. Middle East Technical University.



Research Article / Araştırma Makalesi

DEVELOPMENT OF AN EMBEDDED SYSTEM-BASED COLD CATHODE VACUUM MEASUREMENT SYSTEM FOR (ULTRA HIGH VACUUM) UHV APPLICATIONS

ULTRA YÜKSEK VAKUM UYGULAMALARI İÇİN GÖMÜLÜ SİSTEM TABANLI SOĞUK KATOT VAKUM ÖLÇÜM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Tarık ÜNLER¹

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1699770>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
tunler@erbakan.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
15.05.2025

Revised
(Revizyon Tarihi)
22.05.2025

Accepted
(Kabul Tarihi)
03.06.2025

Abstract

Vacuum measurements are widely utilized in numerous critical applications including defense industries, aerospace technologies, composite material manufacturing, and various industrial processes. The key performance parameters in vacuum systems include measurement range, accuracy, and operational lifetime of the sensing elements. This study presents a comprehensive investigation of an Inverted Magnetron (IMT) cold cathode vacuum measurement sensor, which offers distinct advantages over conventional hot cathode systems, including an extended measurement range, prolonged operational lifetime, and user-friendly operation. The IMT cathode configuration demonstrates superior performance in low-pressure regimes (below 10^{-3} Torr) by optimizing electron trajectories through magnetic field confinement, thereby achieving high ionization efficiency. To optimize sensor performance, a high-stability digital electronic readout system was designed and implemented. Experimental characterization was conducted using a turbo-molecular vacuum pump, with measurement results successfully demonstrating the system's capability to accurately measure vacuum levels down to $9,9 \times 10^{-8}$ Torr. These findings validate the IMT cathode design's exceptional stability and wide dynamic range in ultra-high vacuum applications. The developed flexible electronic system enables high-precision digital measurement and control of vacuum systems. This research contributes to the development of an economical, long-lifetime vacuum measurement system capable of stable operation at low-pressure regimes, based on IMT cathode technology.

Keywords: Vacuum measurement, cold cathode ionization sensor, electronic design, low pressure measurement.

Öz

Vakum ölçümleri, savunma sanayisi, uzay teknolojileri, kompozit malzeme üretimi ve endüstriyel uygulamalar gibi birçok kritik alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Vakum sistemlerinde performansı belirleyen temel parametreler arasında ölçüm aralığının genişliği, ölçüm hassasiyeti ve sensör kullanım ömrü yer almaktadır. Bu çalışmada, sıcak katot sistemlere kıyasla daha geniş ölçüm aralığı, uzun kullanım ömrü ve kullanım kolaylığı sunan Inverted Magnetron (IMT) soğuk katot vakum ölçüm sensörü detaylı bir şekilde incelenmiştir. IMT katot yapısı, düşük basınçlarda (10^{-3} Torr altı) manyetik alan etkisiyle elektron hareketini optimize ederek yüksek iyonizasyon verimliliği sağlamasıyla öne çıkmaktadır. Sensörün performansını optimize etmek amacıyla, dijital okuma yapabilen yüksek kararlılığa sahip bir elektronik sistem tasarlanmış ve turbo moleküler vakum pompası ile deneysel karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, IMT katot soğuk katot sensör ile $9,9 \times 10^{-8}$ Torr seviyesine kadar olan vakum değerleri başarıyla ölçülmüştür. Bu sonuçlar, IMT katot tasarımının düşük basınç uygulamalarında bulunduğu stabilite ve geniş dinamik aralığın bir göstergesidir. Tasarlanan esnek elektronik sistem sayesinde, vakum sistemlerinde yüksek hassasiyetle dijital ölçüm ve kontrol imkânı sağlanmıştır. Bu çalışma, IMT katot teknolojisini temel alan ekonomik, uzun ömürlü ve düşük basınç seviyelerinde kararlı ölçüm yapabilen bir vakum ölçüm sisteminin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Vakum ölçümü, soğuk katot iyonizasyon sensörü, elektronik tasarım, düşük basınç ölçümü.

¹ Necmettin Erbakan University, Faculty of Aviation and Space Sciences, Department of Avionics, Konya, Türkiye.
tunler@erbakan.edu.tr

1. INTRODUCTION

Vacuum measurement technology plays a vital role across a wide range of industrial and scientific fields, serving as an essential tool for achieving and maintaining controlled environments required for specific processes. In the semiconductor industry, vacuum systems are indispensable for procedures such as thin-film deposition and etching, where precise pressure control is critical to ensuring the desired quality of semiconductor components (Li et al., 2021). Similarly, in the food and beverage industry, vacuum technology is employed to extend product shelf life and preserve quality during packaging and processing, with accurate pressure measurement being crucial for these applications (Hubbard et al., 2021). Vacuum measurement also plays a critical role in space research, where vacuum chambers are used to simulate extraterrestrial conditions, thereby ensuring the reliability of experiments and the performance of materials intended for outer space applications (Li et al., 2021). Moreover, in space programs, vacuum measurement technology is essential for enhancing the performance of satellites and spacecraft (Chen et al., 2023). In the pharmaceutical industry, vacuum environments are essential for sterile manufacturing processes, where maintaining precise pressure levels is vital for production control and operational safety (Hubbard et al., 2021). Furthermore, vacuum technology supports material characterization studies, allowing researchers to investigate the physical and chemical properties of materials under controlled conditions, thereby improving the accuracy of experimental outcomes (Fu, 2024; Zhou et al., 2014). Recent advancements such as cold atom vacuum metrology have significantly enhanced measurement accuracy, enabling highly sensitive pressure readings in the range of 10^{-4} to 10^{-10} Pa (Fu, 2024). These developments reflect the continuous evolution of vacuum measurement technologies to meet growing demands for precision and reliability in various applications. This study reviews the utilization of vacuum measurement technologies in key industrial and scientific domains and analyzes the measurement methodologies employed, highlighting their contributions to technological and process advancements. The effectiveness of vacuum systems largely depends on the precision and reliability of the measurement methods used. Among these, Pirani gauges, which operate based on thermal conductivity principles, provide accurate readings in low to medium vacuum ranges (Wei et al., 2019; Song, 2024). Thermocouple gauges are often preferred in high-temperature environments due to their robust performance under extreme conditions (Wei et al., 2019). For ultra-high vacuum (UHV) conditions, ionization gauges offer exceptional precision by utilizing gas molecule ionization (Fu, 2024; Li et al., 2021). Capacitance manometers, which determine pressure through changes in the capacitance of a sensor, are favored for their accuracy in low-pressure scenarios (Shirhatti et al., 2020; Wei et al., 2019). In recent years, novel techniques such as cold atom technology have been introduced for vacuum measurement, providing the capability for highly sensitive measurements in extremely low-pressure environments (Li et al., 2021). Additionally, graphene-based sensors have gained attention for their high sensitivity and rapid response times (Shirhatti et al., 2020; Zhu et al., 2019). Advanced technologies such as microelectromechanical systems (MEMS) offer compact and highly sensitive solutions for vacuum measurement applications (Song, 2024; Takashima & Kimura, 2008). Pirani gauges function based on the principle of wire heating, where the temperature of the wire changes according to the pressure of the surrounding gas, allowing for accurate pressure measurements in low-pressure ranges (Song, 2024; Takashima & Kimura, 2008). MEMS-based Pirani

sensors are particularly notable for their smaller size and enhanced sensitivity (Chen et al., 2023; Xiao et al., 2010). Cold cathode gauges operate on the principle of gas ionization through electrical current and are preferred in high vacuum applications for their high measurement accuracy (Fu, 2024; Takashima & Kimura, 2008). Hot cathode gauges measure ions generated by electron interactions with gas molecules, offering high precision but requiring high operating temperatures and currents, which makes the system more complex (Fu, 2024; Li et al., 2021). Capacitance sensors are widely used in industry for pressure, flow, and level measurements, offering advantages such as high accuracy and low power consumption (Shirhatti et al., 2019; Lee et al., 2006). They are also effectively utilized in vacuum measurement applications (Teotia, 2023). In vacuum measurement, both cold and hot cathode technologies present distinct advantages and disadvantages that are critical for various scientific and engineering applications. Understanding these differences is important for selecting the appropriate technology based on specific measurement requirements. Cold cathode gauges, especially those incorporating materials such as carbon nanotubes (CNTs), offer several advantages over hot cathode devices. Their ability to emit electrons without preheating results in lower power consumption and operational simplicity. These features enable fast response times and miniaturization, making them suitable for field emission displays (FEDs) and other microelectronic devices (Shao et al., 2018; Chen et al., 2021; Chen, 2023). Moreover, due to their lower sensitivity to environmental conditions, cold cathodes exhibit enhanced stability and reliability across various operating environments (Shimawaki et al., 2010; Yamaguchi et al., 2003). They are capable of achieving high brightness and uniform electron emission across large areas, making them especially advantageous for applications requiring consistent performance over wide surfaces (Shimawaki et al., 2010; Yamaguchi et al., 2003). The chemical inertness of materials such as graphene and CNTs reduces vulnerability to performance degradation from residual gas adsorption, thereby contributing to improved long-term stability (Shao et al., 2018; Zhang et al., 2021). Additionally, the “cold” nature of their operation minimizes outgassing, offering significant benefits for UHV and extreme high vacuum (XHV) measurements (Shimawaki et al., 2010; Yamaguchi et al., 2003). However, cold cathode gauges also present certain limitations. A notable drawback is their sensitivity to outgassing, which can lead to performance degradation over time. Research indicates that outgassing increases with emission current density, potentially compromising the accuracy of vacuum measurements (Yamaguchi et al., 2003). Although cold cathodes are highly effective under UHV conditions, they may not perform as well as hot cathodes in low vacuum ranges (Cui et al., 2011; Yang et al., 2008). Hot cathode devices, such as thermionic emission ionization gauges, represent a well-established technology for measuring pressures from low to ultra-high vacuum. They offer high measurement precision, particularly in pressures below 10^{-1} Pa, due to their robust electron emission capabilities (Wang & Yu, 2015). The thermionic emission process allows hot cathodes to generate a substantial number of electrons, which enhances sensitivity under low-pressure conditions. The long-standing use and well-developed infrastructure around hot cathodes make them a reliable choice for many traditional applications (Wang & Yu, 2015). Their effectiveness across a broader vacuum range, particularly in low vacuum environments, further reinforces their reliability (Wang & Yu, 2015; Krishnan & Cahay, 2003). Nonetheless, hot cathodes also exhibit some disadvantages. Their high-temperature requirements lead to increased power consumption and longer warm-up periods, posing limitations for applications requiring rapid response times (Shao et al., 2018). Thermal operation may result in

filament degradation and contamination due to outgassing, which can compromise measurement accuracy over time (Wang & Yu, 2015). Thermal noise and operational instability may also present concerns, especially in precision measurement contexts (Wang & Yu, 2015).

In conclusion, the choice between cold and hot cathode vacuum measurement technologies depends on the specific application requirements, including desired pressure range, response time, power consumption, and environmental stability. While cold cathodes offer advantages in terms of efficiency and miniaturization, hot cathodes provide robustness and reliability for low-pressure measurements. In this study, an Inverted Magnetron (IMT) cold cathode vacuum measurement sensor was selected due to its superior performance characteristics, such as extended operational lifetime, wide measurement range, and cost-effectiveness compared to conventional hot cathode systems. Leveraging the advantages of IMT technology—particularly its high ionization efficiency in low-pressure regimes a vacuum measurement system capable of operating down to 10^{-8} Torr was developed. The sensor features an analog output, and a high-stability digital readout circuit was specifically designed and implemented to enhance measurement precision. Experimental measurements were carried out using a turbo-molecular pump supported by an auxiliary pump, confirming the system's effectiveness in ultra-high vacuum applications. The results validate the IMT cathode's suitability for long-term, accurate measurements in advanced vacuum

2. MATERIAL AND METHOD

In this study, a cold cathode vacuum sensor was integrated with a custom-designed electronic circuit to enable accurate measurement and digital display of vacuum levels down to 10^{-10} Torr. To generate the required vacuum environment, the experimental setup was constructed using one Edwards backing pump and one Pfeiffer turbo molecular pump, connected via sealed clamps, gaskets, and flexible metal hoses to ensure vacuum-tight integrity. The developed system allowed real-time monitoring of ultra-high vacuum conditions, demonstrating the sensor's capability to operate reliably within extremely low-pressure ranges. This setup validates both the effectiveness of the cold cathode sensor and the stability of the electronic readout system for high precision vacuum applications.

2.1. System Components and Instrumentation

In this study, the Inverted Magnetron Transducer (IMT) used is the MKS 903, a compact cold cathode vacuum sensor equipped with an integrated electronic module. This sensor operates based on cold cathode ionization principles to measure vacuum pressure. It is available with four standard vacuum interface options: KF 25, KF 40, 2 $\frac{3}{4}$ " CF (rotatable), and 1" tube; the KF 25 interface was selected for the present study. The primary function of the IMT sensor is pressure measurement, specifically designed for applications requiring measurements in the pressure range of 3×10^{-10} to 5×10^{-3} Torr. It features fast response time and a wide dynamic measurement range. Pressure readings are obtained through a linear voltage output ranging from 1,5 to 8,7 V (DC). Compared to hot cathode sensors, cold cathode sensors such as the IMT offer several advantages: absence of a consumable filament, immunity to convective air currents,

resistance to vibration-induced damage, elimination of x-ray limit issues at low pressures, no need for emission current adjustment, and reusability of the sensor tube after cleaning. The inverted magnetron geometry used in the IMT enhances measurement repeatability by providing a more consistent conductivity-pressure curve and ensures stable discharge operation without the risk of extinction at low pressures. The sensor is factory-calibrated for air/nitrogen. When used with other gases, the output corresponds to an equivalent nitrogen pressure; thus, correction factors or additional calibration are required for accurate measurement. This gas dependency also makes the sensor suitable for leak detection applications. The IMT sensor is designed for maintenance-free operation under normal conditions. However, contamination of the sensor tube may result in unstable or inaccurate readings. Prolonged operation at pressures above 10^{-3} Torr can accelerate contamination. Nevertheless, the sensor can be restored by cleaning the internal components and reused. Figures 1(a) and 1(b) show the sensor unit and the corresponding pin diagram, respectively.

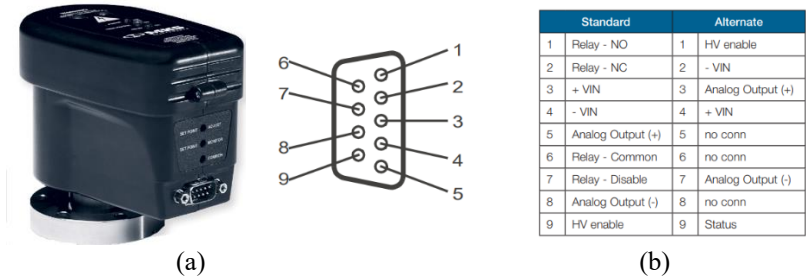


Figure 1. MKS 903 sensor (a) and Pinout (b)

As illustrated in Figure 1(b), pins 2 and 3 of the sensor were utilized to provide the required power supply. According to the sensor’s technical documentation, the operating voltage range for the power supply is specified as 14–30 V (DC), with a maximum power consumption of 3 W. For the analog output signal, pins 3 and 7 were used. Additionally, pin 1 was employed to enable the High Voltage (HV) supply of the sensor, ensuring proper measurement initiation. An RS232 connector was employed to interface both the power supply and analog signal connections. To process the analog voltage signal from the sensor, an Arduino Nano microcontroller was used. The measured pressure values were displayed in real time using a 2-line, 16-character alphanumeric display unit. This configuration allowed for a compact, low-cost, and effective monitoring solution for vacuum measurements. The Arduino Nano and display unit utilized in the system are shown in Figure 2.

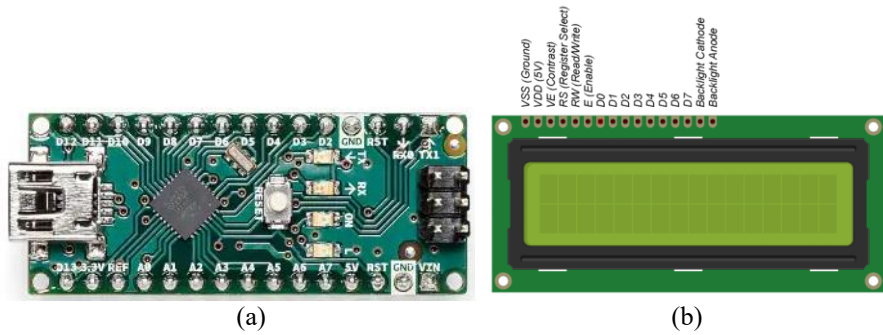


Figure 2. Arduino Nano (a) 2-line 16-character Display (b)

Since the sensor provides an analog voltage output in the range of 0–10 V, it was necessary to adapt this voltage level to be compatible with the input range of the Arduino Nano, which operates at a maximum input voltage of 5 V on its analog pins. To achieve this, a simple resistive voltage divider circuit was implemented, effectively scaling down the sensor output to a level suitable for safe and accurate analog-to-digital conversion by the microcontroller.

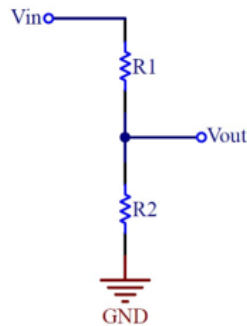


Figure 3. Voltage Divider Circuit

Figure 3 illustrates the voltage divider circuit used in the system for voltage matching. In this configuration, V_{in} represents the input voltage, which is the sensor's output voltage. The V_{out} is the voltage that is fed to the analog input pin of the Arduino Nano, which will be used for the pressure measurement. The output voltage V_{out} can be calculated as shown in Equation 1.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \tag{1}$$

When the values of R_1 and R_2 are calculated using the equation, it is observed that in order to reduce a 10V input to 5V, the resistance values of R_1 and R_2 must be equal. Accordingly, considering the current value, the resistors are chosen to be 1k Ω . In order to achieve low vacuum levels (down to 10⁻⁸ Torr), a Pfeiffer Vacuum TMH 071P turbomolecular vacuum pump and an Edwards back pump were used in the system. The Edwards back pump has a vacuum capacity of 10⁻⁴ Torr, and when used in conjunction

with the Pfeiffer vacuum pump, it can achieve vacuum levels down to 10^{-8} Torr. The vacuum pumps used in the system are shown in Figure 4.



Figure 4. Edwards Back Pump (a) Pfeiffer TMH 071P Vacuum Pump (b)

All connections in the system have been made using KF25 and KF10 fittings. Additionally, to prevent leakage during measurements, the system termination has been achieved with a gasket and a termination plug, ensuring a leak-free setup. For the power supply, a 220V AC to 24V DC, 4A SMSP (Switching Mode Power Supply) has been used to power the sensor, the Pfeiffer vacuum pump, and the electronic systems.



Figure 5. 24V 4A AC/DC Switching Mode Power Supply (SMSP)

Figure 5 illustrates the use of the SMPS converter in the system. This converter was selected due to its current limiting capabilities, which are crucial for protecting the pump motor in case of any malfunctions in the vacuum pump. The current limitation feature ensures that the pump motor is safeguarded against potential damage. For the electronic systems, the 24V output from the power supply is regulated to 5V using a voltage regulator, making the system compatible with the required specifications.

2.2. Measurement System and Experimental Setup

The most critical components of the measurement system are the MKS903 sensor and the microcontroller system responsible for reading the data from the sensor. The sensor provides an analog voltage output in the range of 0–10 V for pressure values between 3×10^{-10} Torr and 5×10^{-3} Torr. However, this voltage varies in direct proportion to the pressure. The relationship between pressure and voltage is logarithmic in nature. In order to convert these values into a more understandable form, it is necessary to linearize them numerically through the embedded system.

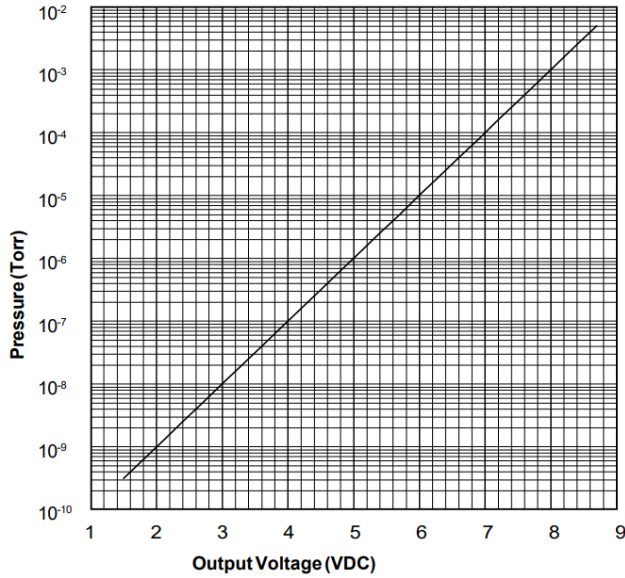


Figure 6. Relationship between Pressure and Output Voltage

Upon examining the graph in Figure 6, it is evident that there is no linear relationship between pressure and voltage. Therefore, an additional calculation is required for the conversion. The MKS 903 catalog suggests using the equation provided in Equation 2 for pressure measurement calculations, specifically for air or nitrogen.

$$P_{\text{indicated}} = 10^{(V-K)} \quad (2)$$

In Equation 2, P indicates the pressure for air and nitrogen in Torr, mbar, microns, or Pascal (depending on K), and V represents the voltage for $1.5 < V < 8.7$. The constant K takes the following values: 11000 for Torr, 10875 for mbar, 8000 for microns, and 8875 for Pascal. The calculation process was performed using a software application, facilitated by the microcontroller. Additionally, since the analog input level of the microcontroller is 5V, a voltage converter was used to adjust the voltage range to 0-5V. Measurements were calculated in Torr, using the commonly employed constant $K=11000$ for vacuum systems, and the results were displayed on the screen.

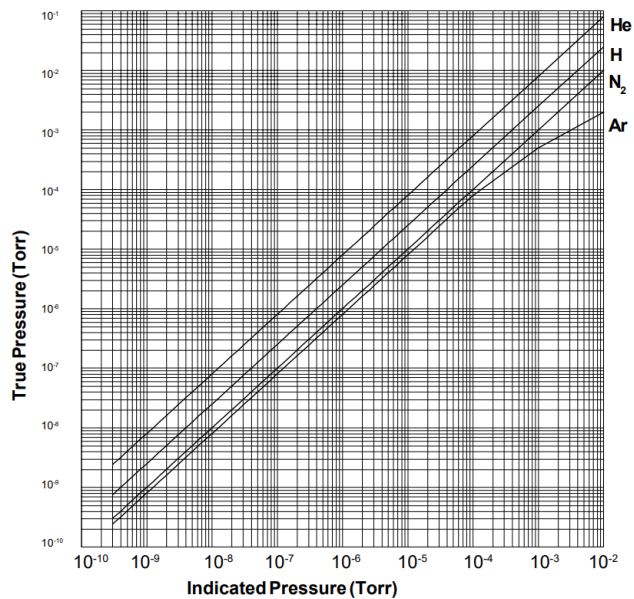


Figure 7. Relationship Between $P_{\text{indicated}}$ and True Pressure for Different Gases

In Figure 7, the relationship between the indicated pressure ($P_{\text{indicated}}$) and the actual pressure values in Torr for different gases is presented. The graph provides values for four gases commonly used in the system: hydrogen, helium, nitrogen, and argon.

Table 1. Gas Correction Factors for Series 903 (IMT) Cold Cathode Ionization Gauge

Gas	Correction Factor (True Pressure/Indicated Pressure)	Applicable Pressure Range (Torr)
Hydrogen (H ₂)	2,5	3×10^{-10} to 5×10^{-3}
Helium (He)	8	3×10^{-10} to 5×10^{-3}
Argon (Ar)	0,8	Below 1×10^{-4}
Argon (Ar)	0,5	Around 1×10^{-3}
Argon (Ar)	0,2	Around 1×10^{-2}

For gases other than air and nitrogen, the correction factors provided in Table 1 should be applied. The following equation, as given in the sensor catalog, must be used for vacuum pressure measurements of these gases.

$$P_{\text{Gas}} = P_{\text{indicated}} \times \text{Correction Factor}$$

(3)

In the equation, $P_{\text{indicated}}$ represents the value calculated for air. The pressure value for the gas to be measured can be obtained by multiplying this value by the correction factor of the specific gas, as provided in Table 2. For argon (Ar), as shown in Figure 6, the variation in pressure is more erratic compared to other gases in certain regions,

which means that the correction factor will vary depending on the measurement range. The schematic of the experimental setup is shown in Figure 8.

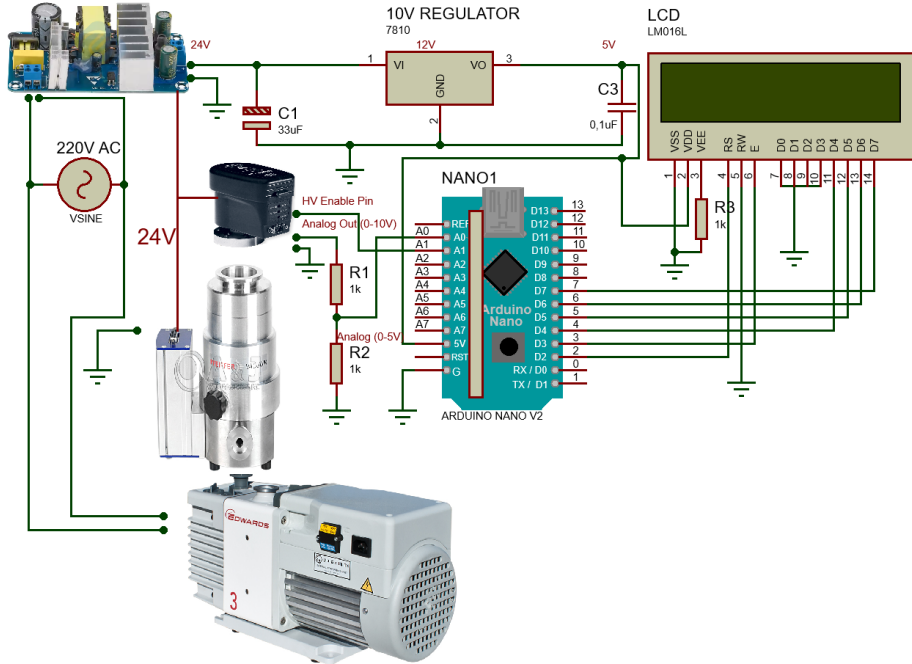


Figure 8. Measurement System and Experimental Setup Diagram

The experimental setup consists of a MKS 903 cold cathode sensor, an Arduino Uno embedded system for reading analog data, an LCD screen for displaying pressure values, a voltage divider for adapting the sensor data to the embedded system's conversion voltage (from 0-10V to 0-5V), and a 24V DC power supply. Additionally, two voltage regulators are employed for the electronic board. To prevent excessive heat generation caused by the large voltage drop, the 24V input is first stepped down to 10V using a 7810 linear regulator before being further reduced to 5V by the microcontroller board's onboard voltage regulator, ensuring efficient and stable power conversion. This approach enhances both the system's performance and safety. Furthermore, the regulator serves as a filter, preventing parasitic signals from the power supply and isolating the pump system from any noise in the voltage source. The A0 pin is configured as an analog input to read the analog data received from the sensor. The A1 pin is set as a digital output to enable the sensor's High Voltage (HV) pin and initiate the measurement process. For the display interface, the D2 and D3 pins are connected to the RS (Register Select) and EN (Enable) control lines, respectively, while the D4, D5, D6, and D7 pins are assigned as the data lines to establish communication with the display module, thereby finalizing the circuit design. All connections within the system are mounted on the PCB using connectors, making the system modular. For the vacuum measurement, the Edwards back pump is connected to the Pfeiffer vacuum pump using a flexible metal pipe, with a KF25-KF10 adapter employed at the Pfeiffer end. The connection is made with flexible pipes and seals. In the experimental setup, the sensor

is connected to the Pfeiffer vacuum pump via a T-adapter with a three-way KF25 connection, along with a KF25 connection fitting and KF25 seal. The third port of the T-adapter is terminated with a KF25 cap and seal, ensuring the system's vacuum tightness. This setup ensures that the system is ready for accurate vacuum measurement.

2.3. Experimental Setup and Vacuum Measurement Results

Within the scope of this study, vacuum measurements were conducted utilizing an experimental apparatus incorporating an integrated sensor and electronic circuitry. The measurement accuracy was validated through comparative analysis with an MKS903 reference vacuum gauge, which serves as an industry standard measurement device. Figure 9 provides a comprehensive illustration of the specifically designed experimental configuration implemented for vacuum measurement purposes.

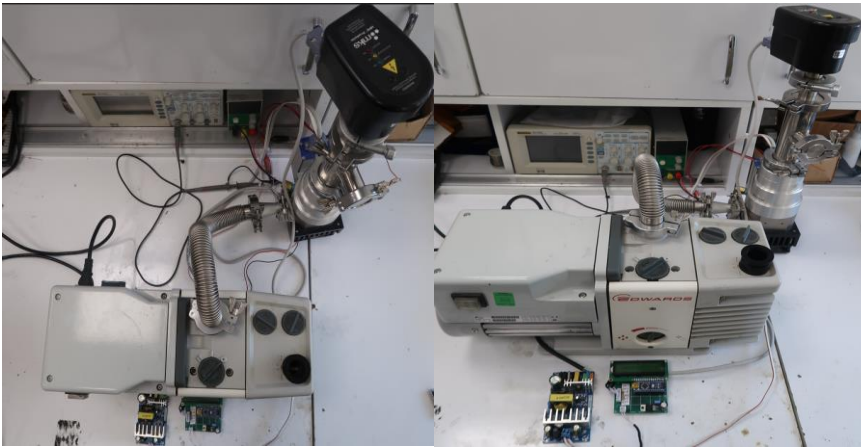


Figure 9. Experimental Setup for Vacuum Measurement

During testing, while measurement errors were observed at low vacuum levels, it was determined that the system achieved stable measurements and consistently displayed values on the screen as vacuum levels increased. This behavior is consistent with the manufacturer's specifications and, therefore, expected. Considering the reference MKS903 device's measurement capability in the range of 3×10^{-10} Torr to 5×10^{-3} Torr, these deviations in the low vacuum region were considered within acceptable limits. Notably, below 5×10^{-3} Torr, the system demonstrated significantly improved measurement stability and began reading true vacuum values with high accuracy.



Figure 10. Measurement Results of Various Vacuum Levels Using the Experimental Setup

The experimental setup presented in Figure 10, through its high voltage (HV) control strategy, protected the sensor from adverse effects in low vacuum regions and successfully performed extremely stable and reliable measurements in the $9,9 \times 10^{-4}$ Torr to $9,9 \times 10^{-8}$ Torr range. These successful results, achieved through hardware optimization and integrated measurement algorithms, demonstrate that the system provides an advanced solution for both academic research and industrial applications.

3. CONCLUSION

In this study, an embedded system-based cold cathode vacuum measurement sensor employing Inverted Magnetron (IMT) cathode technology was designed and experimentally characterized. The system demonstrated stable measurement performance, particularly in the ultra-high vacuum (UHV) regime below 10^{-4} Torr, with comparative testing against the reference MKS903 sensor confirming accurate measurements down to $9,9 \times 10^{-8}$ Torr. The optimization of electron trajectories through magnetic field confinement enabled the sensor to achieve high ionization efficiency at low pressures. Furthermore, the implemented digital electronic readout system effectively compensated for the sensor's non-linear output characteristics through mathematical modeling, thereby enhancing the precision of real-time measurements.

The key advantages of the developed system can be summarized as follows:

1. **Extended Measurement Range:** The system offers a broader dynamic range compared to conventional hot cathode systems, particularly in UHV conditions below 10^{-3} Torr.
2. **Extended Operational Lifetime:** The cold cathode configuration eliminates filament consumption, significantly reducing maintenance requirements and ensuring industrial operational continuity.
3. **Energy Efficiency:** With a maximum power consumption of 3 W, the system contributes to environmental sustainability while maintaining high performance.
4. **Modular Design:** The microcontroller-based electronic interface and KF25 vacuum connections enhance the system's adaptability to diverse applications.

In conclusion, the developed system presents an economical and reliable alternative for high-precision applications in defense industries, aerospace technologies, and semiconductor manufacturing. The advantages offered by IMT cathode technology pave the way for next-generation cold cathode applications in vacuum measurement systems, demonstrating significant potential for both academic research and industrial implementation.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that they have no competing interests related to the content of this manuscript.

Ethical and Informed Consent for Data Used

Ethical approval and informed consent for data use were not required for this research, as the study did not involve human subjects, personal data, or sensitive information. The data utilized were obtained from publicly available and anonymized sources, and all aspects of the research adhered to ethical standards and legal requirements.

REFERENCES

- Arpornthip, T., Sackett, C. A., & Hughes, K. J. (2012). Vacuum-pressure measurement using a magneto-optical trap. *Physical Review A—Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 85(3), 033420 doi:10.1103/physreva.85.033420.
- Calcatelli, A. (2013). The development of vacuum measurements down to extremely high vacuum—XHV. *Measurement*, 46(2), 1029-1039 doi:10.1016/j.measurement.2012.08.018.
- Chen, S., Feng, L., Guo, S., Ji, Y., Zeng, S., Peng, X., ... & Wang, S. (2023). A composite-type MEMS Pirani gauge for wide range and high accuracy. *Sensors*, 23(3), 1276 doi:10.3390/s23031276.
- Cui, Y., Zhang, X., Lei, W., Wang, J., Di, Y., Yang, X., & Chen, J. (2012). Effect of outgassing on the field emission property of tetrapod ZnO. *physica status solidi c*, 9(1), 44-47 doi:10.1002/pssc.201084163.
- Fu, Z., Huang, X., Li, J., Yang, S., & Zheng, J. (2024, March). Review of cold atom quantum-based vacuum metrology. In *Advanced Fiber Laser Conference (AFL2023)* (Vol. 13104, pp. 56-65). SPIE doi:10.1117/12.3016054.
- Grzebyk, T., Górecka-Drzazga, A., Dziuban, J. A., Maamari, K., An, S., Dankovic, T., ... & Busta, H. (2015). Integration of a MEMS-type vacuum pump with a MEMS-type Pirani pressure gauge. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 33(3) doi:10.1116/1.4903448.
- Guangei, Z., Stephen, R., Tao, W., & Nay, Y. (2014). Fuel Heat of Vaporization Values Measured with Vacuum Thermogravimetric Analysis Method.

- Hubbard, B. R., Putman, L. I., Techtmann, S., & Pearce, J. M. (2021). Open source vacuum oven design for low-temperature drying: performance evaluation for recycled PET and biomass. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(2), 52 doi:10.3390/jmmp5020052.
- Jousten, K., Boineau, F., Bundaleski, N., Illgen, C., Setina, J., Teodoro, O. M., ... & Wüest, M. (2020). A review on hot cathode ionisation gauges with focus on a suitable design for measurement accuracy and stability. *Vacuum*, 179, 109545 doi:10.1016/j.vacuum.2020.109545.
- Krishnan, R., & Cahay, M. (2003). Transition from sub-Poissonian to super-Poissonian shot noise in planar cold cathodes. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 21(4), 1278-1285 doi:10.1116/1.1575251.
- Lee, K. R., Kim, K., Park, H. D., Kim, Y. K., Choi, S. W., & Choi, W. B. (2006, April). Fabrication of capacitive absolute pressure sensor using Si-Au eutectic bonding in SOI wafer. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 34, No. 1, p. 393). IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/34/1/064.
- Li, D., Wang, Y., Zhang, H., Xi, Z., & Li, G. (2021). Applications of vacuum measurement technology in china's space programs. *Space: Science & Technology* doi:10.34133/2021/7592858.
- Shirhatti, V., Kedambaimoole, V., Nuthalapati, S., Neella, N., Nayak, M. M., & Rajanna, K. (2019). High-range noise immune supersensitive graphene-electrolyte capacitive strain sensor for biomedical applications. *Nanotechnology*, 30(47), 475502 doi:10.1109/jmems.2024.3367380.
- Song, X., Huang, L., Lin, Y., Hong, L., & Xu, W. (2024). Surface Micromachined CMOS-MEMS Pirani Vacuum Gauge With Stacked Temperature Sensor. *Journal of Microelectromechanical Systems* doi:10.1109/jmems.2024.3367380.
- Sparks, D., Queen, G., Weston, R., Woodward, G., Putty, M., Jordan, L., ... & Jayakar, K. (2001). Wafer-to-wafer bonding of nonplanarized MEMS surfaces using solder. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 11(6), 630 doi:10.1088/0960-1317/11/6/303.
- Takashima, N., & Kimura, M. (2008). Investigation on the Thin Film Pirani Vacuum Sensor Using A Constant Voltage Drive-Mode Diode-Heater. *IEEE Transactions on Sensors and Micromachines*, 128(5), 209-213 doi:10.1541/ieejsmas.128.209.
- Wang, J. Q., & Yu, J. (2015). Fabrication process and electro-thermal modeling for the cathode of the cmos-compatible hot-filament vacuum gauge. *Key Engineering Materials*, 645, 836-840 doi:10.4028/www.scientific.net/kem.645-646.836.
- Wei, D., Fu, J., Liu, R., Hou, Y., Liu, C., Wang, W., & Chen, D. (2019). Highly sensitive diode-based micro-Pirani vacuum sensor with low power consumption. *Sensors*, 19(1), 188 doi:10.3390/s19010188.

- Yang, Y., Qian, L., Tang, J., Liu, L., & Fan, S. (2008). A low-vacuum ionization gauge with HfC-modified carbon nanotube field emitters. *Applied Physics Letters*, 92(15) doi:10.1063/1.2909467.
- Yuan, X., Zhu, W., Zhang, Y., Xu, N., Yan, Y., Wu, J., ... & Deng, S. (2016). A fully-sealed carbon-nanotube cold-cathode terahertz gyrotron. *Scientific Reports*, 6(1), 32936 doi:10.1038/srep32936.
- Zhang, J., Li, D., Zhao, Y., Cheng, Y., & Dong, C. (2016). Wide-range vacuum measurements from MWNT field emitters grown directly on stainless steel substrates. *Nanoscale Research Letters*, 11, 1-7 doi:10.1186/s11671-016-1956-6.
- Zhang, J., Wei, J., Li, D., Zhang, H., Wang, Y., & Zhang, X. (2021). A Cylindrical Triode Ultrahigh Vacuum Ionization Gauge with a Carbon Nanotube Cathode. *Nanomaterials*, 11(7), 1636 doi:10.3390/nano11071636.
- Zhou, G., Roby, S., Wei, T., & Yee, N. (2014). Fuel heat of vaporization values measured with vacuum thermogravimetric analysis method. *Energy & fuels*, 28(5), 3138-3142 doi:10.1021/ef402491p.
- Zhu, Y., Cai, H., Ding, H., Pan, N., & Wang, X. (2019). Fabrication of low-cost and highly sensitive graphene-based pressure sensors by direct laser scribing polydimethylsiloxane. *ACS applied materials & interfaces*, 11(6), 6195-6200 doi:10.1021/acsami.8b17085



A COMPREHENSIVE SURVEY OF NEXT-GENERATION OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR TARGET COVERAGE IN MOBILE WIRELESS SENSOR NETWORKS*

MOBİL KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA HEDEF KAPSAMA İÇİN YENİ NESİL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARINA YÖNELİK KAPSAMLI BİR DERLEME

Gözde BAYAT¹

Eyüp Emre ÜLKÜ²

Buket DOĞAN³

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1514389>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
emre.ulku@marmara.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
15.07.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
21.01.2025

Accepted
(Kabul Tarihi)
24.01.2025

Abstract

In recent years, Wireless Sensor Networks (WSNs) have gained attention due to their real-time monitoring capabilities. These networks use low-power devices to collect and transmit data, becoming significant with the rise of 5G and the Internet of Things (IoT). Initially used for military purposes, WSNs have expanded into various sectors, particularly in smart agriculture, where they enhance efficiency through modern technology. By providing real-time data, WSNs help farmers optimize yields, reduce waste, and improve productivity, supporting the digital transformation of agriculture. Despite their advantages, WSNs face challenges such as routing, localization, energy efficiency, and coverage. This study provides a comprehensive survey of the coverage optimization problem in WSNs, focusing on meta-heuristic algorithms such as the Gray Wolf, Whale Swarm, Flower Pollination, and Cuckoo Algorithms. These algorithms are analyzed based on metrics like maximum coverage rate, energy consumption, and solution time. The survey highlights their potential to address challenges in WSN applications, particularly in agriculture and other domains, by optimizing sensor placement and improving network efficiency.

Keywords: Target coverage optimization, wireless sensor networks, meta-heuristic optimization algorithms.

Öz

Son yıllarda Kablosuz Sensör Ağları (WSN), gerçek zamanlı izleme yetenekleri sayesinde dikkat çekmektedir. Bu ağlar, düşük güçlü cihazlar kullanarak veri toplar ve iletir, 5G ve Nesnelerin İnterneti (IoT) ile birlikte daha da önemli hale gelmiştir. İlk olarak askeri amaçlarla kullanılan WSN'ler, günümüzde özellikle akıllı tarımda modern teknolojilerle verimliliği artırmak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı veriler sağlayarak çiftçilerin verimliliği optimize etmesine, atıkları azaltmasına ve üretkenliği artırmasına yardımcı olmakta ve tarımın dijital dönüşümünü desteklemektedir. Avantajlarına rağmen, WSN'ler yönlendirme, konumlandırma, enerji verimliliği ve kapsama gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu çalışma, WSN'lerdeki kapsama optimizasyon problemini ele alan kapsamlı bir derleme sunmaktadır. Gri Kurt, Balina Sürüşü, Çiçek Tozlaşma ve Guguk Kuşu Algoritmaları gibi meta-sezgisel algoritmalar, maksimum kapsama oranı, enerji tüketimi ve çözüm süresi gibi metrikler temelinde analiz edilmiştir. Çalışma, bu algoritmaların özellikle tarım ve diğer alanlardaki uygulamalarda karşılaşılan zorlukları ele almadaki potansiyelini, sensör yerleşimini optimize ederek ve ağ verimliliğini artırarak vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hedef kapsama optimizasyon, kablosuz algılayıcı ağlar, meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları.

*This publication was produced from the graduate (Master) thesis of Gözde BAYAT in the Computer Engineering Master Program of Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences.

¹ Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Department of Computer Engineering, Türkiye. elvergozde@gmail.com

² Marmara University, Technology Faculty, Department of Computer Engineering, Türkiye. emre.ulku@marmara.edu.tr

³ Marmara University, Technology Faculty, Department of Computer Engineering, Türkiye. buketb@marmara.edu.tr

1. INTRODUCTION

The development of 5G and Internet of Things (IoT) technologies expand the application areas of Wireless Sensor Networks (WSN), offering more effective solutions in various fields such as military, agriculture, healthcare, industrial automation, and environmental monitoring. WSNs, which have been particularly utilized in military applications, have gained broader opportunities for usage with the influence of 5G and IoT technologies (Rawat et al., 2014). In military applications, WSNs hold strategic importance, playing a vital role in areas such as security and surveillance to detect enemy activities and protect strategic regions. By providing real-time data to military units, WSNs strengthen operational decision-making processes and enhance the effectiveness of military forces.

Wireless sensor networks play a significant role in various application areas such as environmental monitoring, data collection, and transmission. These networks provide a structure where sensor nodes can interact wirelessly with each other and detect changes in the environment. They consist of systems comprising low-power consumption and small-sized sensor nodes. These sensors are electronic devices that collect environmental data, such as temperature, humidity, motion, etc., and transmit it to a central unit. However, the placement of these devices in the monitored areas is often done randomly due to cost and complexity reasons. Random placement has several disadvantages that negatively affect the effectiveness and efficiency of sensor networks (Li & Zhang, 2010). Among these disadvantages, factors such as efficiency loss and data interruption play a significant role. Additionally, challenges such as increased energy consumption, imbalance in coverage areas, and cost escalation may also be encountered. Therefore, strategically placing sensors and carefully planning coverage areas are crucial to increase efficiency and minimize disadvantages.

In mobile wireless sensor networks (MWSNs), the target coverage problem refers to the ability of sensor nodes to cover all or specific targets in a given area. With randomly placed sensors in MWSNs, the entire area where data is to be collected may not be fully covered. This results in incomplete data collection in certain regions of the monitored area, leading to inaccurate analyses and ineffective decision-making. Moreover, the imbalance in coverage areas may lead to excessive data density in certain areas and insufficient data in others, negatively impacting the performance of the sensor network. To address these issues, strategic placement and data collection methods are crucial.

The coverage problem in WSNs can generally be defined as a measure of whether a network area is effectively monitored by sensor nodes. This problem is one of the fundamental issues directly affecting the energy consumption and network lifetime of WSNs. The coverage problem aims to achieve maximum coverage with the placement of the minimum number of sensor nodes. Being NP-Hard, meaning lacking a polynomial-time algorithm that solves all instances optimally, this problem falls into a category of challenging optimization problems (Hanh et al., 2016). NP-Hard problems are known for their difficulty and complexity since there is no polynomial-time algorithm that optimally solves all instances. Typically, acceptable solutions are sought for NP-Hard problems, or constraints are introduced to make them easier.

Coverage problems in WSNs can be classified into three categories: target coverage problem, area coverage problem, and barrier coverage problem. In the target coverage problem, there are specific targets that need to be monitored by mobile sensors. Due to limited energy resources, it is important to ensure effective coverage of the monitored area. Area coverage problems aim to have at least k sensors covering each point in a specific area. Barrier coverage problems, on the other hand, target the detection of objects moving along a barrier (Ozdag & Canayaz, 2021).

Next-generation meta-heuristic algorithms can be highly effective in solving NP-Hard problems such as the target coverage problem. These algorithms typically consist of evolutionary computation, artificial bee colonies, particle swarm optimization, and similar techniques. Their characteristic feature is the ability to generate fast and optimized solutions over large datasets. The use of next-generation meta-heuristic algorithms in solving complex problems like the target coverage problem is a significant step towards enhancing the effectiveness of WSNs. These algorithms can optimize the strategic placement of sensor nodes, reduce energy consumption, and maximize the coverage area of the network. Consequently, next-generation meta-heuristic algorithms are considered as important tools in overcoming critical challenges like the target coverage problem, enabling WSNs to operate more efficiently and effectively.

The main objective of this study is to comprehensively evaluate the performance of next-generation meta-heuristic algorithms used in various fields for solving the target coverage problem in the literature. This evaluation aims to determine how different algorithms approach the target coverage problem and under what conditions they are more effective. Additionally, by identifying the limitations of existing algorithms and potential areas for improvement in the current literature, the study aims to provide guidance for future research. In this way, a new perspective is brought to research on the target coverage problem in WSNs, aiming to contribute to the more effective utilization of algorithms in practical applications. This study aims to provide guidance on algorithm selection for individuals working in this field, encouraging effective utilization of these methods. By evaluating a wide range of algorithms and facilitating appropriate selections, the research aims to enhance efficacy within the sector.

Sections 2 and 3 respectively contain a literature review and the materials and methods used in the literature search. Section 4 provides the mathematical formulation of the problem, while Section 5 discusses the advantages and disadvantages of some of the metaheuristic algorithms investigated in the study. The final section, Section 6, presents the conclusions of the study.

2. LITERATURE REVIEW

In recent years, WSN technology has made significant advancements, with application areas encompassing industries, smart agriculture, environmental conservation, healthcare, and many others (Sharma & Gupta, 2022; Qadir et al., 2020; Akyildiz et al., 2002). Today, with the development of smart agriculture applications, the use of WSNs has become widespread to better fulfill the task of acquiring information and sensing about agricultural land environments. The foundation of smart agriculture application

lies in the collection and processing of soil environment information. In a study conducted by Li (Li, 2022), an algorithm was proposed to address coverage holes caused by the failure of nodes in Wireless Sensor Networks (WSNs). This algorithm, based on the behavior of artificial fish swarms, efficiently simulates node movements to repair these holes with minimal energy consumption and node displacement, thereby improving overall network coverage and extending its operational lifetime. To enhance the effectiveness of the optimization, new actions and self-adaptive vision and step length are used. The algorithm quickly repairs holes with minimal node movement, thereby increasing WSN coverage and extending the network's lifetime. Simulation results show that the algorithm provides high accuracy, efficiency, and robustness. Coverage is considered one of the most important factors contributing to the quality of WSN systems (Liang et al., 2021). Therefore, the coverage optimization problem has been extensively investigated in the literature, and numerous studies have been conducted on this topic. In the literature, there are studies focusing on improving coverage area and network lifetime by efficiently and effectively utilizing the energies of the sensors. In these studies, mathematical models of the problem have been first established, and then meta-heuristic approaches yielding optimal or near-optimal results have been developed based on these models. Figure 1 illustrates the types of algorithms used in solving Coverage Optimization problems as general categories. The algorithms used in solving coverage optimization problems can be categorized into three main headings: mathematical algorithms, heuristic algorithms, and meta-heuristic algorithms.

Mathematical algorithms typically define the problem as a mathematical model and develop a solution strategy suitable for this model. These algorithms usually leverage mathematical techniques to optimize the constraints and objective function of the problem. Mathematical algorithms may vary based on the structure and size of the problem, and they typically strive to optimize the problem effectively while efficiently utilizing computational power during the solution process.

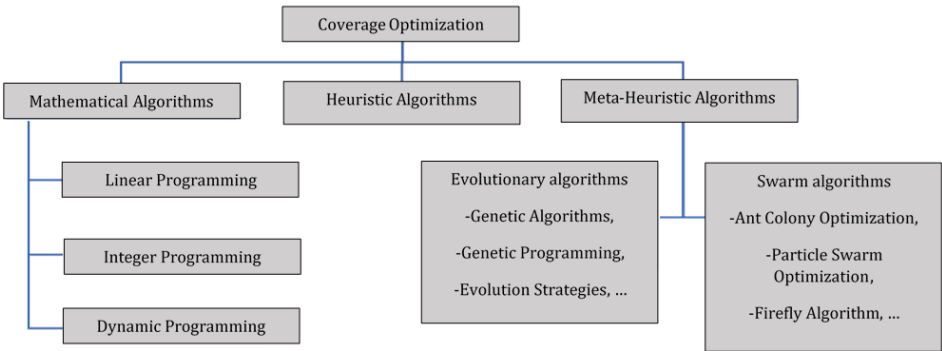


Figure 1. Types of Algorithms Used in Solving Coverage Optimization Problems

Heuristic algorithms are often methods inspired by natural systems or social behaviors to solve problems. These algorithms typically explore potential solutions in the solution space using a set of heuristic rules or metaphors. Heuristic algorithms generally require

less computational power to solve the problem and can produce effective solutions in a specific problem domain.

Meta-heuristic algorithms are methods that combine multiple heuristic algorithms to provide stronger and more flexible solutions. These algorithms work on a population or solution set created by the combination of different heuristic algorithms to optimize the problem. For example, evolutionary programming, which consists of a combination of evolutionary strategies and genetic algorithms, leverages both the flexibility of genetic algorithms and the effective solution potential of evolutionary strategies in the problem domain. Thus, meta-heuristic algorithms can offer more effective and consistent solutions in complex problems like coverage optimization.

These algorithms offer different approaches to solve coverage optimization problems and can be preferred based on suitability to a specific problem domain.

In a study conducted by Jia et al. (2009), the issue of sustaining detection coverage in wireless sensor networks with low energy consumption and a reduced number of active sensor nodes was examined. In the study, a detection model addressing a large number of randomly placed and adjustable sensing radius sensors was proposed. This model was implemented with a novel coverage control scheme based on the elitist non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). Sensor selection and sensing radius adjustment were improved using binary coding methods. The results demonstrated the fast and effective nature of NSGA-II.

In a study by Wang et al. (2018), a wireless sensor network coverage optimization model based on an enhanced whale optimization algorithm (WOA) was proposed. The mathematical model of node coverage in wireless sensor networks was developed to achieve complete coverage for the area of interest. The algorithm presented in the study was developed with the idea of reverse learning to optimize the initial distribution of the population, unlike the whale swarm optimization algorithm. Experiments showed that this algorithm could effectively improve the coverage area of nodes in WSNs and optimize network performance.

Deepa and Venkataraman (2021) combined the WOA with a Levy flight mechanism (LWOA) to address the weak exploration problem in WOA. The proposed method enhances the exploration ability of WOA and improves global search capacity, convergence efficiency, and overall network performance. Compared to WOA, LWOA significantly improves network coverage.

Guo et al. (2013) proposed a multi-objective cultural algorithm inspired by quantum mechanics to solve the multi-objective optimization problem of network coverage rate and energy efficiency of wireless sensor networks. The algorithm effectively utilizes information obtained from the dominant individual set and encourages more efficient search. Simulation results indicate that the wireless sensor network arrangement obtained with this algorithm has a higher network coverage rate and a lower node redundancy rate.

Artificial bee colony algorithm was utilized to increase the network lifetime for solving energy-efficient coverage problem of sensor networks (Khalaf et al., 2020; Roselin & Latha, 2016). In a study by Zhu and Wang (2021), the hybrid strategy grasshopper

algorithm (LRDE_IWO) was used to optimize the coverage rate. This algorithm prevented early convergence and accelerated convergence by balancing global and local search capabilities and optimizing the competitive process. Zang et al. (2021) claimed that the newly optimized gray wolf algorithm, simulated annealing, improved coverage area, reduced energy consumption, and extended the network lifetime of wireless sensor networks compared to other optimization algorithms such as particle swarm optimization and standard gray wolf optimization.

Chowdhury proposed a Dynamic Fuzzy Inference System Based Reverse Glowworm Swarm Optimization (FIS-RGSO) algorithm for mobile wireless sensor networks aiming to minimize energy consumption and maximize area coverage by applying limited and organized sensor movements (Chowdhury & De, 2020). In a study by Lee et al. (2017), a new Ant Colony Optimization (Three Pheromones ACO, TPACO) algorithm was proposed to solve the Efficient-Energy Coverage Problem in Wireless Sensor Networks. TPACO was shown to be more successful than classical ant colony algorithms. Arivudainambi and his colleagues (2017) proposed a deterministic distribution strategy using the cuckoo search algorithm to minimize energy consumption and maximize target coverage area in three-dimensional underwater wireless sensor networks.

In a study by Jiao et al. (2022), an improved flower pollination algorithm (IFPA) was proposed to optimize sensor nodes' coverage and connectivity problems in monitoring areas with complex terrain and harsh environments while minimizing energy consumption. Fang and Sun (2017) developed an enhanced artificial fish swarm algorithm-based optimization method for WSN coverage area with multiple optimization objectives. The method evaluated network coverage, node utilization, and average energy consumption together to eliminate the irrationality of randomly deploying sensor nodes. The algorithm exhibits good global search capabilities but consumes a high amount of time.

In Zhang Qi-wei's (2009) study, a hexagonal grid and Poisson distribution-based node deployment method was successfully applied to solve the problems of connectivity, coverage, and sensor distribution in WSNs. Through Matlab simulation, it was demonstrated that this method could provide uninterrupted network coverage in low node density scenarios while maintaining network connectivity.

Haifeng Ling et al. (2020) addressed the coverage area issues in wireless sensor networks and proposed a coverage optimization method based on the Fruit Fly Optimization Algorithm (FOA). The proposed FOA-based network model optimizes the coverage area by simulating the behavior of fruit flies, thereby enhancing energy efficiency. By balancing the movement and energy consumption of fruit flies, the algorithm extends the network's lifetime while improving coverage area. Similarly, Cheng et al. (2023) also proposed a method based on the Fruit Fly Optimization Algorithm (FOA) to solve coverage issues in wireless sensor networks. The results indicate that the proposed method increases coverage rate and enhances network performance.

An innovative solution called Improved Sparrow Search Algorithm (ISSA) was proposed in (Wang et al., 2023) to address the low coverage area problem in WSNs.

The authors improved the SSA algorithm by modifying the random population initialization to create balance and diversity. Additionally, a reverse learning strategy was applied to prevent falling into local optima. By resolving the issues in SSA, better coverage optimization was achieved.

In the study by Jinyan Liang et al. (2022), the focus was on the information monitoring area of Soil Moisture Wireless Sensor Networks (SMWSNs) used for precise farm irrigation. The researchers developed the Adaptive Cauchy Variant Butterfly Optimization Algorithm (ACBOA) to optimize the coverage area of SMWSNs and increase water use efficiency. Additionally, they designed a coverage optimization model that integrates node coverage area and network service quality. Simulation experiments demonstrated that the ACBOA optimization increased the coverage rate of SMWSNs by 9,09%, 13,78%, 2,57%, and 11,11% compared to other swarm intelligence algorithms (BOA, ABC, FOA, and PSO), respectively.

Qiang Zhao et al. (2022) proposed the combined use of PSO and chaos optimization. By using a method that encodes sensor locations, PSO optimized the sensors while the Variable Domain Chaos Optimization Algorithm (VDCOA) was used to achieve higher coverage rates. Six versions of VDCOA were investigated, including circular, logistic, Gauss, Chebyshev, sinusoidal, and cubic maps. All six versions outperformed PSO and CPSO, achieving coverage areas exceeding 90% in the first two cases.

In the study by Chowdhury and De (2021), effective deployment of sensor nodes, crucial for enhancing MWSN performance, was emphasized. A Voronoi - Glowworm Swarm Optimization - K-means algorithm (Voronoi-Firefly Swarm Optimization Algorithm) was introduced as an energy-efficient coverage optimization technique. By combining Glowworm Swarm Optimization, K-means algorithm, and Voronoi cell structure, this approach increased coverage area with minimum active node count. The proposed method also extended network lifetime by saving energy, and simulation results demonstrated coverage rates of up to 99,99%.

Kapoor and Sharma (2023) proposed a routing protocol inspired by firefly swarms to ensure the sustainability of energy-constrained wireless sensor networks. Glowworm swarm optimization aimed to improve network coverage area and connectivity for message transmission. As this algorithm converged faster compared to alternative techniques such as Particle Swarm Optimization, Firefly Algorithm, Grey Wolf Optimization, Genetic Algorithm, and Bat Algorithm, it showed effective potential in solving multi-objective optimization problems.

In the study by Biswas et al. (2018), a distributed shortest path data collection algorithm using sensor nodes was proposed to minimize energy consumption in WSNs. This algorithm aimed to increase network lifetime by providing connected target coverage in both static and mobile WSNs. The performance of the proposed algorithm was evaluated with parameters such as live node percentage, node load distribution, and network lifetime using the TOSSIM simulator in the TinyOS environment.

Keshmiri and Bakhshi (2020) addressed the connected target coverage problem in energy-constrained wireless sensor networks. They proposed a new two-stage optimization approach; in the first stage, maximum disjoint cover sets were created

with integer linear programming, and in the second stage, a complex integer linear programming model was used to plan information gathering and transmission for targets. The effectiveness of the two-stage method was demonstrated through experiments conducted in various scenarios.

In the study by Pitchaimanickam and Murugaboopathi (2020), a hybrid approach combining Particle Swarm Optimization (PSO) with Firefly Algorithm was proposed to enhance the energy efficiency of wireless sensor networks (WSNs). This hybrid algorithm improved the selection of the optimal cluster head in the LEACH-C algorithm, resulting in energy savings. The performance of the proposed method was evaluated based on parameters such as live node count, energy efficiency, and utilization. The results showed that the proposed hybrid method achieved more efficient results by prolonging network lifetime compared to the Firefly Algorithm.

Da-Ren Chen et al. (2019) proposed a protocol called CEMST aiming to improve coverage and energy efficiency in wireless sensor networks. This protocol includes intra-cluster and inter-cluster methods considering sensor node density and coverage area overlap. Additionally, it generated balanced clustering structures using a self-balancing algorithm and Borůvka algorithm to enhance energy efficiency. Simulation results demonstrated that CEMST provided better coverage area and network lifetime.

In the study by Sampathkumar et al. (2020), the Glowworm Swarm Optimization approach (LBR-GSO) was proposed for energy-efficient routing and load balancing in WSNs. LBR-GSO utilized an enhanced route discovery algorithm for energy savings and employed a pheromone-based update strategy and energy-based transmission strategy. Evaluated in various application scenarios using MATLAB simulations, LBR-GSO demonstrated more effective improvements compared to other approaches such as ACO, EE-ACO, and s-Ant.

Weifeng Sun et al. (2020) reviewed representative Swarm Intelligence (SI) algorithms and summarized their applications in the Internet of Things (IoT), particularly focusing on SI-based applications in WSNs. Additionally, SI-based applications were evaluated in other IoT areas such as Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-supported wireless networks, and future research expectations and trends were discussed.

Hui Wang et al. (2020) focused on the centrality of energy efficiency in the design of routing algorithms for wireless sensor networks. They developed a routing algorithm based on the Elite Hybrid Meta-Heuristic Optimization Algorithm to maximize the survival time of sensor networks communicating with the receiver node. By combining the global search capabilities of Particle Swarm Optimization, the differential operator of differential algorithm, and the pheromones of ant colony optimization, this new algorithm offered an innovative approach. The new algorithm was tested through comprehensive simulations and observed to increase the lifetime of wireless sensor networks by 38% compared to other routing algorithms.

The study by Singh et al. (2021) addressed the use of nature-inspired optimization algorithms to solve the sensor lifespan limitations in WSNs. Highlighting the importance of achieving optimum network coverage, the use of these algorithms in WSNs to reduce energy consumption of battery-operated sensors and increase network

efficiency was examined. The paper classified optimization algorithms in the first half and summarized WSN problems, while the second half compared the performance of two nature-inspired algorithms: Enhanced Genetic Algorithm and Binary Ant Colony Algorithm (IGA-BACA) against Lion Optimization (LO). Simulation results showed that LO provided better network coverage and faster convergence rates.

Gunjan (2023) focused on research into the practical challenges of integrating nature-inspired multi-objective optimization (MOO) algorithms into WSNs. The study examined the use of MOO algorithms and evaluated their effects on various application domains. Providing a significant evaluation to guide future researchers, it presented an assessment of the integration of WSNs with MOO and the potential contributions of this integration.

The literature survey indicates that coverage optimization in wireless sensor networks (WSNs) is a significant research topic. Studies in this field emphasize the use of various next-generation metaheuristic algorithms to increase sensor node energy efficiency, extend network lifetime, and optimize data transmission. The findings obtained from a comprehensive literature review highlight the importance of new research and development efforts to improve WSN performance and enable more effective utilization in various application domains. These studies, which will guide future researchers, underscore the potential and significance of metaheuristic algorithms used in coverage optimization of WSNs.

3. SURVEY SCOPE AND METHODOLOGY

In this study, studies aiming to solve the coverage optimization problem, which aims to determine the optimal placement of sensor nodes in Wireless Sensor Networks (WSNs), were examined in Web of Science, Springer, Elsevier, Google Scholar, Semantic Scholar, Scopus and IEEE Xplore databases. In all databases, 522 publications referring to “WSN and/or coverage optimization” were detected in the period 2016-2023. The search on all databases focused on the following string: WSN AND Coverage AND Optimization AND Heuristic. 73 publications were selected after scope and content evaluation, and 45 publications were selected after suitability evaluation. The most important of the 45 studies analyzed are presented in Table 1.

Table 1. Overview of Algorithm Used in Coverage Optimization

Reference	Type of algorithm used	Problem type	Advantages/Disadvantages
St 1	Harmony Search Algorithm (HS)	Maximum Coverage	Adapts number and position of nodes to maximize coverage and minimize cost. Integrates adaptable length encoding in solution vectors, allowing dynamic adjustment of sensor counts. Superior performance in optimizing network coverage

			compared to genetic algorithms and random deployment.
St 2	Cuckoo Search Algorithm (CSA)	Maximum Coverage, Energy Consumption	When compared with the RA algorithm, the coverage rate is higher in the CSA.
St 3	Particle swarm optimization (PSO) and Voronoi diagram.	Maximum Coverage	The proposed algorithm provides better coverage area compared to PSO-Grid within a reasonable computation time.
St 4	Distributed Data Gathering Algorithm	Maximum Coverage, Network Lifetime	This paper primarily focuses on energy-efficient connected target coverage in Wireless Sensor Networks (WSN). On one hand, we propose a distributed data collection algorithm to provide energy-efficient shortest path routing, and on the other hand, we allow for multi-path routing to ensure the reliability of the network. The performance of the algorithm has been analyzed on both static and mobile WSNs. We observed that mobile WSNs outperformed in terms of both network lifetime and live node percentage.
St 5	Coverage- and energy-aware method with minimum spanning trees (CEMST)	Maximum Coverage, Energy Consumption, Network Lifetime	This paper proposes a coverage and energy-aware method with Minimum Spanning Trees (CEMST) for multi-hop clustered WSNs. In CEMST, the cluster size is detailed with all experiments, and the effectiveness of proposed parameters such as sensor overlap degree, node density is examined. The distance to the BS is used to balance node energy consumption using self-organizing algorithms. Compared with existing methods, CEMST forms more suitable cluster structures and energy-efficient routes.

St 6	Energy-improved Fruit Fly Optimization Algorithm (E-FOA).	Maximum Coverage, Network Lifetime	OA has been improved in terms of energy so that the algorithm can monitor the energy of each node, stop iterations when the node energy is low, reduce node energy loss, and decrease the number of dead nodes. This enhanced method optimizes the coverage area of the wireless sensor network.
St 7	Fuzzy Inference System Based Reverse Glowworm Swarm Optimization (FIS-RGSO)	Maximum Coverage, Energy Consumption	The FIS-RGSO algorithm demonstrates that it is more energy-efficient compared to the previous EEMRGSO algorithm. It reduces sensor movements to minimize the total distance covered, thus increasing the network's lifespan. Additionally, it improves the utilization of the sensor's detection area by reducing the overlap with neighboring sensors.
St 8	Energy-efficient coverage optimization based on K-means-Voronoi-GSO algorithm	Maximum Coverage, Network Lifetime	The approach proposed in this paper, developed using the GSO algorithm, K-means algorithm, and Voronoi, has shown the best performance, reaching a coverage rate of 99,99% when compared with 7 different algorithms.
St 9	Levy Flight mechanism with WOA (LWOA)	Maximum Coverage	The LWOA algorithm, by enhancing and balancing the exploration capability of WOA, can facilitate the capture of local optima. When compared with Particle Swarm Optimization and Whale Optimization Algorithm, LWOA can effectively increase the coverage area of wireless sensor network nodes, achieving a higher coverage rate with fewer nodes. As a result, the total cost of deploying the network is minimized.
St 10	Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA)	Maximum Coverage, Energy	The speed of escaping local optima has been improved by introducing such a fusion with virtual force. However, the algorithm still has disadvantages such as delayed

		Consumption	response to serious local optimization and noticeable improvement in coverage performance.
St 11	Multi-objective real-coded quantum inspired cultural algorithm (MORQCA)	Maximum Coverage, Energy Consumption	This algorithm demonstrates that the wireless sensor network layout obtained achieves a higher network coverage rate and a lower node redundancy rate.
St 12	Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)	Maximum Coverage, Energy Consumption	Traditional NSGA overcomes disadvantages such as high computational complexity, premature convergence, and the necessity of assigning sharing parameters.
St 13	Improved flower pollination algorithm (Improved - FPA)	Maximum Coverage, Energy Consumption	The I-FPA algorithm demonstrates higher search efficiency and accuracy compared to standard FPA, IGWO, AIFS, and IPSO. Simulation results confirm that our proposed CCFPA can achieve 100% coverage and connectivity with fewer sensor nodes and less movement energy usage.
St 14	Improved GSO	Maximum Coverage, Energy Consumption	The proposed technique's applicability in terms of solution efficiency has been compared with alternative techniques such as Particle Swarm Optimization, Firefly Algorithm, Grey Wolf Optimizer, Genetic Algorithm, and Bat Algorithm. Findings indicate that our technique outperforms the others due to the high likelihood of providing globally optimized solutions for multi-objective optimization problems, especially in terms of convergence speed.
St 15	New 2-phase optimization method	Maximum Coverage, Energy Consumption	The proposed two-phase system improves the lifespan compared to OECCH and EECC due to the creation of more qualified cluster heads (CS).
St 16	Bee algorithm	Maximum Coverage	According to the results obtained, the bee algorithm provides a better

			wireless sensor network coverage area compared to the genetic algorithm.
St 17	Three Pheromones ACO, TPACO	Maximum Coverage, Energy Consumption	The new ACO algorithm (Triple Pheromone ACO, TPACO) uses three types of pheromones to efficiently find the solution, while traditional ACO algorithms only use one type of pheromone. Another advantage of the TPACO algorithm is that it uses fewer user parameters.
St 18	Adaptive Cauchy variational butterfly optimization algorithm (ACBOA)	Maximum Coverage	The BOA algorithm has been improved to enhance coverage rate by addressing issues such as falling into local optima and weak convergence performance. ACBOA has achieved a better coverage rate compared to BOA, ABC, FOA, and PSO.
St 19	Improved comprehensive learning particle swarm optimization (ICLPSO)	Maximum Coverage, Network Lifetime	Many experiments show that the proposed ICLPSO is effective and performs well under all these conditions, and QPSO also outperforms SPSO.
St 20	Dynamic Cuckoo Search Algorithm	Energy Consumption, Network Lifetime	Enhances network lifetime by using nodes with maximum residual energy, efficiently covers areas with fewer sensors, dynamically adjusts active and sleep modes for energy conservation. Complexity in real-world application due to dynamic energy levels and network conditions, may require more computational resources for continuous monitoring and adjustment.
St 21	Epsilon Constraint-based Adaptive Cuckoo Search	Congestion Avoidance and Control in Wireless Sensor Networks	High throughput (0,99), efficient in handling packet losses and delays, adaptively adjusts step size to find optimal solutions, reduces bandwidth consumption. Complexity of the algorithm might require more computational resources, specific to

			scenarios where congestion detection and control are critical.
St 22	Hybrid approach of Firefly Algorithm with Particle Swarm Optimization (HFAPSO)	Energy Consumption	In this paper, a hybrid approach combining Particle Swarm Optimization (PSO) with Firefly Algorithm (FA) is proposed to find the optimal cluster head selection in the LEACH-C algorithm. The hybrid algorithm enhances the global search behavior of fireflies using PSO and ensures the optimal positioning of cluster heads.
St 23	Energy Efficient Coverage based Artificial Bee Colony Optimization (EEC-ABC)	Maximum Coverage, Energy Consumption	The C-ABC algorithm, which provides both coverage and energy consumption optimization, addresses both problems as multi-objective compared to E-ABC. It optimizes both coverage rate and energy consumption better than ABC.
St 24	load balancing and routing strategies using the Glowworm swarm optimization approach (LBR-GSO)	Energy Consumption	LBR-GSO, along with metrics such as energy efficiency, energy consumption, and network lifetime extension. The results obtained from this comprehensive analysis indicate that LBR-GSO offers effective improvement compared to existing approaches such as ACO, EE-ACO, and s-Ant.
St 25	Survey Paper	Maximum Coverage, Energy Consumption	The study provides a comprehensive analysis by comparing the performance of various nature-inspired algorithms, offering valuable insights to guide readers in selecting the most suitable algorithms for specific applications. Additionally, it highlights the wide applicability of these algorithms by discussing their advantages and challenges across different application scenarios. However, as a survey paper, it lacks algorithm-specific details and does not delve deeply into the unique advantages or disadvantages of individual algorithms.

St 26	Survey Paper	Energy Consumption, Maximum Coverage	The study offers a comprehensive overview of swarm intelligence algorithms used in the Internet of Things (IoT), focusing on their applications in wireless sensor networks (WSNs). It emphasizes the potential of these algorithms to address challenges such as energy consumption, coverage optimization, and data routing in dynamic IoT environments. The paper also highlights the adaptability of swarm intelligence techniques to various IoT domains, showcasing their effectiveness in solving multi-objective optimization problems. However, as a survey paper, it provides limited implementation details and lacks experimental results, which may leave readers seeking more in-depth evaluations of specific algorithms.
St 27	Wolf Pack Optimization Algorithm	Maximum Coverage	Increases the neighborhood search range, improving the ergodicity and distribution uniformity of the wolf pack. Enhances calculation speed and accuracy of coverage optimization. Improves residual energy efficiency of sensor nodes significantly compared to Particle Swarm Optimization (PSO) and Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA).
St 28	elite parallel cuckoo search algorithm	Maximum Coverage	Compared to PSO and ACO-based methods, especially for WSNs with a large number of sensor nodes, it shows that it can increase regional coverage rate compared to traditional PSO and ACO approaches.
St 29	Elite Hybrid Metaheuristic Optimization Algorithm (EHMO)	Energy Consumption, Network Lifetime	Comprehensive simulation studies demonstrate that the proposed algorithm can increase the maximum lifetime of wireless sensor networks by 38% compared to results obtained with state-of-the-art algorithm routing algorithms based on other

			population-based optimization algorithms.
St 30	Improved Sparrow Search Algorithm, ISSA	Maximum Coverage	OA has been improved in terms of energy so that the algorithm can monitor the energy of each node, stop iterations when the node energy is low, reduce node energy loss, and decrease the number of dead nodes. This enhanced method optimizes the coverage area of the wireless sensor network.
St 31	Minimum exposure path (MEP-PSO)	Maximum Coverage	Directed sensors have been used, and by dynamically adjusting the locations of directed sensors, the coverage performance of DSNs can be significantly improved.
St 32	Improved whale algorithm	Maximum Coverage, Energy Consumption	In the model, the idea of inverse learning has been added to the original Whale Optimization Algorithm to optimize the initial distribution of the population. This method enhances the search capability of nodes and accelerates global search.
St 33	Grey wolf algorithm optimized by simulated annealing method (SA-GWO)	Maximum Coverage, Energy Consumption	GWO is more successful than PSO in optimizing both energy consumption and coverage rate.
St 34	Particle swarm and chaos combined method (PSO-VDCOA)	Maximum Coverage	Among the versions of PSO-VDCOA, PSO-Circle demonstrates better performance compared to PSO-Logistic, PSO-Gaussian, PSO-Chebyshev, PSO-Sinusoidal, PSO-Cubic, LdiwPSO, PSO, and CPSO algorithms, making it a viable choice for practical coverage optimization in WSNs.

St 35	A hybrid strategy-based improved weed algorithm (LRDE_IWO)	Maximum Coverage, Energy Consumption	The study presents an improved weed algorithm (IWA) tailored for coverage optimization in wireless sensor networks (WSNs). The algorithm effectively addresses challenges such as limited sensor coverage and high energy consumption by balancing global and local search capabilities. It prevents premature convergence and improves the optimization process through dynamic adjustments of parameters, ensuring higher coverage rates and reduced energy usage. However, the algorithm may require significant computational resources for fine-tuning parameters, which can be a limitation for large-scale WSN applications.
St 36	Cuckoo Search Algorithm	Maximum Coverage	Effectively jumps out of local optima using long-distance searches. Achieves global optimal solutions to maximize coverage performance. Can handle dynamic and complex environments due to the adaptable search pattern of Levy Flights. First to use cuckoo search for coverage hole repair in WSNs, introducing a novel approach.

The year in which the most publications were produced in the selected time period was 2020 (12 publications), and the year in which the least publications were produced was 2019 (2 publications). The number of publications produced in other years is as follows, as shown in Figure 2: 2016 is 3 publications, 2017 is 6 publications, 2018 is 3 publications, 2021 is 9 publications, 2022 is 5 publications and 2023 is 5 publications.

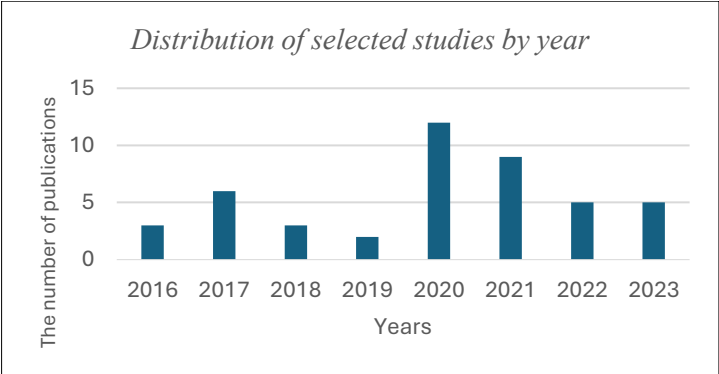


Figure 2. Distribution of Selected Studies by Year

When examining the distribution of selected studies by geographical locations, it is observed that the leading continent is Europe (n=21), followed by America (n=13), Asia (n=10), and Africa (n=1). The distribution of studies by countries where they were published is presented in Figure 3, and the distribution by geographical regions is shown in Figure 4.

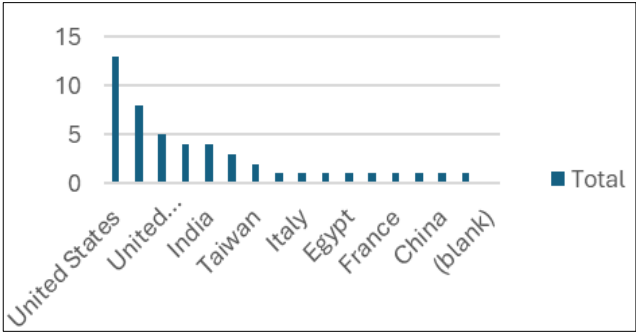


Figure 3. Geographical Distribution of Publications by Countries

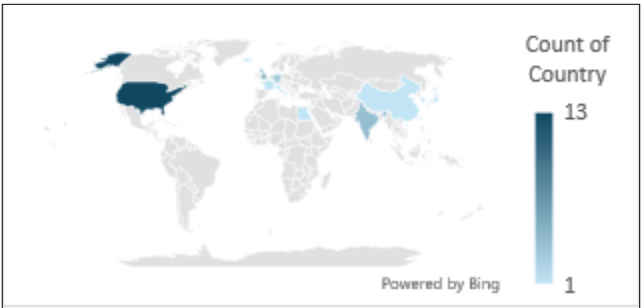


Figure 4. Geographical Distribution of Publications by Regions

4. DEFINITION OF TARGET COVERAGE PROBLEM

In the context of a wireless sensor network, the target coverage problem addresses the optimal placement of N sensors in a specific area. This problem aims to maximize the coverage ratio, where the coverage ratio represents the ratio of the area covered by the sensors to the region of interest. In Figure 5, $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_i\}$ represents the set of target points, and $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_j\}$ represents the set of sensors. Additionally, it is assumed that all sensors are identical and each sensor can detect objects within its sensing range r .

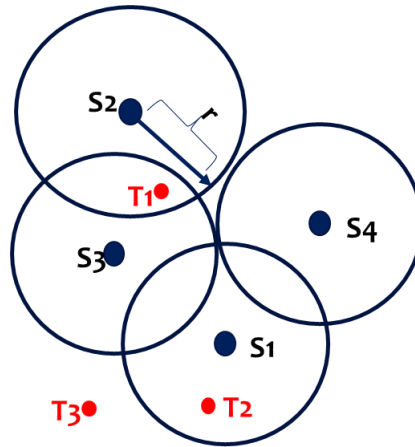


Figure 5. Target Coverage Problem

When the elements of target $T_i(x_i, y_i)$ and sensor $S_j(x_j, y_j)$ are deployed in the field, the coverage of target t_i by sensor s_j is calculated as shown in Equation 1.

$$d(S_j, T_i) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq r \quad (1)$$

Here, d is the Euclidean distance between the sensor and the target point. (x_j, y_j) and (x_i, y_i) are the coordinates of the sensor and target points, respectively. r is the sensing radius of the sensor node.

To measure coverage, Boolean disk coverage is commonly used (0: No coverage / 1: coverage exists). The coverage probability of sensor S_j for T is denoted by $p_{cov} = (S_j, T)$. A target is considered covered if it is detected by at least one sensor, as expressed in Equation 2.

$$p_{cov}(S_j, T) = \begin{cases} 1, & \text{if } d(S_j, T) < r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Typically, the probability of a target being covered by a single sensor is less than 1. To increase the probability of coverage for a target, multiple sensors need to detect the

target together. The joint coverage probability of all sensor nodes for a specific target is shown in Equation 3.

$$P_{cov}(S, T) = 1 - \prod_{S_j \in S} (1 - p_{cov}(S_j, T)) \quad (3)$$

Here, S represents all the wireless sensor nodes in the monitoring area. Area coverage ratio is one of the primary evaluation criteria of the coverage model. It is expressed as the ratio of the coverage area of the node set to the total area of the monitoring area, and the area coverage ratio of the node set is denoted as $R_{cov}(S)$.

$$R_{cov}(S) = \frac{\sum P_{cov}(S, T)}{LW} \quad (4)$$

Here, $\sum P_{cov}(S, T)$ is the sum of the probabilities of target points being covered by all covering sensor nodes. Assuming the monitored area is a rectangle, the total area would be $LW \text{ m}^2$.

When looking at the equations above, the problem to be solved falls into the category of NP-Hard.

NP-Hard problems belong to the NP (Non-deterministic Polynomial Time) class. There is no known polynomial-time algorithm that can solve all problems in the NP-hard problem class optimally. Examples include problems like the Traveling Salesman Problem (TSP) and the Knapsack Problem.

When the solution space is large, no polynomial-time method can be used to solve the problems described above. Various algorithms and methods can be used to solve NP-Hard problems, but these problems may not actually be solvable or their solutions may take a very long time. Therefore, for solving NP-Hard problems, acceptable solutions are generally sought, or the problems are transformed into easier problems by applying some constraints. Optimization algorithms are suitable solutions for such problems because they enable finding the desired result in polynomial time.

5. ALGORITHMS

Traditional optimization algorithms typically focus on fixed and specific problem types, while new generation optimization algorithms offer more flexible and dynamic solutions by drawing inspiration from natural systems and utilizing machine learning techniques. These new generation algorithms encompass evolutionary processes, swarm behaviors, artificial intelligence methods, and meta-heuristic approaches. For example, genetic algorithms, particle swarm optimization, ant colony optimization, among others, have become popular for solving complex problems. These algorithms can offer various advantages in problem-solving, such as optimizing multiple objectives, adapting to dynamic environments, and handling high-dimensional problems.

Therefore, the use of new generation optimization algorithms in solving the target coverage problem in mobile wireless sensor networks has the potential to provide more effective and efficient solutions. In this section, the advantages and disadvantages of some frequently used new generation optimization algorithms in the selected studies are discussed.

5.1. Particle Swarm Algorithm (PSO)

The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is an optimization algorithm inspired by nature, which operates by mimicking the movements of bird flocks. The PSO algorithm can be applied to various optimization problems in wireless sensor networks, such as the target coverage optimization problem (Wang et al., 2020; Aziz et al., 2009). In this problem, the objective is to find the optimal distribution and timing of sensor nodes while minimizing energy consumption, extending network lifetime, and achieving maximum coverage of a specific target area.

The PSO algorithm can be used to find the optimal location for each sensor node that provides the best coverage area and to determine the optimal schedule for each sensor node that ensures the best connectivity and energy efficiency.

Following the definitions provided below, the PSO equation is given in Equation 5.

$$v_{ij+1} = v_{ij} + c_1 \text{Rand}_{1j}(t) * (pbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 \text{Rand}_{2j}(t) * (gbest_j(t) - x_{ij}(t)) \\ x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1). \quad (5)$$

Where:

- (1) i.particle $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$.
- (2) The current speed of particle i is $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$.
- (3) Personal best position of particle i is $pbest_i = (pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{in})$.
- (4) the best position of the group being gbest

In Equation 5, the index "j" represents the dimension of the problem being searched by the particles; "i" represents the number of particles; "t" denotes the iterations; c_1 and c_2 represent the acceleration coefficients in the algorithm and typically range from 0 to 2; " Rand_1 " and " Rand_2 " are two independent uniformly distributed random variables, ranging from 0 to 1.

In the context of the PSO algorithm, $gbest_j$ represents the best global position among all particles for the dimension j. Here, j refers to the dimensionality of the problem being optimized, and $gbest_j$ indicates the coordinate value of the globally optimal solution in the j-th dimension at the current iteration. This value is determined by comparing the personal best positions (pbest) of all particles in the swarm. The $gbest_j$ value is then used to guide the particles in the swarm towards this optimal solution in subsequent iterations.

The output of the PSO algorithm is the optimal position of each sensor node that ensures the best coverage of the target area.

Some advantages and disadvantages of PSO algorithms in WSN coverage area optimization are as follows:

Advantages:

- PSO is a simple, effective, and computationally efficient optimization algorithm that can find solutions close to the optimum for complex and nonlinear problems.
- Implementation of PSO is easy, and it requires only a small number of parameters to be adjusted, making it suitable for WSN applications.
- PSO can adapt to dynamic environments and handle multiple objectives simultaneously, which are important features for WSN coverage area optimization.

Disadvantages:

- PSO may suffer from early convergence and stagnation, meaning that particles can get trapped in local optima and cease to explore the search space.
- PSO may struggle to address constraints common in WSN coverage area optimization problems. Constraints can limit the feasibility and diversity of solutions, affecting the convergence speed and quality of the algorithm.
- PSO may require a large number of iterations and evaluations to reach a satisfactory solution, leading to more time and energy consumption in WSN applications.

5.2. Ant Colony Optimization (ACO)

Ant Colony Optimization (ACO) is a popular optimization algorithm used in various fields, including WSN. ACO is an optimization algorithm developed by taking inspiration from the foraging behavior of ants in nature (Dorigo & Stützle, 2004).

This algorithm utilizes a group of artificial ants to solve a problem. Each ant represents a solution path, and the ant colony attempts to solve the problem by exploring these paths while sharing information. ACO employs a probability-based search method to find the best solution. The ant colony can be effectively utilized to optimize a problem or find the best route, and it is often applied to complex and large-scale data problems. In the context of WSN, ACO can be applied to address many important challenges such as routing, coverage, energy efficiency, and data fusion.

Advantages and disadvantages of the ACO algorithm in WSN coverage area optimization are as follows:

Advantages:

- It is an algorithm capable of conducting simultaneous searches over a large population.
- It allows minimizing the computational burden of finding the optimal or near-optimal path or paths.

Disadvantages:

- In some cases, it can provide slow convergence, meaning it may require long durations to reach the desired outcome. This could pose issues in real-time applications.
- The effectiveness of ACO depends on accurately tuning a set of parameters. Selecting and tuning these parameters can be challenging in some cases.
- ACO is a probability-based search algorithm and therefore does not always guarantee the global optimum. There may be a chance of finding a better solution in some cases, but there is no guarantee of providing exact results.

In conclusion, ACO is a powerful optimization tool that can be used for WSNs, but it should be applied carefully and configured according to the problem requirements. Its advantages generally outweigh its disadvantages, but it requires proper parameter settings and design decisions.

5.3. Whale Swarm Algorithm (WGA)

The Whale Optimization Algorithm is the launch of a metaheuristic plugin that mimics the hunting behavior of humpback whales. This update can be used to resolve various issues such as WSNs.

The schedule and results of this new method are listed below:

Advantages:

- The Whale Optimization Algorithm offers the ability to more effectively approximate local and global optima. This increases the ability to obtain better results for a variety of problems (Gu, 2020).
- Whale Optimization Algorithm is capable of handling multiple expansion problems with different parts. This presents speech in a more attractive way in various application areas (Gu, 2020).
- Note that this attenuation requires less parameter speedup than some other security techniques.

Disadvantages:

- The convergence speed of the algorithm can sometimes be slow, especially for large and complex problems. This may be a disadvantage in applications of time differences (Deng et al., 2023).
- The Whale Optimization Algorithm may produce results with low precision in some problems. This may limit use in high-definition applications (Deng et al., 2023).
- It is possible for the algorithm to lose local optima, but for some problems it can be made more difficult with better results.

5.4. Grey Wolf Algorithm (GWA)

The coverage problem in WSN addresses the optimization of sensors' ability to effectively cover a certain area. The Grey Wolf Algorithm offers a nature-inspired population-based optimization approach to tackle this challenge. The algorithm mimics the behaviors of grey wolves and updates the positions of sensors like these wolves. Through collaboration among leaders, followers, and other roles, sensors optimize their positions and aim to increase coverage. It utilizes crossover and mutation operations reminiscent of genetic algorithms to determine the best positions during iterations. As a result, the Grey Wolf Algorithm is considered a powerful tool for solving coverage problems in WSNs and determining the optimal positions of sensors.

The advantages and disadvantages of the Grey Wolf Algorithm for the coverage problem in WSNs are as follows:

Advantages:

- The Grey Wolf Algorithm adopts a population-based approach and allows for the simultaneous evaluation of many different positions, providing an advantage in exploring alternative solutions.
- The algorithm includes crossover and mutation operations used in genetic algorithms, thus maintaining genetic diversity and the ability to discover new positions.
- Grey wolves update the positions of sensors using leadership, followership, and other roles, enabling them to adapt to environmental changes.

Disadvantages:

- The success of the algorithm depends on specific parameter settings, making it challenging to adjust these parameters correctly.
- The Grey Wolf Algorithm may sometimes exhibit slow convergence, requiring more iterations to achieve the desired outcome.
- The cost of sensor displacement and the requirement for continuous movement can be disadvantages in practical applications.
- The Grey Wolf Algorithm does not always guarantee the global optimum, meaning there is a chance of finding the best solution, but no guarantee of precise results.

In conclusion, the Grey Wolf Algorithm can be an effective optimization tool for addressing coverage problems in WSNs, but careful attention to parameter settings and problem requirements may be necessary. Its advantages generally outweigh the disadvantages, but this may vary depending on the problem context and application scenario.

5.5. Cuckoo Search Algorithm (CSA)

CSA is an optimization algorithm inspired by nature. This algorithm is based on the breeding and nest robbing behavior of cuckoos.

Each cuckoo represents a potential solution and expresses this solution with a nest. The purpose of the Cuckoo Algorithm is to find the smallest or largest value of an objective function (Tian et al., 2021).

CSA has 3 main parameters.

- Population Size: Specifies how many cuckoos will be used for the algorithm (Tian et al., 2021).
- Breeding Rate: It is a rate that controls how many offspring the cuckoos will leave from the current nest when breeding. This rate determines the frequency of new solutions joining the population.
- Egg Laying: Cuckoos lay eggs in nests (Tian et al., 2021). How to place eggs in nests is important when coming up with new solutions.

How the Algorithm Works:

- Cuckoos produce new solutions using existing nests (solutions). The new solutions produced are placed in some of the existing slots. This fitting process evaluates whether the new solution improves the existing slot. Better solutions favor existing slots and bad solutions are eliminated over time (Narawade & Kolekar, 2017).
- The algorithm continues to run until it reaches a certain stopping criterion or exceeds a certain number of iterations (Narawade & Kolekar, 2017).

Advantages:

- Can Solve High Dimensional and Complex Problems: CSA can deal with high dimensional, complex and nonlinear optimization problems. This provides a great advantage in solving the coverage problem in WSNs (Narawade & Kolekar, 2017).
- Avoidance and Convergence Ability: CSA has the ability to avoid local optima and converge to global optima. This makes it easier to obtain better solutions (Masoodi et al., 2018).
- Suitability for Dynamic Environments: CSA stands out for its ability to adapt to challenging conditions such as changing network topologies and dynamic environments. This is important to adapt to the changing conditions of WSNs (Zhuang et al., 2017).

In (Thirugnanasambandam et al., 2021) authors proposed novel Multi-Objective Binary Reinforced Cuckoo Search Algorithm (MOBRCSA) designed for solving connected coverage target-based problems in WSNs, particularly addressing critical targets. MOBRCSA efficiently balances multiple objectives such as minimizing the number of deployed nodes, maximizing coverage, and ensuring connectivity.

Disadvantages:

- CSA may require a large number of iterations and evaluations. This can be costly in terms of time and computational resources (Alia & Al-Ajouri, 2017).
- Parameter Tuning Challenges: CSA may require parameters to be tuned correctly. Incorrect parameter settings may negatively affect the performance of the algorithm (Narawade & Kolekar, 2017).

6. CONCLUSION

In this study, a survey was conducted to explore optimization algorithms aimed at maximizing coverage within Wireless Sensor Network (WSN) areas of interest. The review included 45 articles, underscoring the crucial importance of coverage optimization, a topic of growing interest among researchers. Recently, nature-inspired algorithms have emerged as effective solutions for addressing challenges related to maximizing target coverage and enhancing energy efficiency within WSNs.

As mentioned in Table 1, among the various algorithms reviewed, the Cuckoo Search (CS) and Grey Wolf Optimization (GWO) algorithms were identified as particularly effective. These algorithms are favored in the literature due to their robust ability to avoid local minimal and efficiently converge on global optima, which significantly reduces computational complexity compared to other methods. The CS algorithm, for example, excels in achieving higher coverage rates by adapting its search strategy dynamically, which is crucial for extensive and unpredictable WSN environments. Similarly, the GWO algorithm has shown superior performance in optimizing both energy consumption and coverage rate, thanks to its simulated annealing-enhanced search capabilities.

This review highlights the pivotal role that advanced optimization algorithms play in enhancing the functionality and sustainability of WSNs. The ongoing development of such algorithms is vital for advancing network technologies and catering to the increasing demand for smart and efficient monitoring systems in various applications.

Authors' Contribution

In this study, the first author contributed to the research, data collection, analysis, interpretation, literature review, and writing of the article. The second author contributed to the idea, criticism, and writing of the article. The third author contributed to the idea, criticism, and writing of the article.

Acknowledgements

This work was supported in part by Marmara University Scientific Research Projects Coordination Unit under grant number FYL-2023-10950

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest between the authors.

Research and Publication Ethics Statement

Research and publication ethics were followed in the study.

REFERENCES

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40, 102–114.
- Alia, O. M., & Al-Ajouri, A. (2017). Maximizing wireless sensor network coverage with minimum cost using harmony search algorithm. *IEEE Sensors Journal*, 17 (3), 882-896. (St 1)
- Arivudainambi, D., Balaji, S., & Poorani, T. S. (2017). Sensor deployment for target coverage in underwater wireless sensor network. In *Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN)* (1-6). (St 2)
- Aziz, N. A. B. A., Mohemmed, A. W., & Alias, M. Y. (2009). A wireless sensor network coverage optimization algorithm based on particle swarm optimization and Voronoi diagram. In *2009 International Conference on Networking, Sensing and Control* (602-607). Okayama, Japan. (St 3)
- Biswas, S., Das, R., & Chatterjee, P. (2018). Energy-efficient connected target coverage in multi-hop wireless sensor networks. In *Bhattacharyya, S., Sen, S., Dutta, M., Biswas, P., Chattopadhyay, H. (Eds.) Industry Interactive Innovations in Science, Engineering and Technology Lecture Notes in Networks and Systems* (11). Springer, Singapore. (St 4)
- Chen, D. R., Chen, L. C., Chen, M. Y., & Hsu, M. Y. (2019). A coverage-aware and energy-efficient protocol for the distributed wireless sensor networks. *Computer Communications*, 137, 15-31. (St 5)
- Cheng, J., Fang, Y., & Jiang, N. (2023). Research on wireless sensor networks coverage based on fruit fly optimization algorithm. In *2023 IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*, 1109-1115. (St 6)
- Chowdhury, A., & De, D. (2020). FIS-RGSO: Dynamic fuzzy inference system based reverse glowworm swarm optimization of energy and coverage in green mobile wireless sensor networks. *Computer Communications*, 163, 12–34. (St 7)
- Chowdhury, A., & De, D. (2021). Energy-efficient coverage optimization in wireless sensor networks based on Voronoi-glowworm swarm optimization-K-means algorithm. *Ad Hoc Networks*, 122, 102660. (St 8)
- Deepa, A., & Venkataraman, R. (2021). Enhancing whale optimization algorithm with Levy flight for coverage optimization in wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 94, 107359. (St 9)
- Deng, H., Liu, L., Fang, J., Qu, B. & Huang, Q. (2023). A novel improved whale optimization algorithm for optimization problems with multi-strategy and hybrid algorithm. *Mathematics and Computers in Simulation*, 205, 794–817.

- Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. MIT Press.
- Fang, Q., & Sun, Y. R. (2017). Wireless sensor network coverage efficiency optimization simulation. *Computer Simulation*, 34(8), 297-301. (St 10)
- Gu, W. (2020). An improved whale optimization algorithm with cultural mechanism for high-dimensional global optimization problems. In *2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)* (1282-1286). Chongqing, China.
- Gunjan. (2023). A review on multi-objective optimization in wireless sensor networks using nature inspired meta-heuristic algorithms. *Neural Processing Letters*, 55, 2587–2611.
- Guo, Y., Liu, D., Chen, M., & Liu, Y. (2013). An energy-efficient coverage optimization method for wireless sensor networks based on multi-objective quantum-inspired cultural algorithm. In *Proceedings of the ISNN'13: Proceedings of the 10th international conference on Advances in Neural Networks* (349). Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. (St 11)
- Hanh, N. T., Hanh, P. T. H., Binh, H. T. T., & Nghia, N. D. (2016). Heuristic algorithm for target coverage with connectivity fault-tolerance problem in wireless sensor networks. In *2016 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI)* (235-240). Hsinchu, Taiwan.
- Jia, J., Chen, J., Chang, G., Wen, Y., & Song, J. (2009). Multi-objective optimization for coverage control in wireless sensor network with adjustable sensing radius. *Computers & Mathematics with Applications*, 59, 1767–1775. (St 12)
- Jiao, W., Tang, R., & Xu, Y. (2022). A coverage optimization algorithm for the wireless sensor network with random deployment by using an improved flower pollination algorithm. *Forests*, 13, 1690. (St 13)
- Kapoor, R., & Sharma, S. (2023). Glowworm swarm optimization (GSO) based energy efficient clustered target coverage routing in wireless sensor networks (WSNs). *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 14(Suppl 2), 622–634. (St 14)
- Keshmiri, H., & Bakhshi, H. (2020). A new 2-phase optimization-based guaranteed connected target coverage for wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 20(13), 7472-7486. (St 15)
- Khalaf, O. I., Abdulsahib, G. M., & Sabbar, B. M. (2020). Optimization of wireless sensor network coverage using the bee algorithm. *Journal of Information Science and Engineering*, 36, 377–386. (St 16)
- Lee, J. W., Choi, B. S., & Lee, J. J. (2017). Energy-efficient coverage of wireless sensor networks using ant colony optimization with three types of pheromones. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7, 419-427. (St 17)

- Li, J., Cui, L., & Zhang, B. (2010). Self-deployment by distance and orientation control for mobile sensor networks. In International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC) (549–553). IEEE.
- Li, D. (2022). Research on coverage holes repair in wireless sensor networks based on an improved artificial fish swarm algorithm. *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*, 15(4), 312–330. <https://doi.org/10.1504/ijaacs.2022.127412>
- Liang, D., Shen, H., & Chen, L. (2021). Maximum target coverage problem in mobile wireless sensor networks. *Sensors*, 21, 184.
- Liang, J., Tian, M., Liu, Y., et al. (2022). Coverage optimization of soil moisture wireless sensor networks based on adaptive Cauchy variant butterfly optimization algorithm. *Scientific Reports*, 12, 11687. (St 18)
- Ling, H., Zhu, T., He, W., Luo, H., Wang, Q., & Jiang, Y. (2020). Coverage optimization of sensors under multiple constraints using the improved PSO algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, Article ID 8820907, 10 pages. (St 19)
- Masoodi, I. S., Dar, M. A., & Banday, M. T. (2018). Energy efficient routing in WSNs based on dynamic cuckoo search algorithm. In 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT) (2514-2517). Bangalore, India. (St 20)
- Narawade, V. E., & Kolekar, U. D. (2017). EACSRO: Epsilon constraint-based adaptive cuckoo search algorithm for rate optimized congestion avoidance and control in wireless sensor networks. In 2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC) (715-720). Palladam, India. (St 21)
- Ozdog, R., & Canayaz, M. (2021). A new metaheuristic approach based on orbit in the multi-objective optimization of wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 27, 1-21.
- Pitchaimanickam, B., & Murugaboopathi, G. (2020). A hybrid firefly algorithm with particle swarm optimization for energy efficient optimal cluster head selection in wireless sensor networks. *Neural Computing and Applications*, 32, 7709–7723. (St 22)
- Qadir, J., Ulah, U., de Abajo, B. S., & Zapirain, B. G. (2020). Energy-aware and reliability based localization-free cooperative acoustic wireless sensor networks. *IEEE Access*, 8, 121366–121384.
- Qi-wei, Z. (2009). Coverage optimization of wireless sensor network. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*.

- Rawat, P., Singh, K. D., Chaouchi, H., & Bonnin, J. M. (2014). Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies. *Journal of Supercomputing*, 68(1), 1–48.
- Roselin, I., & Latha, P. (2016). Energy efficient coverage using artificial bee colony optimization in wireless sensor networks. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 75, 19–27. (St 23)
- Sampathkumar, A., Mulerikkal, J., & Sivaram, M. (2020). Glowworm swarm optimization for effectual load balancing and routing strategies in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 26, 4227–4238. (St 24)
- Sharma, N., & Gupta, V. (2022). A survey on applications, challenges, and meta-heuristic-based solutions in wireless sensor network. In *EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*. Springer, Cham.
- Singh, A., Sharma, S., & Singh, J. (2021). Nature-inspired algorithms for wireless sensor networks: A comprehensive survey. *Computer Science Review*, 39, 100342. (St 25)
- Sun, W., Tang, M., Zhang, L., Huo, Z., & Shu, L. (2020). A survey of using swarm intelligence algorithms in IoT. *Sensors*, 20(5), 1420. (St 26)
- Thirugnanasambandam, K., Raghav, R. S., Anguraj, D. K., et al. (2021). Multi-objective binary reinforced cuckoo search algorithm for solving connected coverage target based WSN with critical targets. *Wireless Personal Communications*, 121, 2301–2325. (St 27)
- Tian, M., Bai, J., Li, J., Huang, M., Zhan, C., & Ren, L. (2021). Elite parallel cuckoo search algorithm for regional coverage control problem in high-density wireless sensor networks. In *2021 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture (AIAM)* (285-289). Manchester, United Kingdom. (St 28)
- Wang, H., Li, K., & Pedrycz, W. (2020). An elite hybrid metaheuristic optimization algorithm for maximizing wireless sensor networks lifetime with a sink node. *IEEE Sensors Journal*, 20(10), 5634-5649. (St 29)
- Wang, J., Zhu, D., Ding, Z., & Gong, Y. (2023). WSN coverage optimization based on improved sparrow search algorithm. In *2023 15th International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)* (pp. 1-8). Seoul, Korea, Republic of. (St 30)
- Wang, L., Li, C., Wang, H., Zhang, Y., & Liu, Z. (2020). MEP-PSO algorithm-based coverage optimization in directional sensor networks. In *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference* (pp. 1-6). Taipei, Taiwan. (St 31)
- Wang, L., Wu, W., Qi, J., & Jia, Z. (2018). Wireless sensor network coverage optimization based on whale group algorithm. *Computer Science and Information Systems*, 15, 569–583. (St 32)

- Zhang, Y., Cao, L., Yue, Y., Cai, Y., & Hang, B. (2021). A novel coverage optimization strategy based on grey wolf algorithm optimized by simulated annealing for wireless sensor networks. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 6688408. (St 33)
- Zhao, Q., Li, C., Zhu, D., & Xie, C. (2022). Coverage optimization of wireless sensor networks using combinations of PSO and chaos optimization. *Electronics*, 11(6), 853. (St 34)
- Zhu, F., & Wang, W. (2021). A coverage optimization method for WSNs based on the improved weed algorithm. *Sensors*, 21. (St 35)
- Zhuang, Y., Wu, C., & Zhang, Y. (2017). A coverage hole recovery algorithm for wireless sensor networks based on cuckoo search. In 2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER) (1552-1557). Honolulu, HI, USA. (St 36)



OTOİMMÜN HASTALIKLARDA GLİKAN BİYOBELİRTEÇLERİN KEŞFİ: TANI VE TEDAVİDE SON GELİŞMELER

DISCOVERY OF GLYCAN BIOMARKERS IN AUTOIMMUNE DISEASES:
RECENT ADVANCES IN DIAGNOSIS AND TREATMENT

Müşerref ÇAĞLI¹

Rafig GURBANOV²

İsmail POYRAZ³

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1660449>

Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
rafig.gurbanov@bilecik.edu.tr

Geliş Tarihi
(Received)
18.03.2025

Revizyon Tarihi
(Revised)
01.05.2025

Kabul Tarihi
(Accepted)
05.05.2025

Öz

Glikanlar, insan vücudunda salgılanan çok sayıda proteine bağlanarak bu proteinlerin yapısal ve işlevsel özelliklerinde önemli değişikliklere yol açan kompleks şeker molekülleridir. Glikozilasyon olarak bilinen bu süreçteki anormallikler, kanser, kardiyovasküler hastalıklar, otoimmün bozukluklar ve kronik inflamatuvar hastalıklar gibi birçok patolojik durumla yakından ilişkilidir. Özellikle otoimmün hastalıklarda, glikan yapılarındaki değişiklikler, hastalığın başlangıcı, ilerlemesi ve tedavi sürecinde kritik bir rol oynar. Günümüzde, glikan yapılarındaki değişikliklerin analizi için yaygın olarak kullanılan kütle spektrometresi gibi ileri analitik teknikler, glikan profillerinin yüksek hassasiyetle belirlenmesine ve hastalıkla ilişkili spesifik glikan modifikasyonlarının tespit edilmesine olanak tanır. Erken dönemde yapılan bu analizler, hastalığın tanısı, tedavi stratejilerinin belirlenmesi ve tedaviye yanıtın izlenmesi açısından klinik karar verme süreçlerine önemli katkılar sağlayabilir. Bu çalışmada, otoimmün hastalıklar başta olmak üzere çeşitli patolojik durumlarda glikan yapılarındaki değişikliklerin rolü ele alınmakta ve bu değişikliklerin potansiyel biyobelirteçler olarak kullanımına yönelik güncel bilgiler sunulmaktadır. Ayrıca, glikan biyobelirteçlerin klinik uygulamalarda kullanımını kolaylaştıracak yeni teknolojik yaklaşımlar ve gelecek perspektifleri de değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Biyobelirteç, glikan, kütle spektrometresi, otoimmün hastalıklar.

Abstract

Glycans are complex sugar molecules that bind to numerous proteins secreted in the human body, significantly altering their structural and functional properties. Abnormalities in this process, known as glycosylation, are closely associated with various pathological conditions, including cancer, cardiovascular diseases, autoimmune disorders, and chronic inflammatory diseases. Particularly in autoimmune diseases, alterations in glycan structures play a crucial role in disease onset, progression, and treatment. Nowadays, advanced analytical techniques, such as mass spectrometry, are widely used to analyze glycan structure modifications, enabling the high-sensitivity profiling of glycans and the detection of disease-associated alterations. Early identification of these changes can significantly contribute to clinical decision-making, particularly in disease diagnosis, treatment strategy development, and therapeutic monitoring. This study explores the role of glycan modifications in various pathological conditions, with a particular focus on autoimmune diseases, and provides up-to-date insights into their potential as biomarkers. Furthermore, emerging technological approaches and future perspectives to enhance glycan biomarkers' clinical applicability are evaluated.

Keywords: Autoimmune diseases, biomarker, glycan, mass spectrometry.

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik, Türkiye.
msrrfymaz@gmail.com

²Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Bilecik, Türkiye.
rafig.gurbanov@bilecik.edu.tr

³Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Bilecik, Türkiye.
ismail.poyraz@bilecik.edu.tr

1. GİRİŞ

Vücudu hastalıklara karşı korumak için hücresel ve moleküler unsurların bir araya gelmesiyle oluşan bağışıklık sistemi, normal şartlarda ‘kendi’ olarak bilinen moleküllere tolerans göstermektedir. Kendi kendine tolerans ortadan kalktığında, bağışıklık sistemi vücudun kendi moleküllerine karşı ‘otoantikör’ üreterek anormal adaptif bağışıklık tepkisine neden olur (Bolon, 2012). Otoimmünite adı verilen bu durum romatizmal eklem iltihabı, sistemik lupus eritematozus, multipl skleroz, tip 1 diyabet ve otoimmün tiroid hastalıkları gibi çok sayıda hastalıkla ilişkilidir (Marrack ve ark., 2001). Otoimmün hastalıklar (Autoimmune Diseases /AD) ciddi doku veya organ tahribatına ve hatta ölümcül sonuçlara yol açabilir. Bu hastalıkların artan prevalansı halk sağlığı açısından endişe verici hale gelmektedir. Amerikan Otoimmün İlişkili Hastalıklar Derneği tarafından AD’lerden etkilenen popülasyon oranının dünya çapında yaklaşık %10’a ulaşabileceği rapor edilmiştir (Li ve ark., 2023). Otoimmün hastalıklar genellikle, genetik yatkınlık ve çevresel faktörler arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkar. Bu hastalıkların erken teşhisinde, sınıflandırma ve hastalık aktivitesinin belirlenmesinde çoğunlukla otoimmün hastalıklar için karakteristik olan otoantikörler kullanılır (Pisetsky, 2023). Ancak otoantikörler bir otoimmün hastalığın varlığını kesin olarak belirleyemez. Bunun yanında tanıyı desteklemeye yardımcı olacak hastalığa uygun belirti ve semptomların eşlik ettiği serolojik testler, tam kan sayımı, immünolojik çalışmalar ve sitokin analizi gibi birden fazla laboratuvar testi gereklidir (Castro & Gourley, 2010). Bu nedenle, hastalığın erken teşhisini sağlamak, gelişimini tanımlamak, seviyelerine göre sınıflandırmak ve doku hasarını önlemek için hastalığa özgü ve duyarlılığı yüksek biyobelirteçlere büyük ölçüde ihtiyaç vardır (Burska ve ark., 2014).

Glikosilasyon, ökaryotlarda en yaygın translayon sonrası modifikasyonlardan biridir ve proteinlerin fonksiyonunu düzenleyerek gelişim, nörojenez ve bağışıklıkta çok önemli bir rol oynar (Pasala ve ark., 2024). Protein glikosilasyonu, spesifik amino asit kalıntılarına karbonhidrat (glikan) yapılarının kovalent olarak bağlanmasıyla oluşur. Bu proteinler çoğunlukla N- veya O- glikozilasyon yoluyla glikosile edilirler. N-bağlı glikanlar, N-asetilglukozaminin (GlcNAc) proteinlerin asparagin kalıntısı üzerindeki amid grubuyla kovalent olarak bağlanmasıyla oluşur. O-bağlı glikanlar ise proteindeki serin (Ser) veya treonin (Thr) kalıntısındaki hidroksil yan zincir grubuna bağlanır. İnsanlarda Ser veya Thr’ye bağlı en yaygın şekerler GlcNAc ve N-asetilgalaktozamin (GalNAc)’dir (Ohtsubo & Marth, 2006; Kam & Poon, 2008; Reily ve ark., 2019). Protein glikosilasyonu, hem sağlıklı hem de patolojik dokularda gerçekleşen temel bir biyokimyasal süreçtir. Bununla birlikte, glikan yapılarının dağılımı ve profilleri, hastalık durumlarına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilmektedir. Özellikle otoimmün bozukluklarda, immün hücrelerin yüzeyinde ve serum proteinlerinde bulunan glikan yapılarının, sağlıklı bireylere kıyasla farklılık gösterdiği ve bu farklılıkların hastalık patogenezini ile ilişkili olabileceği öne sürülmektedir (Flevaris & Kontoravdi, 2022).

Bu çalışmanın temel amacı, insanlarda bulunan farklı glikan yapılarını, otoimmün hastalıklar bağlamında sağlıklı ve hasta bireyler arasında karşılaştırmak ve her bir otoimmün hastalık için spesifik glikan profillerini belirlemektir. Günümüzde gelişen analitik yöntemler sayesinde, glikan yapılarındaki değişiklikler yüksek hassasiyetle tespit edilebilmekte ve bu yapılar, noninvazif biyobelirteçler olarak büyük bir

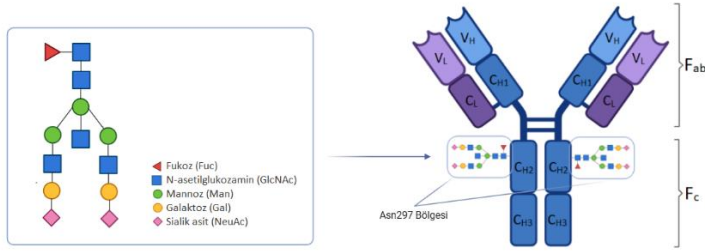
potansiyel taşımaktadır. Hasta ve sağlıklı bireyler arasındaki glikosilasyon farklılıklarının tanımlanması, yalnızca erken ve doğru tanı konulmasını kolaylaştırmakla kalmayıp, aynı zamanda uygun tedavi stratejilerinin belirlenmesine ve tedavi sürecinin izlenmesine de önemli katkılar sağlayacaktır. Bu çalışmada, otoimmün hastalıklar alanında yapılan mevcut araştırmalarda analiz edilen glikan yapılarına genel bir bakış sunularak, bu alandaki bilgi birikiminin derlenmesi ve gelecekteki araştırmalara yön verilmesi hedeflenmektedir.

2. GLİKOSİLASYONUN ANTİKOR ARACILI İMMÜN YANITA ETKİSİ

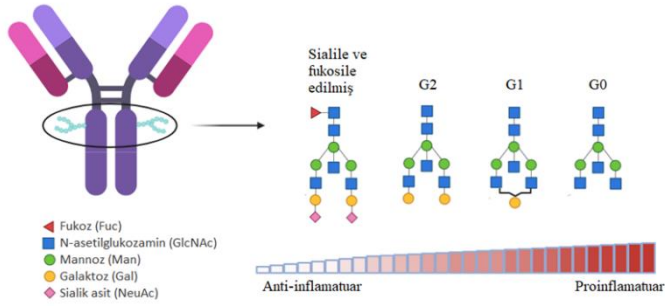
Otoantikorlar, hastalığın klinik başlangıcından önce tespit edilebilmekle birlikte, immün yanıt oluşumunda çeşitli ek faktörler de kritik bir rol oynamaktadır. Bu süreçte, antikorlar ile hücrel reseptörler arasındaki moleküler etkileşimler, özellikle otoimmün hastalıkların patogenezinde büyük önem taşımaktadır. Antikorlar, komplemana bağımlı sitotoksiste (CDC), antikora bağımlı hücrel sitotoksiste (ADCC) ve antikora bağımlı hücrel fagositoz (ADCP) gibi çoklu immün yanıt mekanizmalarını düzenleyerek immün sistemin efektör fonksiyonlarını modüle eder. Bu immün yanıtların gerçekleşmesinde, antikor molekülünün kristalleşebilir fragman (Fc) bölgesinin, Fc reseptörleri (FcR) ve kompleman sisteminin önemli bir bileşeni olan C1q proteini gibi farklı reseptörlere bağlanma afinitesi ve spesifikliğı belirleyici bir rol oynamaktadır (Zhou ve ark., 2021). Ayrıca, otoimmün hastalıkların patogenezinde yer alan serum proteinleri, antikorlar ve reseptörler gibi moleküler bileşenlerin glikosilasyon modifikasyonlarındaki değişiklikler, bu alanda yeni biyobelirteçlerin keşfi ve geliştirilmesi için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu bulgular, otoimmün hastalıkların tanı ve tedavisinde yeni stratejilerin geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Serum proteinleri ve otoantikorların glikosilasyon modifikasyonlarının, birçok otoimmün hastalıkta önemli ölçüde değişiklik gösterdiği bilinmektedir. Bu bağlamda, insan serumunda en yüksek konsantrasyonda bulunan glikoproteinlerden biri olan immünooglobulin G (IgG)'nin N-glikosilasyonundaki farklılıklar, biyolojik ve patolojik süreçler açısından büyük önem taşımaktadır (Seeling ve ark., 2017). IgG'nin yapısı, iki özdeş γ ağır (H) zincir ve iki özdeş λ hafif (L) zincirden oluşan ve birbirlerine disülfid köprüleriyle kovalent olarak bağlanan dört polipeptit zinciriyle karakterize edilir. Her bir ağır zincir, bir değişken alan (VH) ve üç sabit alan (CH1, CH2, CH3) içerirken her bir hafif zincir, bir değişken alan (VL) ve bir sabit alan (CL) içerir. IgG'nin işlev açısından önemli olan diğer kısımları ise antijen bağlanma parçası (Fab) ve kristalleşebilir fragman (Fc) bölümleridir. Ağır zincirlerin sabit bölgelerinin amino asit sekansına bağlı olarak IgG'ler IgG1, IgG2, IgG3 ve IgG4 olmak üzere dört alt sınıfa ayrılabilir (Clerc ve ark., 2015). Glikosilasyon IgG'lerin hem Fc hem de Fab kısımlarında meydana gelir ve Fc bölgesinde bulunan N-glikanlar efektör role sahiptir. Fc bölgesinin CH2-84,4 glikosilasyon bölgesi tüm IgG alt sınıflarında korunmaktadır (Maverakis ve ark., 2015). Sağlıklı bireylerin CH2 alanlarının her birinde asparjin 297 (N297 ya da Asn297) pozisyonunda korunmuş bir glikan yapısı bulunur. Bu glikan yapısı, temel olarak fukoz (Fuc), galaktoz (Gal), sialik asit (NeuAc) ve ikiye bölün (bisecting) N-asetilglukozamin (GlcNAc) ile birlikte mannoz (Man) ve GlcNAc kalıntılarından oluşan bir çekirdek yapı içermektedir (Şekil 1) (Pučić ve ark., 2011). Sağlıklı bireylerde, toplam serum IgG'nin Fc bölgesindeki glikan yapısı büyük ölçüde fukosile edilmiştir (>%90). Bunun yanı sıra, sağlıklı bireylerdeki IgG glikan profili, yaklaşık %35 agalaktosile (IgG-G0), %35 monogalaktosile (IgG-G1), %15

digalaktosile (IgG-G2) ve %10-15 oranında mono- ve disialile edilmiş yapılar (IgG-S) içermektedir (Flevaris & Kontoravdi, 2022).



Bağışıklık hücrelerinin üzerindeki Fc reseptörleri (FcγR), antijene bağlı immünoglobulinlerin Fc bölgesi ile birleşmesi ardından proinflatuar veya sitotoksik yolları başlatabilir. Memeli türlerinde FcγR ailesi içerisinde FcγRI (CD64), FcγRII (CD32), FcγRIII (CD16) ve FcγRIV reseptörleri sayılabilir. Fc alanının farklı FcγR'lere yönelik afinitesi ve bağlanma özgülüğü, IgG alt sınıflarının amino asit sekansındaki farklılıklara ve Fc bölgesindeki glikan yapılarına bağlı olarak değişmektedir (Nimmerjahn & Ravetch, 2006; Bournazos ve ark., 2020). Fc bölgesinin glikosilasyonu ADCC ve CDC'nin yönlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. ADCC, fukoz, galaktoz ve sialik asit içeriğinin azalmasıyla desteklenerek IgG'nin Fc bölgesinin, bağışıklık hücreleri üzerindeki aktivatör Fcγ-RIIIa reseptörlerine bağlanmasını sağlar ve inflamasyona neden olur. Fukoz, galaktoz ve sialik asitlerin artması durumunda ise inhibitör Fcγ-RIIb reseptör bağlanması teşvik edilerek anti-inflatuar bir yanıt oluşturulur (Haslund-Gourley ve ark., 2023). Fc bölgesinde CH2-84,4'e bağlı glikanlar G0, G1 ve G2 şeklinde sınıflandırılabilir. Galaktoz içermeyen (agalaktosile-G0) glikanlar FcγRIII reseptörleri için daha yüksek afiniteye sahiptir ve bu durum birçok otoimmün hastalıkla ilişkilidir. Fc CH2 glikanlarının yüksek G0 oranı proinflatuar etkiyi artırırken, sialile edilmiş veya fukosile edilmiş glikanlar FcγRIII için Ig afinitesini azalttığından antikora anti-inflatuar özellikler kazandırır (Şekil 2) (Maverakis ve ark., 2015).



Şekil 2. IgG N-Glikan Yapılarının İnflammatuar Özellikleri
[Maverakis ve ark., 2015 esinlenerek yeniden tasarlanmıştır]

Glikan yapılarındaki farklılıkların inflammatuar süreçler üzerindeki etkileri ve bu yapıların otoimmün hastalıkların tanısındaki potansiyel rolü, sağlıklı ve hasta bireylerin karşılaştırıldığı çok sayıda bilimsel çalışmaya konu olmuştur. Günümüzde gelişen analitik teknolojiler sayesinde, glikan yapılarının detaylı bir şekilde karakterize edilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu ilerlemeler ışığında, glikan profillerinin otoimmün hastalıkların teşhisinde güvenilir biyobelirteçler olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

3. GLİKAN YAPILARININ ANALİZİ

Glikanların profilinin çıkarılması, karakterizasyonu, yüksek verimli bir şekilde ayrılması ve analizi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlar arasında güncel olarak, hidrofilik etkileşim sıvı kromatografisi (HILIC) (Wuhrer ve ark., 2009), kapiller elektroforez (CE) (Lu ve ark., 2018), matris destekli lazer desorpsiyon/ionizasyon kütle spektrometrisi (MALDI-MS) (Hu & Mechref, 2012), elektrosprey iyonizasyon kütle spektrometrisi (ESI-MS) (Stadlmann ve ark., 2008), sıvı kromatografisi-kütle spektrometrisi (LC-MS) (Wuhrer ve ark., 2004), nükleer manyetik rezonans (NMR) (Lundborg & Widmalm, 2011) ve glikan mikrodizi (Liang ve ark., 2008) yöntemleri sayılabilir.

Glikan yapılarının analizi önemli ve karmaşık süreçleri içerir. Özellikle düşük seviyelerdeki glikanların tanımlanması ve yapısal analizi için belirli ön işlemlere tabi tutulması gerekir. Genel olarak glikan analizi için uygulanan iş akış sürecine bakıldığında, örneklerin hazırlanması, glikanların ayrımı, glikan analizi, elde edilen verilerin yorumlanması ve son olarak glikan yapıların karakterizasyonu aşamalarını içermektedir (Tekin & Gurbanov, 2024). Glikanları, protein veya peptid omurgasından ayırmak amacıyla başlanan örneklerin hazırlanma sürecinde genellikle kimyasal (alkali borohidrit ile hidrazinoliz veya β -eliminasyon) veya enzimatik (PNGase F veya Endo H) sindirim yöntemleri kullanılır (Paton ve ark., 2021). Hazırlanan örnekler, karmaşık biyolojik matristen sahip oldukları yük, boyut ve çeşitli fizikokimyasal özelliklerine göre ayrılmalıdır. Glikan ayrımı için yaygın olarak, kromatografi (iyon değiştirme kromatografisi-IEC, boyut dışlama kromatografisi- SEC, yüksek performanslı sıvı kromatografisi-HPLC, hidrofilik etkileşim sıvı kromatografisi-HILIC, afinite

kromatografisi), elektroforez (poliakrilamid jel elektroforezi-PAGE, kapiller elektroforez-CE) ve kütle spektrometrisi gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Buszewski & Noga, 2012; Mahan ve ark., 2015; Smith ve ark., 2017; Kosanović ve ark., 2017; Alvarez-Manilla ve ark., 2006; Iwaki & Hirabayashi, 2018). Farklı özelliklerine göre ayrılan glikanlar genellikle kütle spektrometrisi (MS), nükleer manyetik rezonans (NMR) ve glikan mikrodizi gibi analitik yöntemler kullanılarak analiz edilir. Analiz edilen örneklerden elde edilen veriler mevcut glikan veri tabanlarında karşılaştırılarak doğrulanır. Son aşamada ise tespit edilen spesifik glikanların, teşhis veya tedavi amacıyla kullanılmak üzere biyolojik fonksiyonlarının karakterizasyonu gerçekleştirilir (Tekin & Gurbanov, 2024). Glikan yapılarının analizi, daha önceki çalışmalarımızda kapsamlı bir şekilde incelenmiş olup (Tekin & Gurbanov, 2024), bu çalışmada söz konusu bölüme kısaca değinilmiştir.

4. OTOİMMÜN HASTALIKLARDA BELİRLenen GLİKAN YAPILARI

Otoimmün inflamatuvar hastalıklarda glikan biyobelirteçlerin kullanımı, tanı ve tedavi süreçlerinde önemli bir alan olarak dikkat çekmektedir. Otoimmün hastalıklarda, glikosilasyon profillerinde proinflamatuvar bir immün yanıtı tetikleyecek nitelikte değişiklikler tespit edilmiştir. Bu değişiklikler tanı, prognoz ve tedavi takibinde önemli rol oynayan biyobelirteçler olarak kullanılabilir (Tektonidou & Ward, 2011; Giacomelli ve ark., 2019). Ayrıca, glikosilasyon süreci hem sağlıklı hem de patolojik hücrelerde gerçekleşmekle birlikte, her bir otoimmün hastalığın kendine özgü glikan imzaları taşıyabileceği hipotezi ileri sürülmektedir (Ohtsubo & Marth, 2006). Bölgeye özgü glikan imzaları, proteinlerdeki farklı glikan yapılarının miktarı ve yapısal özellikleri ölçülerek belirlenebilmektedir (Maverakis ve ark., 2015). Glikan analizi özellikle serum/plazma örnekleri (IgG, alfa-2-makroglobin vb.), doku örnekleri (sinovyal membran, böbrek dokusu vb.), biyolojik sıvılar (idrar, tükürük, gözyaşı vb.) ve hücre yüzey glikanları gibi farklı biyolojik örnek tipleri kullanılarak gerçekleştirilebilir (Etxebarria & Reichardt, 2016; Zou ve ark., 2017). Hangi örnek tipinin kullanılacağı, hastalığın türü, glikan biyobelirtecine kaynağı ve analiz metodolojisine bağlıdır.

4.1. Tip 1 Diyabet

Tip 1 diyabet (T1DM), genellikle çocukluk ve ergenlik döneminde başlayan, pankreastaki insülin üreten β hücrelerinin, T hücreleri (CD4+ ve CD8+) ve adacık hücrelerine karşı oluşan otoantikorlar nedeniyle tahrip olması sonucu ortaya çıkan kronik bir otoimmün hastalıktır (Ziegler ve ark., 2013; Gillespie, 2006). Bu otoantikorların pankreas üzerinde meydana getirdiği hasar, diyabetin karakteristik bir özelliği olan düşük insülin seviyelerine bağlı olarak kalıcı hiperglisemiye neden olur (Gillespie, 2006). T1DM, klinik bulguların ağırlıklı olarak diyabet yaşamın erken dönemlerinde ortaya çıkmasına rağmen, literatürde yetişkinlik döneminde ortaya çıkan vakalar da bildirilmektedir (Maahs ve ark., 2010). Hastalığın erken evrede tanınması, morbiditeyi azaltma ve hastaların yaşam kalitesi ile prognozu iyileştirme potansiyeli nedeniyle, etkin tanısal yöntemlerin geliştirilmesi ve tedavi stratejilerinin optimize edilmesi kritik önem taşımaktadır (Katsarou ve ark., 2017). Bu bağlamda, son yıllarda yürütülen araştırmalar, glikanların patogenezdaki rolü ve terapötik hedef olarak kullanımına yönelik ilgiyi artırmış; bu moleküllerin diyabet yönetimindeki potansiyel katkılarına dair kanıtlar giderek güçlenmiştir (Sharma ve ark., 2024).

T1DM ile ilişkili glikozilasyon süreçlerini inceleyen bir çalışmada, T1DM hastalarında spesifik bir glikoprotein olan α 1-asit glikoprotein (AGP) α 3-fukozilasyon düzeylerinde artış olduğu ve bu artışın vasküler fonksiyon bozuklukları ile korelasyon gösterdiği bildirilmiştir. Bu bulgu, α 3-fukozilasyon modifikasyonunun, T1DM hastalarında vasküler komplikasyonların erken tanısı ve izlenmesinde potansiyel bir biyobelirteç olarak kullanılabileceğine işaret etmektedir (Poland ve ark., 2001). Son yıllarda yapılan bir çalışmada, böbrek hastalığı komplikasyonu bulunan T1DM hastalarında hem serum proteinlerinin N-glikosilasyon profili hem de immünoglobulin G (IgG) N-glikan yapılarındaki değişiklikler incelenmiştir. Çalışmada, toplam serum proteinlerinde yüksek derecede dallanmış N-glikanların (üç antenli ve dört antenli glikanlar) arttığı, buna karşılık iki antenli N-glikanların azaldığı gözlemlenmiştir. IgG N-glikan profili analizinde ise, iki antenli yapılar arasında galaktosile edilmiş ve sialile edilmiş formların arttığı, monogalaktozile edilmiş iki antenli glikanların ise azaldığı tespit edilmiştir (Bermingham ve ark., 2018). Yakın zamanda gerçekleştirilen bir başka çalışmada, yeni tanı almış T1DM'li çocukların plazma proteinleri ve IgG N-glikomları detaylı bir şekilde karakterize edilmiştir. Sağlıklı kardeşleriyle karşılaştırıldığında, bu çocuklarda hastalığın başlangıcında yüksek mannoz içeren glikanların ve ikiye ayrılan GlcNAc yapılarının oranında artış olduğu, IgG disialilasyonunda artış, asialilasyonda azalma ve monogalaktozilasyonda azalma gözlemlenmiştir. Bu bulgular, T1DM'nin erken tanısında biyobelirteç olarak kullanılabilecek potansiyel glikan modifikasyonlarını işaret etmektedir (Rudman ve ark., 2022). Benzer şekilde, T1DM'li erişkin bireyler üzerinde yapılan bir çalışmada, serum proteinlerinin N-glikosilasyon profili incelenmiş ve çocuklarda görülen yapılarla hem benzerlikler hem de farklılıklar tespit edilmiştir. Örneğin, monogalaktozilasyondaki azalma her iki grupta da ortakken, erişkinlerde digalaktozilasyon, monosialilasyon ve anten fukosilasyonunda artış gözlemlenmiştir. Bu değişikliklerin, glikoz metabolizmasındaki bozukluklar ve eşlik eden inflamatuvar süreçlerle ilişkili olabileceği öne sürülmüştür. Ayrıca, çocuklarda T1DM başlangıcında görülen yüksek mannozlu ve ikiye ayrılan GlcNAc yapılarının erişkinlerde bulunmaması, bu glikan modifikasyonlarının çocuklara özgü patofizyolojik bir özellik olabileceğini düşündürmektedir (Nemčić ve ark., 2023).

IgA, insan plazmasında en çok bulunan ikinci immünoglobulindir (Kerr, 1990) ve serum IgA'nın N-glikosilasyonu şu ana kadar yeterince araştırılmamıştır. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada hem çocuk hem de yetişkin T1DM hastalarındaki IgA N-glikan yapıları tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre, çocuklar ve yetişkinler arasında IgA N-glikosilasyonunda önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Çocuklarda, çekirdek yapısı N-asetilglikozamin ve beş mannoz kalıntısından oluşan yalnızca bir glikan özelliğindeki artışın T1DM ile ilişkisi tespit edilmiştir. Yetişkinlerde ise, yüksek derecede dallanmış glikanlar, trisialile edilmiş ve trigalaktozile edilmiş yapılarda artış gözlemlenmiştir. T1DM'nin başlangıcında çocuk ve yetişkinler arasındaki bu farklılıklar, IgA N-glikosilasyonunun hastalığın başlangıcıyla güçlü bir şekilde ilişkili olmadığını ancak bağışıklık tepkileri ve inflamatuvar süreçlerde etkileri olabileceğini ortaya koymaktadır (Nemčić ve ark., 2024). Elde edilen sonuçlardaki glikosilasyon farklılıkları, IgA'nın T1DM için biyobelirteç olarak kullanımına yönelik daha fazla araştırma yapılması gerekliliğini vurgulamaktadır. Literatürde T1DM ile ilişkili glikan yapılarındaki değişiklikleri inceleyen çalışmaların bir kısmı, Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Tip 1 Diyabet (T1DM) Hastalığı ile İlişkili Glikan Profilleri

Protein	Çalışma Grubu	Glikosilasyon	Kaynak
<i>α1-asit glikoprotein</i>	T1DM hastaları	α 3-fukozilasyon	Poland ve ark., 2001
<i>Toplam serum proteinleri</i>	Böbrek hastalığına sahip diyabet hastaları	Yüksek derecede dallanmış N-glikanlarda artma	Bermingham ve ark., 2018
<i>IgG</i>		İki antenli N-glikanlarda azalma Galaktosile edilmiş ve sialile edilmiş iki antenli yapılarda artma Monogalaktosile edilmiş iki antenli glikanlarda bir azalma	
<i>Plazma proteinleri ve IgG</i>	Çocuklar	Yüksek mannozlu ve ikiye ayrılan GlcNAc yapılarının oranında artma IgG disialilasyonunda artış asialilasyonda azalma ve monogalaktosilasyonda azalma	Rudman ve ark., 2022
<i>Serum proteinleri</i>	Yetişkinler	Monogalaktosilasyonda azalma (çocuklarla benzer) Digalaktosilasyon, monosialilasyon ve anten fukosilasyonunda artma (çocuklardan farklı)	Nemčić ve ark., 2023
<i>IgA</i>	Çocuklar	Çekirdek yapısı N-asetilglikozamin ve beş mannoz kalıntısından oluşan yalnızca bir glikan yapısında artma	Nemčić ve ark., 2024
	Yetişkinler	Yüksek derecede dallanmış glikanlar, trisialile edilmiş ve trigalaktosile edilmiş yapılarda artma	

4.2. Romatoid Artrit

Romatoid artrit (RA), dünya çapında nüfusun %1-2'sini etkileyen ve eklemlerin sinoviyal membranında, kemik ve kıkırdak dokusunda geri dönüşü olmayan eklem hasarlarına neden olan en yaygın kronik inflamatuvar otoimmün bir hastalıktır (Cojocar ve ark., 2010). Sinoviyal eklemlerin yanı sıra daha az sıklıkla kalp, böbrek, sindirim sistemi, akciğer, göz cilt ve sinir sistemi gibi eklem dışı organlara da etki edebilir (Radu & Bungau, 2021). Hastalık sürecinde, immün yanıtta anormallikler, otoantikorların yanı sıra romatoid faktörlerin (RF) ve sitrulinasyon (ACPA), karbamilasyon (aCarP) ve asetilasyon (AAPA) gibi çeşitli transilasyon sonrası modifikasyonlara karşı gelişen antikorları içeren anti-modifiye protein antikorlarının (AMPA) oluşumuna neden olmaktadır (Scherer ve ark., 2020). Hastalık tedavi edilmediği sürece sakatlığa ve ölüme neden olabileceğinden erken teşhis edilip tedavi edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle hastalığın ilk evrelerinde ortaya çıkan belirteçlerin

tespit edilmesi hastalığın erken teşhis edilmesine yardımcı olabilir (Kolarz ve ark., 2021). Mevcut biyobelirteçler arasında RF, anti-sitrülinlenmiş protein antikorları (ACPA), C-reaktif protein (CRP) ve siklik sitrulinlenmiş peptitleri (CCP) tanıyan otoantikorlar sayılabilir (Li ve ark., 2019). Ancak bu biyobelirteçlerin yüksek duyarlılık ve özgüllükte olmamasından dolayı yeni biyobelirteçlerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

İmmünoglobulin G (IgG), insan serumunda en bol bulunan glikoproteindir ve IgG glikosilasyonundaki anormalliklerin romatoid artrit de dahil olmak üzere çeşitli otoimmün hastalıkların patogeneğinde önemli olduğu doğrulanmıştır. Otoimmün hastalıklar arasında özellikle RA, IgG glikosilasyon farklılıkları açısından kapsamlı olarak incelenmiştir (Deng ve ark., 2023). RA hastalığındaki otoimmün yanıt, özellikle ACPA'ların varlığı ile karakterize edilmektedir. RA hastalarında, ACPA-IgG immün komplekslerinin ve sağlıklı bireylerin IgG Fc bölgesi N-glikan yapıları arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır (Gyebrovski ve ark., 2022). Sağlıklı bireylerde IgG glikoproteinleri, Fc bölgesinin CH2 alanlarında yer alan asparajin 297 (Asn-297) pozisyonunda korunmuş iki antenli N-glikan yapıları içerir. Bu glikan yapısı, N-asetilglukozamin (GlcNAc) ve mannoz kalıntılarından oluşan bir çekirdek yapıya sahip olup, fukoz, galaktoz, sialik asit (NeuAc) ve ikiye bölen GlcNAc gibi modifikasyonlara uğrayabilir (Cobb, 2020). Bununla birlikte, ACPA-IgG'lerin Fab bölgesinde N-glikanlar bulunduğu ve bu glikanların tamamen galaktosile ve sialile edilmiş iki antenli N-glikanlar olduğu tespit edilmiştir (Hafkenschied ve ark., 2017; Rombouts ve ark., 2016). Yakın zamanda yapılan bir çalışmada, ACPA-IgG Fab N-glikanlarının varlığının, hastalık öncesi dönemde RA gelişimini öngörüp öngöremeyeceği araştırılmıştır. Bu çalışmada, RA hastaları ve bu hastaların birinci derece yakın akrabalarından alınan serum ACPA-IgG kompleksleri incelenmiştir. Sonuçlar, akrabalarından alınan ACPA-IgG'lerin Fab bölgesi glikan seviyelerinin, RA hastalarından alınan örneklerle karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha düşük olduğunu göstermiştir. Akrabalar alt gruplara ayrıldığında, özellikle daha sonra RA geliştiren bireylerin, hastalık başlangıcından çok önce yüksek düzeyde Fab bölgesi glikosilasyonuna sahip olduğu gözlemlenmiştir (Hafkenschied ve ark., 2019). Benzer şekilde, başka bir çalışmada da RA hastalığının başlangıcından önce ACPA-IgG Fab bölgesinde artan glikosilasyon olduğu bildirilmiştir. Bu çalışmada, RA'nin farklı evrelerindeki bireylerden alınan örnekler, semptomsuz sağlıklı bireylerden alınan ACPA-IgG'ler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sağlıklı bireylerdeki ACPA-IgG Fab bölgesi glikosilasyonunun, pre-RA fazına doğru önemli ölçüde arttığını ve hastalık başlangıcında daha da yükseldiğini göstermiştir (Kissel ve ark., 2022). Bu bulgular, ACPA-IgG Fab bölgesinin yoğun glikosilasyonunun, ACPA-pozitif bireylerde RA'nin erken tanısı için potansiyel bir biyobelirteç olarak kullanılabileceğini düşündürmektedir. Bu glikan modifikasyonlarının, RA patogeneindeki rolü ve hastalık öncesi dönemdeki tanısallığı, gelecekteki araştırmalarla daha detaylı incelenmelidir.

RA hastalığı ile ilgili diğer bir araştırma alanı, sağlıklı bireyler ile hasta bireyler arasındaki anormal IgG N-glikolizasyon yapılarının karşılaştırılmasıdır. Bu alanda ilk çalışma Parekh ve arkadaşları (1985) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre RA hastalarında sağlıklı bireylere göre galaktosilasyonun önemli ölçüde azaldığı ve bunun sonucunda antenlerin birinde veya her ikisinde terminal GlcNAc kalıntılarına sahip karmaşık iki antenli N-glikanların arttığı tespit edilmiştir

(Parekh ve ark., 1985). Sonraki yıllarda yapılan çok sayıda çalışmada, farklı yöntemler kullanılarak analiz edilen anormal IgG N-glikolizasyon yapılarında agalaktosile edilmiş IgG glikoformlarının varlığı doğrulanmıştır (Parekh ve ark., 1988; Martin ve ark., 2001; Sun ve ark., 2019; Su ve ark., 2020; Huang ve ark., 2017). Bu çalışmalar doğrultusunda RA hastalarının serum IgG agalaktosilasyonunun bu hastalığa ait bir özellik olduğu ve bir biyobelirteç olarak kullanılabileceği söylenebilir. Ayrıca IgG'nin anormal glikosilasyonunun RF üretimine neden olabileceği bildirilmiştir (Gińdzieńska-Sieškiewicz ve ark., 2016). Düşük galaktosilasyon seviyelerinin tespitinden sonra sialilasyon ve fukosilasyon seviyeleri araştırılmıştır. Yapılan araştırmaların sonucuna göre RA hastalarında agalaktosilasyona ek olarak azalan sialilasyon ve artan fukosilasyon tespit edilmiştir (Su ve ark., 2020; Huang ve ark., 2017; Gudelj ve ark., 2018). Bu çalışmalardan farklı olarak hamilelik sırasında RA hastalarında IgG glikosilasyonu seviyelerindeki değişiklikler izlenmiş ve diğer RA hastalarına kıyasla bazı değişiklikler gözlemlenmiştir. Birbirini destekleyen bu çalışmaların genel bulguları, RA hastalarının büyük çoğunluğunda hamilelik döneminde IgG galaktosilasyon seviyelerinin arttığını, bu dönemde hastalık aktivitesinin azaldığını, ancak doğum sonrasında hastalığın tekrar nüks ettiğini ortaya koymaktadır (Rook ve ark., 1991; De Man ve ark., 2008; Van de Geijn ve ark., 2009; Bondt ve ark., 2013). Özellikle hamile RA hastalarında artan IgG galaktosilasyon seviyelerinin, hastalık aktivitesiyle doğrudan ilişkili olduğunun tespit edilmesi (Van de Geijn ve ark., 2009), IgG galaktosilasyonundaki değişikliklerin RA'nın tanı ve izlem süreçlerinde kritik bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

RA'nın erken tanısı ve tedavisinde, IgG glikosilasyonundaki değişikliklerin analizi önemli bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, RA hastalık aktivitesini değerlendirmek amacıyla farklı vücut sıvılarındaki N-glikan yapıları ve çeşitli serum glikoproteinlerinin seviyeleri de incelenmektedir. Özellikle lipopolisakkarit bağlayıcı proteinin (LBP), RA tanısında hassas bir biyobelirteç olabileceği gösterilmiştir (Wen ve ark., 2018). Yapılan bir çalışmada, RA hastalarının serum glikoproteinlerindeki glikosilasyon seviyeleri analiz edilmiş ve bu değişikliklerin RA ile ilişkisi ortaya konmuştur. Çalışmada, LBP ve kortikosteroid bağlayıcı globulin (CBG) gibi iki spesifik glikoprotein üzerinde odaklanılmıştır. RA hastalarında, LBP ve CBG'nin glikosilasyon seviyelerinin azaldığı gözlemlenmiştir. İleri çalışmalar için bu N-glikan yapılarının yapısal karakterizasyonu gerekmele birlikte, glikosilasyondaki bu azalmanın RA ile güçlü bir ilişkiye sahip olduğu öne sürülmüştür (Ciregia ve ark., 2020). Son yıllarda yapılan bir başka çalışmada ise, ilk kez RA ve osteoartrit (OA) hastalarından alınan sinoviyal sıvılarda N-glikoproteomik analiz gerçekleştirilmiş ve RA patogeneziyle ilişkili çok sayıda N-glikan tanımlanmıştır. RA ve OA hastalarına ait örneklerin karşılaştırmalı analizi sonucunda, 60 RA-spesifik ve 4 OA-spesifik N-glikan tespit edilmiştir. RA'da gözlemlenen bu glikanların çoğunlukla yüksek mannoz içeren, kompleks tip ve fukozile edilmiş glikanlar olduğu belirlenmiştir (Xu ve ark., 2023). Sonuç olarak, RA teşhisinde biyobelirteç olarak kullanılabilecek çeşitli otoantikörlerin ve serum glikoproteinlerinin glikosilasyon değişiklikleri, birçok çalışmada incelenmiş ve bu bulguların bir kısmı Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Romatoid Artrit (RA) ilişkili Glikan profilleri (ACPA: Anti-sitrülinlenmiş protein antikorları, OA: Osteoartrit, LBP: Lipopolisakkarit bağlayıcı protein, CBG: Kortikosteroid bağlayıcı globülin)

Protein	Çalışma Grubu	Glikosilasyon	Kaynak
ACPA-IgG Fab N-glikanları	RA hastaları	Tamamen galaktosile ve sialile edilmiş iki antenli N-glikanlar	Hafkenscheid ve ark., 2017 Rombouts ve ark., 2016
ACPA-IgG Fab N-glikanları	RA hastaları ve birinci derece yakın akrabaları	Akrabalardan alınan ACPA-IgG'lerin RA hastalarından alınan örneklerle kıyaslanmasıyla önemli ölçüde daha düşük Fab alanı glikan seviyeleri Akrabalar alt kümelerine ayrıldığında daha sonra RA geliştirenlerin hastalığın başlangıcından çok önce tespit edilebilen yüksek düzeyde Fab alanı glikosilasyonu	Hafkenscheid ve ark., 2019
ACPA-IgG Fab N-glikanları	Sağlıklı bireyler ve RA hastaları	Sağlıklı bireylere kıyasla RA öncesinde ve başlangıcında artan Fab alanı glikosilasyonu	Kissel ve ark., 2022
IgG	RA hastaları	Önemli ölçüde azalan galaktosilasyon Buna bağlı olarak antenlerin birinde veya her ikisinde terminal GlcNAc kalıntılarına sahip karmaşık iki antenli N-glikanlarda artış	Parekh ve ark., 1985; Parekh ve ark., 1988; Martin ve ark., 2001; Sun ve ark., 2019; Su ve ark., 2020; Huang ve ark., 2017
IgG	RA hastaları	Galaktosilasyon ve sialilasyonda azalış Fukosilasyonda artış	Su ve ark., 2020; Huang ve ark., 2017; Gudelj ve ark., 2018
IgG	Hamilelik	RA hastalarının büyük çoğunluğunda hamilelik döneminde IgG galaktosilasyonunununda artış	Rook ve ark., 1991; De Man ve ark., 2008; Van de Geijn ve ark., 2009; Bondt ve ark., 2013

Serum glikoproteinleri	RA hastaları	LBP ve CBG glikoproteinlerinde azalan glikosilasyon	Ciregia ve ark., 2020
Sinoviyal sıvı N-glikanları	RA ve OA hastaları	Yüksek mannoz içeren, kompleks tip ve fukozile edilmiş RA spesifik N-glikanlar	Xu ve ark., 2023

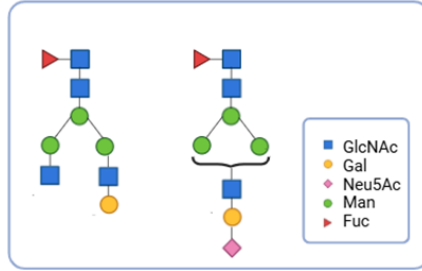
4.3. Sistemik Lupus Eritematozus

Sistemik lupus eritematozus (SLE), cilt, eklemler, merkezi sinir sistemi ve böbrekler gibi birçok organı etkileyebilen kronik otoimmün bir hastalıktır (Kaul ve ark., 2016). Dünya çapında yaygın olarak görülen SLE, cinsiyet, ırk/etnik grup, yaş ve bölgesel farklılıklara bağlı olarak farklı seviyelerde görülebilir. Hastalığın prevalansının kadınlarda erkeklere kıyasla daha yüksek olduğu bulunmuştur. Özellikle doğurganlık çağındaki kadınların daha yüksek SLE riski taşıması, hastalığın gelişiminde hormonların anahtar rol oynadığını düşündürmektedir (Danchenko ve ark., 2006; Pons-Estel ve ark., 2017). Bunun dışında genetik ve çevresel faktörler de SLE gelişimini etkilemektedir. Bu etkiler, B ve T hücreleri, sitokinler ve makrofajların seviyelerinde immün düzensizliklere neden olarak bağışıklık sisteminde kusurlar ortaya çıkarabilir. Hastalığın geç tanımlanması, hayati organlarda hasarın artmasına sebep olabilir (Kaul ve ark., 2016). SLE çoklu otoantikorlarla karakterizedir ve antinükleer antikor (ANA), anti-çift sarmallı DNA (dsDNA) antikor ve anti-Smith (Sm) antikor gibi mevcut otoantikorların farklı otoimmün ve inflamatuvar hastalıklarla ilişkili olduğu bildirilmiştir (Ippolito ve ark., 2011). Dolayısıyla düşük özgüllüğe sahip bu biyobelirteçler yerine, erken tanı için ideal yeni belirteçlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Önceki yıllarda yapılan çalışmalarda SLE hastalarında RA'ya benzer şekilde IgG'de galaktosilasyon eksikliği rapor edilmiştir. SLE, Sjögren sendromu (SS) ve Crohn hastalığı (CD) gibi farklı otoimmün ve inflamatuvar hastalıklarda IgG'de galaktoz eksikliğinin tespit edilmesi bu durumun ortak bir özellik olduğunu düşündürmektedir (Tomana ve ark., 1988; Tomana ve ark., 1992; Pilkington ve ark., 1995). Bu nedenle ilerleyen dönemde, benzer gruplardaki hastalar için her bir hastalığa özgü farklılıkları ayırt edecek çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla yapılan bir çalışmada RA hastaları ile SLE hastalarının sialile edilmiş serum IgG seviyeleri karşılaştırılmış ve SLE'li hastalarda IgG'nin önemli ölçüde daha az sialile edildiği bulunmuştur (Chen ve ark., 2015). Sjöwall ve arkadaşları (2015) tarafından yürütülen bir çalışmada, serumdan spesifik olarak izole edilen IgG komplekslerinin lektin bağlanma analizi kullanılarak, IgG ile ilişkili fukosil kalıntıları ve fukosile edilmiş tri-mannoz N-glikan çekirdeği yapılarının incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma, SLE hastalarının hastalığın aktif ve inaktif dönemlerine ait ardışık serum örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, aktif SLE hastalarından alınan serum IgG komplekslerinin, fukosil kalıntılarını açığa çıkardığını ve bu kalıntıların, çözünür lektinler tarafından glikan çekirdeğine bağlanabildiğini göstermiştir (Sjöwall ve ark., 2015).

Geniş bir hasta grubu üzerinde yürütülen bir başka çalışmada, IgG galaktosilasyonundaki azalmanın yanı sıra sialilasyonda azalma ve ikiye bölen GlcNAc yapılarında artış olduğu bildirilmiştir (Vučković ve ark., 2015). Yakın zamanda SLE'ye

özgü biyobelirteçlerin geliştirilmesine yönelik yapılan bir çalışmada, seçilen 12 biyobelirteç arasından Şekil 3'te belirtilen IgG üzerindeki iki N-glikan yapısının, SLE tanısı için yüksek özgüllük ve duyarlılığa sahip olduğu gösterilmiştir. Bu iki N-glikan biyobelirtecini, RA ve SS gibi diğer otoimmün hastalıklardan ayırt etme kapasitesinin sınırlı olduğu, ancak ANA, anti-dsDNA ve anti-Sm gibi SLE ile ilişkili otoantikorlardan bağımsız olarak tanısız değer taşıdığı ortaya konmuştur (Pan ve ark., 2023).



Şekil 3. Sistemik Lupus Eritematozus (SLE) Tanısı İçin Belirlenen N-glikan Biyobelirteçlerinin Yapısal Gösterimi
[Pan ve ark., 2023 esinlenerek yeniden tasarlanmıştır].

SLE, bağışıklık sisteminin vücudun kendi dokularına saldırdığı ve çoğunlukla böbrekler olmak üzere çeşitli organları etkileyebileceği bir otoimmün hastalıktır. SLE böbrek iltihabına yol açtığında, bu durum lupus nefriti (LN) olarak adlandırılmaktadır (Almaani ve ark., 2017). SLE hastalarında LN prevalansı farklı popülasyonlara göre önemli ölçüde değişmekte ve genellikle hastalığın başlangıcından sonraki beş yıl içinde gelişmektedir (Mahajan ve ark., 2020). Tedaviye zamanında başlamak, hastalık aktivitesini ve terapötik yanıtı izlemek, hastalığın ilerlemesini ve ciddi böbrek hasarlarının önüne geçebilmek için SLE hastalarındaki LN tanısına ait biyobelirteçler geliştirilmektedir. Tanı koymada serolojik biyobelirteçler (anti-dsDNA antikorlar, anti-C1q antikorları vb.), idrar biyobelirteçleri (proteinüri, pro-inflamatuar sitokinler/kemokinler vb.) ve histolojik biyobelirteçler (böbrek biyopsisi) temel olarak çalışılmaktadır (Renaudineau ve ark., 2023). Özellikle böbrek biyopsisi LN tanısı için en önemli araçtır. Ancak bu yöntem, invazivlik, yüksek maliyet ve hastalığın sürekli olarak izlenememesi gibi bazı sınırlamalara sahiptir (Yao ve ark., 2020). Bu sınırlamaları ortadan kaldıran, güvenilir ve özellikle noninvaziv özellikli biyobelirteçlerin geliştirilmesi gerekmektedir. LN'yi, sağlıklı kontrol örneklerinden ve diğer böbrek hastalıklarından ayırmak için N-glikan özellikleri incelendiğinde, LN hastalarının sağlıklı kontrollere kıyasla yüksek oranda mannozla zenginleştirilmiş N-glikanlara sahip olduğu ve bu mannosilasyon seviyelerinin LN tayininde yüksek özgüllüğe sahip olduğu belirlenmiştir (Alves ve ark., 2021). LN'nin, kadınlarda erkeklere kıyasla daha sık görüldüğü bildirilmiştir. Dolayısıyla sadece kadın hastalar üzerinde yapılan bir çalışmada, LN'li ve LN'siz SLE hastalarındaki IgG N-glikan profilleri incelenmiştir. Sonuçlara göre LN'li hastalarda sialilasyon, galaktozilasyon ve çekirdek fukozilasyonunun azalma ve ikiye bölen GlcNAc yapılarında artış gözlemlenmiştir. Bulgular, elde edilen glikan yapılarının LN gelişiminde rol oynadığını ve SLE hastaları arasında LN tanısı için potansiyel biyobelirteç olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Lu ve ark., 2023). Başka bir çalışmada, yeni tanı

almış SLE hastalarında LN ile anti-dsDNA IgG antikorunun glikosilasyonundaki değişiklikler arasındaki ilişki incelenmiştir. Buna göre anti-dsDNA IgG siyalilasyonunun LN patogenezi ve prognozu ile yakından ilişkili olduğu bildirilmiştir (Yang ve ark., 2024). Literatürde mevcut olan ve Tablo 3’de özetlenen çalışmalara bakıldığında, SLE hastalığı ve buna bağlı olarak gelişen LN hastalığına ait tanı amacıyla kullanılabilecek glikan biyobelirteçler bulunmaktadır. Ancak bu belirteçlerin klinik olarak kullanılabilmesi için daha ileri çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Tablo 3. Sistemik Lupus Eritematozus (SLE) İlişkili Glikan Profilleri
(RA: Romatoid artrit, LN: Lupus nefriti)

Protein	Çalışma Grubu	Glikosilasyon	Kaynak
IgG	SLE hastaları	Galaktosilasyonda azalma	Tomana ve ark., 1988; Tomana ve ark., 1992; Pilkington ve ark., 1995
IgG	RA ve SLE hastaları	SLE’li hastalarda IgG’nin önemli ölçüde daha az siyalilasyonu	Chen ve ark., 2015
IgG	Aktif ve aktif olmayan SLE hastaları	Aktif SLE hastaları IgG komplekslerinde fukozil kalıntıları	Sjöwall ve ark., 2015
IgG	SLE hastaları	Galaktosilasyonda azalma Azalan siyalilasyon ve artan ikiye bölen GlcNAc yapıları	Vučković ve ark., 2015
N-glikanlar	LN’li hastalar ve sağlıklı kontroller	LN’li hastalarda yüksek oranda mannozla zenginleştirilmiş N-glikanlar	Alves ve ark., 2021
IgG	LN’li ve LN’siz kadın SLE hastaları	LN’li hastalarda siyalilasyon, galaktozilasyon ve çekirdek fukozilasyonunun azalma ve ikiye bölen GlcNAc yapılarında artma	Lu ve ark., 2023
Anti-dsDNA IgG	LN’li SLE hastaları	Anti-dsDNA IgG siyalilasyonu	Yang ve ark., 2024

4.4. Otoimmün Tiroid Hastalıkları

En yaygın otoimmün hastalıklar arasında yer alan otoimmün tiroid hastalığı (AITD), tiroid bezinin fonksiyonunu bozan organa özgü bozuklukları içermektedir. Bağımsızlık sistemi, kendi tiroid antijenlerine karşı tolerans gösteremez ve bu antijenlere özgü otoantikorlar geliştirir. Graves hastalığı (GD) ve Hashimoto tiroidi (HT) en sık görülen formlarıdır (Ai ve ark., 2003; Lee ve ark., 2015). Bu hastalıklar, genetik ve çevresel faktörler arasındaki etkileşimler sonucu gelişmektedir. Çalışmalar, hastalığın gelişiminde çeşitli duyarlılık genlerinin (FOXP3, HLA, CD25, CD40, CTLA-4) etki ettiği kalıtsal faktörleri doğrulamaktadır (Lee ve ark., 2015). AITD’de genellikle anti-tiroid

peroksidaz (TPO), anti-tiroglobulin (Tg) ve anti-tiroid uyarıcı hormon reseptörü (TSHR) olmak üzere üç ana otoantikorlarının üretimi gerçekleştirilir. Anti-TPO ve anti-Tg antikorlarının prevalansı GD ve HT'nin her ikisinde de yüksekken, anti-TSHR antikorları GD hastalığı için karakterizedir (Fröhlich & Wahl, 2017).

Farklı otoimmün tiroit hastalıklarına (HT, GD, papiller tiroid karsinomu /PTC, histolojik lenfositik tiroititli PTC /PTC-T) sahip bireylerdeki tiroglobulin otoantikoru (TgAb) üzerine yapılan bir çalışmada, TgAb'nin fukosilasyon ve sialilasyon seviyelerinde farklılıklar gözlemlenmiştir. HT hastalarındaki TgAb'nin çekirdek fukoz içeriği diğer hastalık gruplarına göre daha düşük seviyedeysen, PTC-T hastalarında HT ve GD hastalarına göre daha fazla sialile edilmiş TgAb bulunmuştur (Zhao ve ark., 2013). Sonraki yıllarda yapılan bir çalışmada, HT hastaları ile sağlıklı kontrol grubu arasında serum tiroglobulin antikoru (TgAb) IgG glikosilasyon seviyeleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, HT hastalarının TgAb IgG'sinde mannoz, terminal sialik asit, çekirdek fukozu ve Gal(β1-4)GlcNAc(β1-2) mannoz glikan yapılarının, sağlıklı kontrollere kıyasla anlamlı derecede daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Yuan ve ark., 2015). Sonuç olarak TgAb'nin glikosilasyon farklılıklarının, HT patogenezi üzerindeki rolünün araştırılması ve biyobelirteç olarak kullanılmasında umut vadettiği söylenebilir.

AITD hastalarında merkezi bir rol oynayan tiroid otoantikorlarının hastalık patogenezindeki kesin mekanizmaları henüz tam olarak aydınlatılamamıştır. Bununla birlikte, daha önce yapılan çalışmalar, IgG glikosilasyonunun otoimmün hastalıklarda otoantikor fonksiyonlarını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur (Su ve ark., 2020; Huang ve ark., 2017; Chen ve ark., 2015). Bu kapsamda yürütülen bir çalışmada, tiroid peroksidaz otoantikorunun (TPOAb) AITD ile ilişkisi ve IgG glikosilasyonunun AITD patogenezindeki rolü araştırılmıştır. AITD'li ve TPOAb pozitif bireylerden alınan örneklerde, IgG çekirdek fukosilasyonu ve periferik kan mononükleer hücrelerinin anten α1,2 fukozilasyon seviyelerinin azaldığı tespit edilmiştir (Martin ve ark., 2020). Çalışma, azalan IgG çekirdek fukosilasyonunun, antikora bağımlı hücre aracılı sitotoksisteyi (ADCC) artırarak TPOAb ve AITD ile ilişkili yeni bir risk faktörü olabileceğini öne sürmektedir. Bununla birlikte, TPOAb ile AITD arasındaki ilişkinin tam olarak anlaşılabilmesi için daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

HT hastalığında şimdiye kadar serum IgG glikoproteinleri üzerinde yoğunlaşmış olmasına rağmen, diğer serum glikoproteinlerinin glikosilasyon profilleri yeterince araştırılmamıştır. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada, HT hastaları ve sağlıklı kontrollerden alınan serum örneklerinde IgG glikoproteini uzaklaştırılarak, kalan serum proteinlerinin N-glikan yapıları incelenmiştir. Sonuçlar, HT serumlarında monosialile edilmiş üç antenli ve disialile edilmiş diantener yapıların önemli ölçüde arttığını, ayrıca HT serum proteinlerinde çekirdek α1,6-fukozilasyonun azaldığını ve α2,3-sialilasyonun arttığını göstermiştir (Ząbczyńska ve ark., 2020). AITD'nin glikan profillerine ilişkin literatür bilgileri, RA ve SLE gibi diğer otoimmün hastalıklara kıyasla daha sınırlıdır. Bu alanda elde edilen bulguların bir kısmı Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Otoimmün Tiroid Hastalıklarının (AITD) Glikan Profilleri (TgAb: Tiroglobulin otoantikoru, HT: Hashimoto tiroidi, GD: Graves hastalığı, TPOAb: Tiroid peroksidaz otoantikoru)

Protein	Çalışma Grubu	Glikosilasyon	Kaynak
<i>TgAb</i>	HT, GD ve farklı otoimmün tiroid hastaları	HT hastalarındaki TgAb'nin çekirdek fukoz içeriği diğer hastalık gruplarına göre daha düşük seviyede	Zhao ve ark., 2013
<i>Serum TgAb-IgG</i>	HT hastaları ve sağlıklı kontroller	HT hastalarının TgAb IgG üzerinde mannoz, terminal sialik asit, çekirdek fukozu ve Gal(β1-4)GlcNAc(β1-2) Man glikan yapıları sağlıklı kontrollere göre daha yüksek oranda	Yuan ve ark., 2015
<i>IgG</i>	TPOAb pozitif bireyler	IgG çekirdek fukosilasyonunun ve periferik kan mononükleer hücrelerinin anten α1,2 fukozilasyonunun azalmış seviyeleri	Martin ve ark., 2020
<i>Serum glikoproteinleri (IgG hariç)</i>	HT hastaları ve sağlıklı kontrolleri	Serumda monosialile edilmiş üç antenli ve disialile edilmiş diantener yapılarda önemli ölçüde artış Serum proteinlerinde çekirdek α1,6-fukozilasyonunda azalış, 2,3-sialilasyonunda artış	Ząbczyńska ve ark., 2020

4.5. İnflamatuvar Bağırsak Hastalığı

İnflamatuvar bağırsak hastalığının (IBD) iki ana formu Crohn hastalığı (CD) ve Ülseratif kolitir (UC). CD sindirim sisteminin tamamını etkileyebilir ancak genellikle terminal ileum ve kolon bölgesi ile karakterizedir. UC ise kolon ve rektum mukozası ile sınırlıdır (İskandar & Ciorba 2012). IBD'nin çevresel faktörler ve genetik yatkınlık nedeniyle bağırsak mikrobiyotasına karşı anormal ve sürekli bir immün yanıtın tetiklenmesi sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir (Zhang & Li, 2014).

CD ve UC'nin erken tespiti veya hasta sonuçlarını tahmin etmek için mevcut belirteçlere ek olarak yeni biyobelirteçlere ihtiyaç vardır. Bu amaçla IBD'de bağırsak müsinlerinin glikosilasyon modelleri ve inflamasyonda rol oynayan glikoproteinlerin serum glikan seviyeleri gibi glikosilasyon profillerinin incelenmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Diğer otoimmün hastalıklara benzer şekilde IBD hastalarında da IgG'nin galaktosilasyonunda azalma tespit edilmiştir (Nakajima ve ark., 2011; Şimurina ve ark., 2018; Trbojevic Akmacic ve ark. 2015). Ayrıca IgG fukosilasyonunun, sağlıklı kontrollere kıyasla CD hastalarında arttığı UC hastalarında ise azaldığı rapor edilmiştir (Şimurina ve ark., 2018). IBD'li hastalar ve kontroller arasındaki IgG glikom bileşimindeki farklılıkları belirlemek için büyük bir çalışma

grubuyla yapılan bir çalışmada önceki çalışmalarla uyumlu olarak galaktosilasyonda önemli ölçüde azalma tespit edilmiştir. Buna ek olarak CD’de digalaktosile edilmiş IgG glikanlar üzerinde artan ikiye bölünmüş GlcNAc yapıları analiz edilmiştir (Trbojevic Akmacic ve ark. 2015). Sonraki dönemde Clerc ve arkadaşları (2018) tarafından 2635 IBD’li ve 996 sağlıklı kontrolü içeren büyük bir çalışma grubuyla plazma N-glikosilasyon profilleri incelenmiştir. Bu çalışmada hem CD hem de UC hastalarının plazma N-glikan profilleri sağlıklı kontrollerle karşılaştırılmış ve CD ile UC hastalarında iki antenli glikanların daha düşük, üç antenli ve dört antenli glikanların daha yüksek seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, hibrit ve yüksek mannozlu glikan yapılarının yanı sıra galaktosilasyon ve fukosilasyon seviyelerinin de daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. CD ve UC hastaları karşılaştırıldığında, CD hastalarında galaktosilasyon seviyelerinin daha düşük, diantennar fukosile glikanların sialilasyonunun daha yüksek ve özellikle fukozile edilmiş üç antenli glikanların $\alpha 2,3$ -sialilasyonunun arttığı bulunmuştur. Buna karşılık, UC hastalarında iki antenli glikanların fukosilasyon seviyelerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Clerc ve ark., 2018). Clerc ve arkadaşları (2023), CD ve UC hakkındaki bilgileri genişletmek ve invaziv olmayan biyobelirteçler geliştirmek amacıyla yaptıkları bir çalışmada, 188 CD, 254 UC hastası ve 120 sağlıklı kontrolden oluşan toplam 443 IBD örneğinde IgA1 ve IgA2 glikosilasyon yapılarını incelemiştir. Çalışma sonucunda, IBD hastaları ile sağlıklı kontroller arasında IgA1 ve IgA2 antikorları üzerindeki N- ve O-glikosilasyon yapılarında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. Ancak, bu bulguların CD’yi tanımlamak için kullanılabileceği, UC için ise düşük ayırım gücüne sahip olduğu belirtilmiştir. CD hastalarında, IgA yapılarının Asn144 ve Asn205 bölgelerindeki N-bağlı glikanların düşük galaktosilasyon ve sialilasyona sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca, CD ve UC hastalarının IgA1 antikorunun Ser89–126 bölgesindeki O-glikanlarında, sağlıklı kontrollere kıyasla daha az GalNAc bulunduğu ve CD hastalarında aynı bölgede sialilasyon seviyelerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Clerc ve ark., 2023). CD ve UC hastalarında gözlemlenen bu glikosilasyon farklılıklarının, IBD hastalarının tanımlanmasının yanı sıra hastalık alt tiplerinin ayırt edilmesine de katkıda bulunabileceği düşünülmektedir.

Gastrointestinal mukoza, yoğun şekilde glikosile edilmiş müsin glikoproteinleri içeren mukus ile kaplanmış epitelyal bariyerden oluşur. Goblet hücreleri tarafından salgılanan müsin (MUC2) N- ve O-glikosile edilmiş bir glikoproteindir (Hanić ve ark., 2019). Ancak MUC2 glikoproteinleri büyük oranda O-glikosile edilmiştir ve bu O-glikosilasyonun sindirim proteazlarına karşı koruma sağladığı bilinmektedir (Theodoratou ve ark., 2014). Literatürde MUC2 glikosilasyon yapılarını tanımlayan çeşitli çalışmalar vardır. Robbe Masselot ve arkadaşları (2023), yakın zamanda yaptıkları bir çalışmada, ilk kez CD hastalarının dışkı müsinlerindeki glikan yapılarını incelemiştir. Hasta ve sağlıklı kontroller arasında yapılan karşılaştırmada, CD’li bireylerde sialile edilmiş glikanların önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir (Robbe Masselot ve ark., 2023). Bu çalışma, bağırsak hastalıklarının erken teşhisi ve hastalık aktivitesinin belirlenmesi için serum N-glikan yapıları ile dışkıdaki müsin glikosilasyon profillerinin daha detaylı araştırılmasının, yeni noninvazif biyobelirteçlerin geliştirilmesine olanak sağlayabileceğini düşündürmektedir. IBD’ye ait incelenen glikan profilleri Tablo 5’te özetlenmiştir.

Tablo 5. İnflamatuvar Bağırsak Hastalığının (IBD) Glikan Profilleri
(CD: Crohn hastalığı, UC: Ülseratif kolit)

Protein	Çalışma Grubu	Glikosilasyon	Kaynak
<i>IgG</i>	IBD hastaları	Galaktosilasyonda azalma	Nakajima ve ark., 2011; Şimurina ve ark., 2018; Trbojevic Akmacic ve ark. 2015
<i>IgG</i>	CD ve UC hastaları	Fukosilasyonda; CD hastalarında artış UC hastalarında azalış	Şimurina ve ark., 2018
<i>IgG</i>	IBD hastaları	CD’de digalaktosile edilmiş IgG glikanlar üzerinde artan ikiye bölen GlcNAc yapıları	Trbojevic Akmacic ve ark. 2015
<i>Plazma N-glikan profilleri</i>	CD, UC ve sağlıklı kontrollerle karşılaştırma	Hastalarda daha düşük seviyelerde iki antenli, daha yüksek seviyelerde üç antenli ve dört antenli, daha düşük seviyelerde hibrit ve yüksek mannozlu glikan yapıları ve daha düşük galaktosilasyon ve fukosilasyon keşfedilmiştir CD ve UC hastaları karşılaştırıldığında; CD’ de galaktosilasyonun daha düşük seviyeleri, diantenner fukosile glikanların sialilasyonunun daha yüksek seviyeleri ve özellikle fukozile edilmiş üç antenli türlerin a2,3-sialilasyonu gözlemlenirken UC’ de iki antenli türlerin fukosilasyonunun daha düşük seviyeleri analiz edilmiştir	Clerc ve ark., 2018
<i>IgA</i>	CD, UC ve sağlıklı kontrollerle karşılaştırma	CD’de kontrol grubuna kıyasla Asn144 ve Asn205 bölgelerindeki N-glikanların düşük galaktosilasyon ve daha düşük sialilasyonu CD’nin IgA1 antikorunun Ser89–126 bölgesindeki O-glikanlarında sağlıklı kontrollere kıyasla daha düşük sialilasyon CD ve UC’nin IgA1 antikorunun Ser89–126 bölgesindeki O-glikanlarında kontrol grubuna göre daha az GalNAc	Clerc ve ark., 2023

<i>Dışkı müsin proteinleri</i>	Crohn hastaları	Crohn hastalığı olanlarda sialile edilmiş glikanlarda önemli bir azalma gözlemlenmiştir	Robbe Masselot ve ark., 2023
---------------------------------------	-----------------	---	------------------------------

5. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

İnsan ömrünün uzamasıyla birlikte, yaşam kalitesinin iyileştirilmesine yönelik çabalar ve yaşlanma sürecinde ortaya çıkan kronik hastalıkların erken teşhisi önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, hastalıkların klinik belirtiler ortaya çıkmadan tespiti veya başlangıç evresinin geciktirilmesi amacıyla plazma/serum N-glikom profillerinin biyobelirteç olarak kullanımına yönelik araştırmalar artan ilgi görmektedir (Crimmins ve ark., 2015; Cindrić ve ark., 2021). Otoimmün hastalıklar, yaygınlığı ve sıklıkla yaşamı tehdit edici komplikasyonları nedeniyle küresel bir sağlık sorunu olarak öne çıkmaktadır (Green ve ark., 2007). Bu hastalıklarda hem hedef doku proteinlerinin hem de immün sistem bileşenlerinin glikosilasyon modifikasyonlarında dinamik değişiklikler gözlenmektedir. Glikanların yapısal çeşitlilikleri ve hastalığa özgü modifikasyon kalıpları, erken tanı ve progresyon izleme süreçlerinde umut vaat eden biyobelirteçler olarak değerlendirilmektedir (Ząbczyńska ve ark., 2021). Glikan profillerinin, hastalık aktivitesi ve tedavi yanıtına bağlı olarak dinamik bir şekilde değişebilmesi, bu moleküllerin terapötik izlemde kullanımını desteklemektedir. Ayrıca, glikan tabanlı biyobelirteçlerin patogeneze mekanizmalarının aydınlatılmasına katkı sağlaması, yeni tedavi hedeflerinin belirlenmesine ve kişiselleştirilmiş tedavi stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanıyabilir (Lyman ve ark., 2022). Bununla birlikte, glikan biyobelirteçlerinin klinik uygulamaya entegrasyonu henüz erken aşamadadır. Glikan analizlerinin teknik olarak karmaşık, maliyetli ve ileri düzey analiz altyapısı gerektiriyor olması, klinik pratikte yaygın kullanımının önünde bir engel teşkil etmektedir. Ayrıca, glikan profillerindeki bireyler arası varyasyonun yüksekliği, standart biyobelirteç panellerinin oluşturulmasını güçleştirmektedir. Ancak son yıllarda yüksek verimli analiz teknolojilerinin gelişimi ve yapay zekâ destekli veri işleme yaklaşımlarının benimsenmesi, bu sınırlamaların aşılmasını mümkün kılabilir.

Glikan verilerinin kapsamlı analizi, biyoinformatik araçlar ve büyük veri analitik yöntemleriyle desteklenmekte, böylece klinik anlamlılığı yüksek glikan biyobelirteçlerin tanımlanması mümkün hale gelmektedir (Ettxebarria & Reichardt, 2016). Ancak, bu biyobelirteçlerin rutin klinik kullanıma entegrasyonu için standardizasyon, validasyon ve geniş hasta kohortlarında doğrulama çalışmaları gereklidir. Bu süreçte, hastalığın tüm evrelerini kapsayan longitudinal çalışmaların yanı sıra yaş, cinsiyet, çevresel maruziyetler ve epigenetik faktörler gibi demografik ve çevresel parametrelerin dikkate alınması kritik önem taşımaktadır (Shipman ve ark., 2020). Ayrıca, glikan analiz tekniklerinin yüksek tekrarlanabilirlik, duyarlılık ve özgüllük sağlayacak şekilde optimize edilmesi, klinik uygulamalarda tutarlı sonuçlar elde edilmesini garanti altına alacaktır. Uluslararası konsorsiyumlar aracılığıyla geliştirilecek protokoller, glikan biyobelirteçlerinin küresel ölçekte benimsenmesini hızlandırabilir. Analitik teknolojilerdeki ilerlemeler, glikan profillemenin doğruluğunu ve verimliliğini artırarak düşük maliyetli ve yüksek çıktılı platformların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Deng ve ark., 2024). Bu teknolojik yenilikler, özellikle kaynak kısıtlı ortamlarda glikan tabanlı tanı yöntemlerinin erişilebilirliğini artıracak potansiyele sahiptir. Aynı zamanda, glikan profillemeye ve biyoinformatik analizlerdeki

ilerlemeler, biyoloji, kimya, eczacılık, biyoinformatik ve biyoistatistik gibi bir çok alanı içeren multidisipliner işbirliğini teşvik etmektedir. Bu tür işbirlikleri, glikan biyobelirteçlerinin sadece tanı amaçlı değil, aynı zamanda terapötik hedefler ve ilaç geliştirme sürecinde de kullanılmasını sağlayabilir.

Son yıllarda yapay zeka ve makine öğrenimi algoritmalarının tıp alanındaki entegrasyonu, glikan biyobelirteçlerinin klinik potansiyelini dönüştürücü bir boyuta taşımaktadır (Stafford ve ark., 2020). Yapay zeka destekli modelleme, kompleks glikan veri kümelerindeki desenlerin tanımlanması, hastalık progresyonunun tahmini ve kişiselleştirilmiş tedavi algoritmalarının geliştirilmesi için güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır (Alkuhlani ve ark., 2021). Ayrıca, multi-omik entegrasyon (glikomik, proteomik, genomik) ile otoimmün hastalıkların moleküler mekanizmalarının sistematik olarak haritalandırılması mümkün hale gelmektedir (Bojar & Lisacek, 2022). Yapay zeka tabanlı tarama yöntemleri, mevcut veritabanlarında gizli kalmış glikan biyobelirteçlerinin keşfedilmesine ve risk stratifikasyon modellerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir (Li ve ark., 2022). Sonuç olarak, glikanların otoimmün hastalıklarda biyobelirteç olarak kullanımı, mevcut teknolojik ve metodolojik ilerlemeler ışığında önemli bir klinik potansiyel barındırmaktadır. Ancak bu potansiyelin tam anlamıyla klinik translasyona dönüştürülebilmesi için; randomize kontrollü çalışmalar, prospektif kohortlar ve disiplinler arası iş birliği ile desteklenen kapsamlı bir araştırma gündemi gerekmektedir. Bu süreçte, temel bilimlerden klinik uygulamalara uzanan bütünleşik bir yaklaşım, otoimmün hastalıkların yönetiminde yeni bir paradigma oluşturabilir. Son olarak, randomize kontrollü çalışmalarla elde edilen güçlü klinik kanıtlar ve regülatuvar kurumlarla koordineli yol haritaları, glikan biyobelirteçlerinin onay süreçlerini hızlandıracaktır. Sağlık profesyonellerine yönelik eğitim programları ve karar destek sistemleri ise bu yeniliklerin hasta bakımına entegrasyonunu kolaylaştıracaktır.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Ai, J., Leonhardt, J. M., & Heymann, W. R. (2003). Autoimmune thyroid diseases: etiology, pathogenesis, and dermatologic manifestations. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 48(5), 641–662.
- Alkuhlani, A., Gad, W., Roushdy, M., & Salem, A. B. M. (2021). Intelligent Techniques Analysis for Glycosylation Site Prediction. *Current Bioinformatics*, 16(6), 774–788.

- Almaani, S., Meara, A., & Rovin, B. H. (2017). Update on lupus nephritis. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, 12(5), 825–835.
- Alvarez-Manilla, G., Atwood, J., Guo, Y., Warren, N. L., Orlando, R., & Pierce, M. (2006). Tools for glycoproteomic analysis: Size exclusion chromatography facilitates identification of tryptic glycopeptides with N-linked glycosylation sites. *Journal of Proteome Research*, 5(3), 701–708.
- Alves, I., Santos-Pereira, B., Dalebout, H., Santos, S., Vicente, M. M., Campar, A., Thepaut, M., Fieschi, F., Strahl, S., Boyaval, F., Vizcaíno, R., Silva, R., Holst-Bernal, S., Vasconcelos, C., Santos, L., Wuhrer, M., Marinho, A., Heijs, B., & Pinho, S. S. (2021). Protein Mannosylation as a Diagnostic and Prognostic Biomarker of Lupus Nephritis: An Unusual Glycan Neoepitope in Systemic Lupus Erythematosus. *Arthritis and Rheumatology*, 73(11), 2069–2077.
- Bermingham, M. L., Colombo, M., McGurnaghan, S. J., Blackbourn, L. A. K., Vučković, F., Pučić Baković, M., Trbojević-Akmačić, I., Lauc, G., Agakov, F., Agakova, A. S., Hayward, C., Klarić, L., Palmer, C. N. A., Petrie, J. R., Chalmers, J., Collier, A., Green, F., Lindsay, R. S., Macrury, S., ... Colhoun, H. M. (2018). N-Glycan Profile and Kidney Disease in Type 1 Diabetes. *Diabetes Care*, 41(1), 79–87.
- Bojar, D., & Lisacek, F. (2022). Glycoinformatics in the Artificial Intelligence Era. *Chemical Reviews*, 122(20), 15971–15988.
- Bolon, B. (2012). Cellular and Molecular Mechanisms of Autoimmune Disease. *Toxicologic Pathology*, 40(2), 216–229.
- Bondt, A., Selman, M. H. J., Deelder, A. M., Hazes, J. M. W., Willemsen, S. P., Wuhrer, M., & Dolhain, R. J. E. M. (2013). Association between galactosylation of immunoglobulin G and improvement of rheumatoid arthritis during pregnancy is independent of sialylation. *Journal of Proteome Research*, 12(10), 4522–4531.
- Bournazos, S., Gupta, A., & Ravetch, J. V. (2020). The role of IgG Fc receptors in antibody-dependent enhancement. *Nature Reviews Immunology*, 20(10), 633–643.
- Burska, A., Boissinot, M., & Ponchel, F. (2014). Cytokines as biomarkers in rheumatoid arthritis. *Mediators of Inflammation*, 2014(1), 545493.
- Buszewski, B., & Noga, S. (2012). Hydrophilic interaction liquid chromatography (HILIC)-a powerful separation technique. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 402(1), 231–247.
- Castro, C., & Gourley, M. (2010). Diagnostic testing and interpretation of tests for autoimmunity. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 125(2), S238–S247.
- Chen, X. X., Chen, Y. Q., & Ye, S. (2015). Measuring decreased serum IgG sialylation: a novel clinical biomarker of lupus. *Lupus*, 24(9), 948–954.

- Cindrić, A., Krištić, J., Martinić Kavur, M., & Pezer, M. (2021). Glycosylation and Aging. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1325, 341–373.
- Ciregia, F., Baiwir, D., Cobraiville, G., Dewael, T., Mazzucchelli, G., Badot, V., Di Romana, S., Sidiras, P., Sokolova, T., Durez, P., Malaise, M. G., & De Seny, D. (2020). Glycosylation deficiency of lipopolysaccharide-binding protein and corticosteroid-binding globulin associated with activity and response to treatment for rheumatoid arthritis. *Journal of Translational Medicine*, 18(1), 1–17.
- Clerc, F., Novokmet, M., Dotz, V., Reiding, K. R., de Haan, N., Kammeijer, G. S. M., Dalebout, H., Bladergroen, M. R., Vukovic, F., Rapp, E., Satsangi, J., Nimmo, E. R., Ventham, N. T., Drummond, H., Kalla, R., Adams, A. T., O’Leary, K., Boyapati, R., Wilson, D. C., ... Wuhrer, M. (2018). Plasma N-Glycan Signatures Are Associated With Features of Inflammatory Bowel Diseases. *Gastroenterology*, 155(3), 829–843.
- Clerc, F., Reiding, K. R., de Haan, N., Koeleman, C. A. M., Hipgrave Ederveen, A. L., Manetti, N., Dotz, V., Annese, V., & Wuhrer, M. (2023). Immunoglobulin A Glycosylation Differs between Crohn’s Disease and Ulcerative Colitis. *Journal of Proteome Research*, 22(10), 3213–3224.
- Clerc, F., Reiding, K. R., Jansen, B. C., Kammeijer, G. S. M., Bondt, A., & Wuhrer, M. (2015). Human plasma protein N-glycosylation. *Glycoconjugate Journal*, 33(3), 309–343.
- Cobb, B. A. (2020). The history of IgG glycosylation and where we are now. *Glycobiology*, 30(4), 202–213.
- Cojocaru, M., Cojocaru, I. M., Silosi, I., Vrabie, C. D., & Tanasescu, R. (2010). Extra-articular Manifestations in Rheumatoid Arthritis. *Mædica*, 5(4), 286.
- Crimmins, E. M. (2015). Lifespan and Healthspan: Past, Present, and Promise. *The Gerontologist*, 55(6), 901–911.
- Danchenko, N., Satia, J. A., & Anthony, M. S. (2006). Epidemiology of systemic lupus erythematosus: a comparison of worldwide disease burden. *Lupus*, 15(5), 308–318.
- De Man, Y. A., Dolhain, R. J. E. M., Van De Geijn, F. E., Willemsen, S. P., & Hazes, J. M. W. (2008). Disease activity of rheumatoid arthritis during pregnancy: Results from a nationwide prospective study. *Arthritis Care & Research*, 59(9), 1241–1248.
- Deng, G., Chen, X., Shao, L., Wu, Q., & Wang, S. (2024). Glycosylation in autoimmune diseases: A bibliometric and visualization study. *Heliyon*, 10(9), 30026.
- Deng, X., Liu, X., Zhang, Y., Ke, D., Yan, R., Wang, Q., Tian, X., Li, M., Zeng, X., & Hu, C. (2023). Changes of serum IgG glycosylation patterns in rheumatoid arthritis. *Clinical Proteomics*, 20(1), 1–11.

- Ettxebarria, J., & Reichardt, N. C. (2016). Methods for the absolute quantification of N-glycan biomarkers. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1860(8), 1676–1687.
- Flevaris, K., & Kontoravdi, C. (2022). Immunoglobulin G N-glycan Biomarkers for Autoimmune Diseases: Current State and a Glycoinformatics Perspective. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 5180.
- Fröhlich, E., & Wahl, R. (2017). Thyroid autoimmunity: Role of anti-thyroid antibodies in thyroid and extra-thyroidal diseases. *Frontiers in Immunology*, 8(MAY), 265506.
- Giacomelli, R., Afeltra, A., Alunno, A., Bartoloni-Bocci, E., Berardicurti, O., Bombardieri, M., Bortoluzzi, A., Caporali, R., Caso, F., Cervera, R., Chimenti, M. S., Cipriani, P., Coloma, E., Conti, F., D'Angelo, S., De Vita, S., Di Bartolomeo, S., Distler, O., Doria, A., ... Tzioufas, A. G. (2019). Guidelines for biomarkers in autoimmune rheumatic diseases - evidence based analysis. *Autoimmunity Reviews*, 18(1), 93–106.
- Gillespie, K. M. (2006). Type 1 diabetes: pathogenesis and prevention. *CMAJ*, 175(2), 165–170.
- Gińdzieńska-Sieśkiewicz, E., Radziejewska, I., Domysławska, I., Klimiuk, P. A., Sulik, A., Rojewski, J., Gabryel-Porowska, H., & Sierakowski, S. (2016). Changes of glycosylation of IgG in rheumatoid arthritis patients treated with methotrexate. *Advances in Medical Sciences*, 61(2), 193–197.
- Green, R. S., Stone, E. L., Tenno, M., Lehtonen, E., Farquhar, M. G., & Marth, J. D. D. (2007). Mammalian N-Glycan Branching Protects against Innate Immune Self-Recognition and Inflammation in Autoimmune Disease Pathogenesis. *Immunity*, 27(2), 308–320.
- Gudelj, I., Salo, P. P., Trbojević-Akmačić, I., Albers, M., Primorac, D., Perola, M., & Lauc, G. (2018). Low galactosylation of IgG associates with higher risk for future diagnosis of rheumatoid arthritis during 10 years of follow-up. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)- Molecular Basis of Disease*, 1864(6), 2034–2039.
- Gyebrovski, B., Ács, A., Szabó, D., Auer, F., Novozánszki, S., Rojkovich, B., Magyar, A., Hudecz, F., Vékey, K., Drahos, L., & Sármay, G. (2022). The Role of IgG Fc Region N-Glycosylation in the Pathomechanism of Rheumatoid Arthritis. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10), 5828.
- Hafkenschield, L., Bondt, A., Scherer, H. U., Huizinga, T. W. J., Wuhler, M., Toes, R. E. M., & Rombouts, Y. (2017). Structural analysis of variable domain glycosylation of anti-citrullinated protein antibodies in rheumatoid arthritis reveals the presence of highly sialylated glycans. *Molecular and Cellular Proteomics*, 16(2), 278–287.

- Hafkenschied, L., de Moel, E., Smolik, I., Tanner, S., Meng, X., Jansen, B. C., Bondt, A., Wuhler, M., Huizinga, T. W. J., Toes, R. E. M., El-Gabalawy, H., & Scherer, H. U. (2019). N-Linked Glycans in the Variable Domain of IgG Anti-Citrullinated Protein Antibodies Predict the Development of Rheumatoid Arthritis. *Arthritis & Rheumatology*, 71(10), 1626–1633.
- Hanić, M., Trbojević-Akmačić, I., & Lauc, G. (2019). Inflammatory bowel disease - glycomics perspective. *Biochimica et Biophysica Acta. General Subjects*, 1863(10), 1595–1601.
- Haslund-Gourley, B. S., Wigdahl, B., & Comunale, M. A. (2023). IgG N-glycan Signatures as Potential Diagnostic and Prognostic Biomarkers. *Diagnostics*, 13(6), 1016.
- Hu, Y., & Mechref, Y. (2012). Comparing MALDI-MS, RP-LC-MALDI-MS and RP-LC-ESI-MS glycomic profiles of permethylated N-glycans derived from model glycoproteins and human blood serum. *Electrophoresis*, 33(12), 1768–1777.
- Huang, C., Liu, Y., Wu, H., Sun, D., & Li, Y. (2017). Characterization of IgG glycosylation in rheumatoid arthritis patients by MALDI-TOF-MSn and capillary electrophoresis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 409(15), 3731–3739.
- Ippolito, A., Wallace, D. J., Gladman, D., Fortin, P. R., Urowitz, M., Werth, V., Costner, M., Gordon, C., Alarcón, G. S., Ramsey-Goldman, R., Maddison, P., Clarke, A., Bernatsky, S., Manzi, S., Bae, S. C., Merrill, J. T., Ginzler, E., Hanly, J. G., Nived, O., ... Petri, M. (2011). Autoantibodies in systemic lupus erythematosus: comparison of historical and current assessment of seropositivity. *Lupus*, 20(3), 250–255.
- Iskandar, H. N., & Ciorba, M. A. (2012). Biomarkers in inflammatory bowel disease: current practices and recent advances. *Translational Research : The Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 159(4), 313–325.
- Iwaki, J., & Hirabayashi, J. (2018). Carbohydrate-Binding Specificity of Human Galectins: An Overview by Frontal Affinity Chromatography. *Trends in Glycoscience and Glycotechnology*, 30(172), S137–S153.
- Kam, R. K. T., & Poon, T. C. W. (2008). The potentials of glycomics in biomarker discovery. *Clinical Proteomics*, 4(3–4), 67–79.
- Katsarou, A., Gudbjörnsdóttir, S., Rawshani, A., Dabelea, D., Bonifacio, E., Anderson, B. J., Jacobsen, L. M., Schatz, D. A., & Lernmark, A. (2017). Type 1 diabetes mellitus. *Nature Reviews Disease Primers*, 3(1), 1–17.
- Kaul, A., Gordon, C., Crow, M. K., Touma, Z., Urowitz, M. B., Van Vollenhoven, R., Ruiz-Irastorza, G., & Hughes, G. (2016). Systemic lupus erythematosus. *Nature Reviews. Disease Primers*, 2.

- Kerr, M. A. (1990). The structure and function of human IgA. *Biochemical Journal*, 271(2), 285.
- Kissel, T., Hafkenscheid, L., Wesemael, T. J., Tamai, M., Kawashiri, S. ya, Kawakami, A., El-Gabalawy, H. S., van Schaardenburg, D., Rantapää-Dahlqvist, S., Wuhler, M., van der Helm-van Mil, A. H. M., Allaart, C. F., van der Woude, D., Scherer, H. U., Toes, R. E. M., & Huizinga, T. W. J. (2022). IgG Anti-Citrullinated Protein Antibody Variable Domain Glycosylation Increases Before the Onset of Rheumatoid Arthritis and Stabilizes Thereafter: A Cross-Sectional Study Encompassing ~1,500 Samples. *Arthritis & Rheumatology (Hoboken, N.J.)*, 74(7), 1147–1158.
- Kolarz, B., Podgorska, D., & Podgorski, R. (2021). Insights of rheumatoid arthritis biomarkers. *Biomarkers*, 26(3), 185–195.
- Kosanović, M., Milutinović, B., Goč, S., Mitić, N., & Janković, M. (2017). Ion-Exchange Chromatography Purification of Extracellular Vesicles. *BioTechniques*, 63(2), 65–71.
- Lee, H. J., Li, C. W., Hammerstad, S. S., Stefan, M., & Tomer, Y. (2015). Immunogenetics of autoimmune thyroid diseases: A comprehensive review. *Journal of Autoimmunity*, 64, 82–90.
- Li, D. P., Han, Y. X., He, Y. S., Wen, Y., Liu, Y. C., Fu, Z. Y., Pan, H. F., & Cao, F. (2023). A global assessment of incidence trends of autoimmune diseases from 1990 to 2019 and predicted changes to 2040. *Autoimmunity Reviews*, 22(10), 103407.
- Li, H., Chiang, A. W. T., & Lewis, N. E. (2022). Artificial intelligence in the analysis of glycosylation data. *Biotechnology Advances*, 60, 108008.
- Li, W., Liu, Y., Zheng, X., Gao, J., Wang, L., & Li, Y. (2019). Investigation of the Potential Use of Sialic Acid as a Biomarker for Rheumatoid Arthritis, *Annals of Clinical & Laboratory Science*, 49(2), 224- 231.
- Liang, P. H., Wu, C. Y., Greenberg, W. A., & Wong, C. H. (2008). Glycan arrays: biological and medical applications. *Current Opinion in Chemical Biology*, 12(1), 86–92.
- Lu, G., Criehtfield, C. L., Gattu, S., Veltri, L. M., & Holland, L. A. (2018). Capillary Electrophoresis Separations of Glycans. *Chemical Reviews*, 118(17), 7867–7885.
- Lu, X., Wang, L., Wang, M., Li, Y., Zhao, Q., Shi, Y., Zhang, Y., Wang, Y., Wang, W., Ji, L., Hou, H., & Li, D. (2023). Association between immunoglobulin G N-glycosylation and lupus nephritis in female patients with systemic lupus erythematosus: a case-control study. *Frontiers in Immunology*, 14, 1257906.
- Lundborg, M., & Widmalm, G. (2011). Structural analysis of glycans by NMR chemical shift prediction. *Analytical Chemistry*, 83(5), 1514–1517.

- Lyman, D. F., Bell, A., Black, A., Dingerdisen, H., Cauley, E., Gogate, N., Liu, D., Joseph, A., Kahsay, R., Crichton, D. J., Mehta, A., & Mazumder, R. (2022). Modeling and integration of N-glycan biomarkers in a comprehensive biomarker data model. *Glycobiology*, 32(10), 855–870.
- Maahs, D. M., West, N. A., Lawrence, J. M., & Mayer-Davis, E. J. (2010). Epidemiology of Type 1 Diabetes. *Endocrinology and Metabolism Clinics*, 39(3), 481–497.
- Mahajan, A., Amelio, J., Gairy, K., Kaur, G., Levy, R. A., Roth, D., & Bass, D. (2020). Systemic lupus erythematosus, lupus nephritis and end-stage renal disease: a pragmatic review mapping disease severity and progression. *Lupus*, 29(9), 1011–1020.
- Mahan, A. E., Tedesco, J., Dionne, K., Baruah, K., Cheng, H. D., De Jager, P. L., Barouch, D. H., Suscovich, T., Ackerman, M., Crispin, M., & Alter, G. (2015). A method for high-throughput, sensitive analysis of IgG Fc and Fab glycosylation by capillary electrophoresis. *Journal of Immunological Methods*, 417, 34–44.
- Marrack, P., Kappler, J., & Kotzin, B. L. (2001). Autoimmune disease: why and where it occurs. *Nature Medicine*, 7(8), 899–905.
- Martin, K., Talukder, R., Hay, F. C., & Axford, J. S. (2001). Characterization of changes in IgG associated oligosaccharide profiles in rheumatoid arthritis, psoriatic arthritis, and ankylosing spondylitis using fluorophore linked carbohydrate electrophoresis. *The Journal of Rheumatology*, 28(7), 1531–1536.
- Martin, T. C., Šimurina, M., Ząbczyńska, M., Kavur, M., Rydlewska, M., Pezer, M., Kozłowska, K., Burri, A., Vilaj, M., Turek-Jabrocka, R., Krnjajić-Tadijanović, M., Trofimiuk-Müldner, M., Ugrina, I., Lityn, A., Hubalewska-Dydejezyk, A., Trbojevic-Akmacic, I., Lim, E. M., Walsh, J. P., Pocheć, E., ... Lauc, G. (2020). Decreased Immunoglobulin G Core Fucosylation, A Player in Antibody-dependent Cell-mediated Cytotoxicity, is Associated with Autoimmune Thyroid Diseases. *Molecular & Cellular Proteomics : MCP*, 19(5), 774–792.
- Maverakis, E., Kim, K., Shimoda, M., Gershwin, M. E., Patel, F., Wilken, R., Raychaudhuri, S., Ruhaak, L. R., & Lebrilla, C. B. (2015). Glycans in the immune system and The Altered Glycan Theory of Autoimmunity: A critical review. *Journal of Autoimmunity*, 57, 1–13.
- Nakajima, S., Iijima, H., Shinzaki, S., Egawa, S., Inoue, T., Mukai, A., Hayashi, Y., Kondo, J., Akasaka, T., Nishida, T., Kanto, T., Morii, E., Mizushima, T., Miyoshi, E., Tsujii, M., & Hayashi, N. (2011). Functional analysis of agalactosyl IgG in inflammatory bowel disease patients. *Inflammatory Bowel Diseases*, 17(4), 927–936.
- Nemčić, M., Shkunnikova, S., Kifer, D., Plavša, B., Vučić Lovrenčić, M., Morahan, G., Duvnjak, L., Pociot, F., & Gornik, O. (2024). N-glycosylation of immunoglobulin A in children and adults with type 1 diabetes mellitus. *Heliyon*, 10(9).

- Nemčić, M., Tijardović, M., Rudman, N., Bulum, T., Tomić, M., Plavša, B., Vučković Rebrina, S., Vučić Lovrenčić, M., Duvnjak, L., Morahan, G., & Gornik, O. (2023). N-glycosylation of serum proteins in adult type 1 diabetes mellitus exposes further changes compared to children at the disease onset. *Clinica Chimica Acta*, 543, 117298.
- Nimmerjahn, F., & Ravetch, J. V. (2006). Fc γ receptors: Old friends and new family members. *Immunity*, 24(1), 19–28.
- Ohtsubo, K., & Marth, J. D. (2006). Glycosylation in cellular mechanisms of health and disease. *Cell*, 126(5), 855–867.
- Pan, H., Wang, J., Liang, Y., Wang, C., Tian, R., Ye, H., Zhang, X., Wu, Y., Shao, M., Zhang, R., Xiao, Y., Li, Z., Zhang, G., Zhou, H., Wang, Y., Wang, X., Li, Z., Liu, W., & Liu, L. (2023). Serum IgG Glycan Hallmarks of Systemic Lupus Erythematosus. *Engineering*, 26, 89–98.
- Parekh, R. B., Dwek, R. A., Sutton, B. J., Fernandes, D. L., Leung, A., Stanworth, D., Rademacher, T. W., Mizuochi, T., Taniguchi, T., Matsuta, K., Takeuchi, F., Nagano, Y., Miyamoto, T., & Kobata, A. (1985). Association of rheumatoid arthritis and primary osteoarthritis with changes in the glycosylation pattern of total serum IgG. *Nature*, 316(6027), 452–457.
- Parekh, R. B., Isenberg, D. A., Ansell, B. M., Roitt, I. M., Dwek, R. A., & Rademacher, T. W. (1988). Galactosylation Of Igg Associated Oligosaccharides: Reduction In Patients With Adult And Juvenile Onset Rheumatoid Arthritis And Relation To Disease Activity. *The Lancet*, 331(8592), 966–969.
- Pasala, C., Sharma, S., Roychowdhury, T., Moroni, E., Colombo, G., & Chiosis, G. (2024). N-glycosylation as a Modulator of Protein Conformation and Assembly in Disease. *Biomolecules*, 14(3), 282.
- Paton, B., Suarez, M., Herrero, P., Canela, N., Cairo, W., Garozzo, D., & Pshezhetsky, A. V. (2021). Glycosylation Biomarkers Associated with Age-Related Diseases and Current Methods for Glycan Analysis. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11), 5788.
- Pilkington, C., Yeung, E., Isenberg, D., Lefvert, A. K., & Rook, G. A. W. (1995). Agalactosyl IgG and Antibody Specificity in Rheumatoid Arthritis, Tuberculosis, Systemic Lupus Erythematosus and Myasthenia Gravis. *Autoimmunity*, 22(2), 107–111.
- Pisetsky, D. S. (2023). Pathogenesis of autoimmune disease. *Nature Reviews Nephrology* 19(8), 509–524.
- Poland, D. C. W., Schalkwijk, C. G., Stehouwer, C. D. A., Koeleman, C. A. M., Van Het Hof, B., & Van Dijk, W. (2001). Increased α 3-fucosylation of α 1-acid glycoprotein in Type I diabetic patients is related to vascular function. *Glycoconjugate Journal*, 18(3), 261–268.

- Pons-Estel, G. J., Ugarte-Gil, M. F., & Alarcón, G. S. (2017). Epidemiology of systemic lupus erythematosus. *Expert Review of Clinical Immunology*, 13(8), 799–814.
- Pučić, M., Knežević, A., Vidič, J., Adamczyk, B., Novokmet, M., Polašek, O., Gornik, O., Šupraha-Goreta, S., Wormald, M. R., Redžic, I., Campbell, H., Wright, A., Hastie, N. D., Wilson, J. F., Rudan, I., Wuhler, M., Rudd, P. M., Josić, D., & Lauc, G. (2011). High throughput isolation and glycosylation analysis of IgG-variability and heritability of the IgG glycome in three isolated human populations. *Molecular and Cellular Proteomics*, 10(10), M111.010090.
- Radu, A. F., & Bungau, S. G. (2021). Management of Rheumatoid Arthritis: An Overview. *Cells*, 10(11), 2857.
- Reily, C., Stewart, T. J., Renfrow, M. B., & Novak, J. (2019). Glycosylation in health and disease. *Nature Reviews Nephrology*, 15(6), 346–366.
- Renaudineau, Y., Brooks, W., & Belliere, J. (2023). Lupus Nephritis Risk Factors and Biomarkers: An Update. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(19).
- Robbe Masselot, C., Cordier, C., Marsac, B., Nachury, M., Leonard, R., & Sendid, B. (2023). Human Fecal Mucin Glycosylation as a New Biomarker in Inflammatory Bowel Diseases. *Inflammatory Bowel Diseases*, 29(1), 167–171.
- Rombouts, Y., Willemze, A., Van Beers, J. J. B. C., Shi, J., Kerkman, P. F., Van Toorn, L., Janssen, G. M. C., Zaldumbide, A., Hoeven, R. C., Pruijn, G. J. M., Deelder, A. M., Wolbink, G., Rispens, T., Van Veelen, P. A., Huizinga, T. W. J., Wuhler, M., Trouw, L. A., Scherer, H. U., & Toes, R. E. M. (2016). Extensive glycosylation of ACPA-IgG variable domains modulates binding to citrullinated antigens in rheumatoid arthritis. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 75(3), 578–585.
- Rook, G. A. W., Steele, J., Brealey, R., Whyte, A., Isenberg, D., Sumar, N., Nelson, J. L., Bodman, K. B., Young, A., Roitt, I. M., Williams, P., Scragg, I., Edge, C. J., Arkwright, P. D., Ashford, D., Wormald, M., Rudd, P., Redman, C. W. G., Dwek, R. A., & Rademacher, T. W. (1991). Changes in IgG glycoform levels are associated with remission of arthritis during pregnancy. *Journal of Autoimmunity*, 4(5), 779–794.
- Rudman, N., Kifer, D., Kaur, S., Simunović, V., Cvetko, A., Pociot, F., Morahan, G., & Gornik, O. (2022). Children at onset of type 1 diabetes show altered N-glycosylation of plasma proteins and IgG. *Diabetologia*, 65(8), 1315–1327.
- Scherer, H. U., Häupl, T., & Burmester, G. R. (2020). The etiology of rheumatoid arthritis. *Journal of Autoimmunity*, 110, 102400.
- Seeling, M., Brückner, C., & Nimmerjahn, F. (2017). Differential antibody glycosylation in autoimmunity: sweet biomarker or modulator of disease activity? *Nature Reviews Rheumatology*, 13(10), 621–630.

- Sharma, C., Hamza, A., Boyle, E., Donu, D., & Cen, Y. (2024). Post-Translational Modifications and Diabetes. *Biomolecules*, 14(3), 310.
- Shipman, J. T., Nguyen, H. T., & Desaire, H. (2020). So You Discovered a Potential Glycan-Based Biomarker; Now What? We Developed a High-Throughput Method for Quantitative Clinical Glycan Biomarker Validation. *ACS Omega*, 5(12), 6270–6276.
- Šimurina, M., de Haan, N., Vučković, F., Kennedy, N. A., Štambuk, J., Falck, D., Trbojević-Akmačić, I., Clerc, F., Razdorov, G., Khon, A., Latiano, A., D’Inca, R., Danese, S., Targan, S., Landers, C., Dubinsky, M., Campbell, H., Zoldoš, V., Permberton, I. K., ... Lauc, G. (2018). Glycosylation of Immunoglobulin G Associates With Clinical Features of Inflammatory Bowel Diseases. *Gastroenterology*, 154(5), 1320-1333.
- Sjöwall, C., Zapf, J., Von Löhneysen, S., Magorivska, I., Biermann, M., Janko, C., Winkler, S., Bilyy, R., Schett, G., Herrmann, M., & Muñoz, L. E. (2015). Altered glycosylation of complexed native IgG molecules is associated with disease activity of systemic lupus erythematosus. *Lupus*, 24(6), 569–581.
- Smith, J., Mittermayr, S., Váradi, C., & Bones, J. (2017). Quantitative glycomics using liquid phase separations coupled to mass spectrometry. *Analyst*, 142(5), 700–720.
- Stadlmann, J., Pabst, M., Kolarich, D., Kunert, R., & Altmann, F. (2008). Analysis of immunoglobulin glycosylation by LC-ESI-MS of glycopeptides and oligosaccharides. *Proteomics*, 8(14), 2858–2871.
- Stafford, I. S., Kellermann, M., Mossotto, E., Beattie, R. M., MacArthur, B. D., & Ennis, S. (2020). A systematic review of the applications of artificial intelligence and machine learning in autoimmune diseases. *Npj Digital Medicine*, 3(1), 1–11.
- Su, Z., Xie, Q., Wang, Y., & Li, Y. (2020). Abberant Immunoglobulin G Glycosylation in Rheumatoid Arthritis by LTQ-ESI-MS. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(6), 2045.
- Sun, D., Hu, F., Gao, H., Song, Z., Xie, W., Wang, P., Shi, L., Wang, K., Li, Y., Huang, C., & Li, Z. (2019). Distribution of abnormal IgG glycosylation patterns from rheumatoid arthritis and osteoarthritis patients by MALDI-TOF-MSn. *Analyst*, 144(6), 2042–2051.
- Tekin, B., & Gurbanov, R. (2024). Kütle Spektrometresinden Glikan Mikrodizilerine: Glikomikte Analitik Tekniklere Genel Bir Bakış. *Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 218–235.
- Tektonidou, M. G., & Ward, M. M. (2011). Validation of new biomarkers in systemic autoimmune diseases. *Nature Reviews Rheumatology*, 7(12), 708.

- Theodoratou, E., Campbell, H., Ventham, N. T., Kolarich, D., Pučić-Baković, M., Zoldoš, V., Fernandes, D., Pemberton, I. K., Rudan, I., Kennedy, N. A., Wuhrer, M., Nimmo, E., Annese, V., McGovern, D. P. B., Satsangi, J., & Lauc, G. (2014). The role of glycosylation in IBD. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 11(10), 588–600.
- Tomana, M., Schrohenloher, R. E., Koopman, W. J., Alarcán, G. S., & Paul, W. A. (1988). Abnormal glycosylation of serum iga from patients with chronic inflammatory diseases. *Arthritis & Rheumatism*, 31(3), 333–338.
- Tomana, M., Schrohenloher, R. E., Reveille, J. D., Arnett, F. C., & Koopman, W. J. (1992). Abnormal galactosylation of serum IgG in patients with systemic lupus erythematosus and members of families with high frequency of autoimmune diseases. *Rheumatology International*, 12(5), 191–194.
- Trbojevic Akmacic, I., Ventham, N. T., Theodoratou, E., Vučković, F., Kennedy, N. A., Krištić, J., Nimmo, E. R., Kalla, R., Drummond, H., Štambuk, J., Dunlop, M. G., Novokmet, M., Aulchenko, Y., Gornik, O., Campbell, H., Pučić Baković, M., Satsangi, J., & Lauc, G. (2015). Inflammatory bowel disease associates with proinflammatory potential of the immunoglobulin G glycome. *Inflammatory Bowel Diseases*, 21(6), 1237–1247.
- Van de Geijn, F. E., Wuhrer, M., Selman, M. H. J., Willemsen, S. P., de Man, Y. A., Deelder, A. M., Hazes, J. M. W., & Dolhain, R. J. E. M. (2009). Immunoglobulin G galactosylation and sialylation are associated with pregnancy-induced improvement of rheumatoid arthritis and the postpartum flare: Results from a large prospective cohort study. *Arthritis Research and Therapy*, 11(6), 1–10.
- Vučković, F., Krištić, J., Gudelj, I., Teruel, M., Keser, T., Pezer, M., Pučić-Baković, M., Štambuk, J., Trbojević-Akmačić, I., Barrios, C., Pavic, T., Menni, C., Wang, Y., Zhou, Y., Cui, L., Song, H., Zeng, Q., Guo, X., Pons-Estel, B. A., ... Lauc, G. (2015). Association of systemic lupus erythematosus with decreased immunosuppressive potential of the IgG glycome. *Arthritis and Rheumatology*, 67(11), 2978–2989.
- Wen, W., Li, Y., Cheng, Y., He, J., Jia, R., Li, C., Guo, J., Sun, X., & Li, Z. (2018). Lipopolysaccharide-binding protein is a sensitive disease activity biomarker for rheumatoid arthritis. *Clin Exp Rheumatol*, 36(2), 233–240.
- Wuhrer, M., De Boer, A. R., & Deelder, A. M. (2009). Structural glycomics using hydrophilic interaction chromatography (HILIC) with mass spectrometry. *Mass Spectrometry Reviews*, 28(2), 192–206.
- Wuhrer, M., Koeleman, C. A. M., Hokke, C. H., & Deelder, A. M. (2004). Nano-scale liquid chromatography-mass spectrometry of 2-aminobenzamide-labeled oligosaccharides at low femtomole sensitivity. *International Journal of Mass Spectrometry*, 232(1), 51–57.

- Xu, Z., Liu, Y., He, S., Sun, R., Zhu, C., Li, S., Hai, S., Luo, Y., Zhao, Y., & Dai, L. (2023). Integrative Proteomics and N-Glycoproteomics Analyses of Rheumatoid Arthritis Synovium Reveal Immune-Associated Glycopeptides. *Molecular & Cellular Proteomics : MCP*, 22(5).
- Yang, H., Ye, J., You, Y., Zhou, Z., & Wu, J. (2024). AB1112 The Correlation Between Glycosylation Of Anti-Dsdna Antibody And Lupus Nephritis. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 83(Suppl 1), 1886–1887.
- Yao, M., Gao, C., Zhang, C., Di, X., Liang, W., Sun, W., Wang, Q., & Zheng, Z. (2020). Identification of Molecular Markers Associated With the Pathophysiology and Treatment of Lupus Nephritis Based on Integrated Transcriptome Analysis. *Frontiers in Genetics*, 11.
- Yuan, S., Li, Q., Zhang, Y., Huang, C., Wu, H., Li, Y., Liu, Y., Yu, N., Zhang, H., Lu, G., Gao, Y., Gao, Y., & Guo, X. (2015). Changes in anti-thyroglobulin IgG glycosylation patterns in Hashimoto's thyroiditis patients. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 100(2), 717–724.
- Ząbczyńska, M., Link-Lenczowski, P., Novokmet, M., Martin, T., Turek-Jabrocka, R., Trofimiuk-Müldner, M., & Pocheć, E. (2020). Altered N-glycan profile of IgG-depleted serum proteins in Hashimoto's thyroiditis. *Biochimica et Biophysica Acta. General Subjects*, 1864(3).
- Ząbczyńska, M., Link-Lenczowski, P., & Pocheć, E. (2021). Glycosylation in Autoimmune Diseases. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1325, 205–218.
- Zhang, Y. Z., & Li, Y. Y. (2014). Inflammatory bowel disease: Pathogenesis. *World Journal of Gastroenterology : WJG*, 20(1), 91.
- Zhao, L., Liu, M., Gao, Y., Huang, Y., Lu, G., Gao, Y., Guo, X., & She, B. (2013). Glycosylation of sera thyroglobulin antibody in patients with thyroid diseases. *European Journal of Endocrinology*, 168(4), 585–592.
- Zhou, X., Motta, F., Selmi, C., Ridgway, W. M., Gershwin, M. E., & Zhang, W. (2021). Antibody glycosylation in autoimmune diseases. *Autoimmunity Reviews*, 20(5), 102804.
- Ziegler, A. G., Rewers, M., Simell, O., Simell, T., Lempainen, J., Steck, A., Winkler, C., Ilonen, J., Veijola, R., Knip, M., Bonifacio, E., & Eisenbarth, G. S. (2013). Seroconversion to Multiple Islet Autoantibodies and Risk of Progression to Diabetes in Children. *JAMA*, 309(23), 2473–2479.
- Zou, X., Yoshida, M., Nagai-Okatani, C., Iwaki, J., Matsuda, A., Tan, B., Hagiwara, K., Sato, T., Itakura, Y., Noro, E., Kaji, H., Toyoda, M., Zhang, Y., Narimatsu, H., & Kuno, A. (2017). A standardized method for lectin microarray-based tissue glycome mapping. *Scientific Reports* 2017 7:1, 7(1), 1–12.